

бораторных работ наряду с изучением различных вопросов техники высоких напряжений студенты осваивают на практике правила безопасного проведения работ на установках высокого напряжения.

В данное учебное пособие входит описание лабораторных работ по курсу техники высоких напряжений (изоляция и перенапряжений в электрических системах) для специальностей: электрические станции, электрические системы и сети, электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства, кибернетика электрических систем, электроэнергетика, автоматизация производства и распределения электрической энергии, электрические машины, электрические аппараты, электроизоляционная и кабельная техника. Кроме того, пособие может быть использовано при проведении лабораторных занятий по различным курсам для специальности «техника высоких напряжений».

Учебное пособие составлено коллективом преподавателей кафедры техники высоких напряжений Московского ордена Ленина и ордена Октябрьской революции энергетического института на основе многолетнего опыта ведения лабораторных занятий как по общим, так и по специальным курсам. Кроме авторов, в постановке лабораторных работ принимали участие В. М. Андрианов, В. Я. Киселев, О. И. Кондратов, Л. А. Пашкова и М. В. Соколова, а также многие другие сотрудники кафедры техники высоких напряжений и проблемной лаборатории сильных электрических полей.

Авторы благодарят профессоров Н. А. Николаева (Львовский политехнический институт) и К. П. Кадомскую (Новосибирский электротехнический институт) за обстоятельное рецензирование учебного пособия. Большую помощь оказал авторам покойный профессор В. В. Пучковский (Ивановский энергетический институт), предложения и замечания которого способствовали улучшению качества описаний лабораторных работ.

Все замечания по книге просьба направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., д. 10, Энергоиздат.

Авторы

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

Изоляция установок высокого напряжения. Испытательные установки и измерения

Глава 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ВОЗДУХЕ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Работа посвящена изучению основных характеристик электрического разряда при постоянном и переменном напряжении в воздухе при давлениях и температурах, близких к нормальным (101 300 Па и 20°C).

Самостоятельный разряд в газе. Основной причиной возникновения электрического разряда в газе является ударная ионизация, которая возникает под действием электронов, ускоряемых электрическим полем. В электроположительных газах, в которых невозможно образование отрицательных ионов, интенсивность этого процесса характеризуется коэффициентом ударной ионизации α , который определяет число актов ионизации, совершаемых электроном на пути в 1 см вдоль силовых линий электрического поля, и является величиной, обратной пути, проходимому электроном вдоль силовых линий поля до ионизации. В электроотрицательных газах помимо увеличения числа электронов при ударной ионизации происходит также потеря электронов за счет их «прилипания» к нейтральным частицам с образованием отрицательных ионов. Этот процесс характеризуется коэффициентом прилипания η , который является величиной, обратной пути, проходимому электроном вдоль силовой линии электрического поля до прилипания. Поэтому в электроотрицательных газах интенсивность процесса увеличения числа электронов определяется эффективным коэффициентом ударной ионизации $\alpha_{эф} = \alpha - \eta$.

Коэффициент $\alpha_{эф}$ (или α) зависит от напряженности электрического поля E , давления p и абсолютной температуры газа T . Для воздуха при давлении и температуре, близких к нормальным, эта зависимость может быть представлена в виде $\alpha_{эф}/\delta = f(E/\delta)$,

где

$$\delta = pT_0/p_0T \quad (1.1)$$

— относительная плотность воздуха; $p_0 = 101\,300$ Па, $T_0 = 293$ К — нормальное давление и температура.

Для возникновения разряда в газе необходим хотя бы один свободный электрон. После первого акта ионизации образуются два свободных электрона, затем четыре и т. д. Этот поток постепенно увеличивающегося числа электронов называется лавиной электронов. Число электронов в лавине определяется соотношением

$$n = \exp \int_{x_0}^x \alpha_{эф} dx, \quad (1.2)$$

в котором x_0 — координата появления начального электрона; $x - x_0$ — путь, пройденный лавиной в направлении электрического поля.

В процессе развития лавины в промежутке образуются также положительные ионы, число которых равно $n - 1$, и фотоны, возникновение которых связано с тем, что электроны лавины помимо ионизации также возбуждают молекулы газа, а переход возбужденных молекул в нормальное состояние сопровождается излучением. Воздействие фотонов и положительных ионов на катод, а также фотоионизация в объеме газа приводят к появлению электронов, которые называются «вторичными», так как они возникают в результате вторичных процессов, связанных с развитием начальной лавины.

Общее число вторичных электронов n_2 пропорционально $n - 1$, т. е.

$$n_2 = \gamma(n - 1), \quad (1.3)$$

причем коэффициент пропорциональности γ называется коэффициентом вторичной ионизации и в первом приближении может считаться величиной постоянной.

Начальный электрон в газовом промежутке появляется за счет внешнего ионизатора (ультрафиолетового излучения Солнца, космического излучения и т. д.) либо при развале отрицательных ионов, которые всегда имеются в промежутке в электроотрицательном газе и появление которых также обусловлено внешним ионизатором. Для того чтобы в дальнейшем разряд не зависел от внешнего ионизатора, необходимо, чтобы начальная лавина за счет вторичных процессов создала хотя бы один вторичный электрон, который положил бы начало новой

лаvine с числом электронов не менее, чем в начальной. Разряд, не зависящий от внешнего ионизатора, называется самостоятельным, а условие самостоятельности разряда, очевидно, имеет вид $n_2 \geq 1$ или

$$\gamma \left[\left(\exp \int_{x_0}^x \alpha_{эф} dx \right) - 1 \right] \geq 1, \quad (1.4)$$

причем интегрирование должно проводиться по части силовой линии, где $\alpha_{эф} > 0$.

Так как $\alpha_{эф} = \delta f(E/\delta)$, а напряжение между электродами равно интегралу напряженности электрического поля вдоль любой силовой линии, в том числе и той, по которой развивается лавина электронов, то можно определить минимальное значение напряжения, при котором выполняется условие самостоятельности разряда. Это напряжение называется начальным U_0 .

Начальные напряжения могут измеряться или рассчитываться с помощью условия самостоятельности разряда. Для расчета начального напряжения необходимо знать закон изменения напряженности электрического поля по длине промежутка. В большинстве изоляционных конструкций высокого напряжения этот закон может быть выражен уравнением

$$E_r = E_{r_0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^m, \quad (1.5)$$

где r_0 — радиус кривизны поверхности электрода, напряженность на поверхности которого E_{r_0} максимальна; r — радиус эквипотенциальной поверхности с напряженностью E_r ; m — показатель скорости спада напряженности поля. Электрические поля такого типа называются радиальными.

Условие самостоятельности разряда для радиальных электрических полей имеет вид:

$$\int_{r_0}^{r_n} \alpha_{эф} dr \geq \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = K, \quad (1.6)$$

где r_n — радиус зоны ионизации, определяемый из условия $\alpha_{эф} = 0$.

Зависимость $\alpha_{эф}/\delta = f(E/\delta)$ для большинства газов, в том числе и для воздуха при значениях δ , близких к

единице, можно аппроксимировать формулой

$$\alpha_{эф}/\delta = a \left(\frac{E}{\delta} - b \right)^2, \quad (1.7)$$

где a и b — постоянные для данного газа и $E/\delta \geq b$.

Из (1.6) с учетом (1.5) и (1.7) следует, что

$$\int_{r_0}^{r_n} a \delta \left[\frac{E_0}{\delta} \left(\frac{r_0}{r} \right)^m - b \right]^2 dr = K, \quad (1.8)$$

где E_0 — начальная напряженность промежутка, определяемая как наименьшее значение E_{r_0} , при котором выполняется условие самостоятельности.

Электрические поля в разрядных промежутках делятся на однородные и неоднородные. В однородном электрическом поле напряженность постоянна по всей длине промежутка, при выполнении условия самостоятельности разряда ионизация охватывает весь промежуток ($\alpha_{эф} > 0$ по всей длине промежутка), что приводит к его пробою.

Неоднородные электрические поля принято разделять на квазиоднородные, слабонеоднородные и резконеоднородные в зависимости от того, в каких пределах разрядного промежутка $\alpha_{эф} > 0$ и в какой форме реализуется

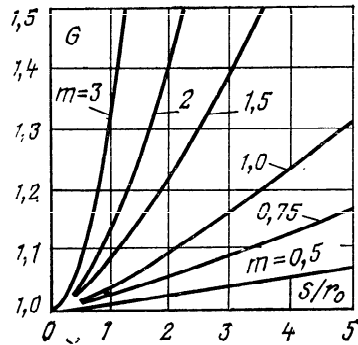


Рис. 1.1. Зависимость геометрического фактора G от отношения S/r_0 в радиальном поле при различных значениях показателя степени m .

разряд при выполнении условия самостоятельности. В квазиоднородном поле $\alpha_{эф} > 0$ по всей длине промежутка, что приводит к его пробою. В слабонеоднородных полях $\alpha_{эф} > 0$ в значительной части промежутка, что также приводит к его пробою. В резконеоднородных полях $\alpha_{эф} > 0$ в узкой зоне около электрода с радиусом r_0 при выполнении условия самостоятельности пробоя промежутка не происходит, возникает так называемый коронный разряд.

В промежутках с квазиоднородным полем $r_n = r_0 + S$, где S — длина промежутка, и решение уравнения (1.8)

10

приводит к следующему выражению для начального напряжения:

$$U_0 = \frac{b\delta S}{G} + \sqrt{\frac{K}{a}} \sqrt{\frac{\delta S}{G}}, \quad (1.9)$$

где G — геометрический фактор, значение которого зависит от m и S/r_0 (рис. 1.1).

В однородном поле $G=1$ и

$$U_0 = b\delta S + \sqrt{\frac{K}{a}} \sqrt{\delta S}. \quad (1.10)$$

Для воздуха $a=0,2$ см²/кВ, $b=24,5$ кВ/см, $K=8,2$; тогда U_0 , кВ, для квазиоднородного поля

$$U_0 = 24,5 \frac{\delta S}{G} + 6,4 \sqrt{\frac{\delta S}{G}} \quad (1.11)$$

и для однородного поля

$$U_0 = 24,5\delta S + 6,4 \sqrt{\delta S}. \quad (1.12)$$

В промежутках со слабо- и резконеоднородным полями радиус зоны ионизации r_n определяется из (1.5) с учетом (1.7) при $\alpha_{эф}=0$ на границе зоны ионизации:

$$r_n = r_0 \sqrt[m]{\frac{E_0}{b\delta}}. \quad (1.13)$$

В этом случае (1.8) может быть решено только численным методом. Результаты численного решения для воздуха при отрицательной полярности электрода радиусом r_0 ($K=8,2$) могут быть аппроксимированы выражением, кВ/см:

$$E_0 = 24,5\delta \left[1 + \frac{0,41 + 0,24m}{(r_0\delta)^{0,33}} \right]. \quad (1.14)$$

Начальное напряжение промежутка связано с начальной напряженностью соотношением

$$U_0 = E_0 S K_n^{-1}, \quad (1.15)$$

где K_n — коэффициент неоднородности поля, равный отношению максимальной напряженности в промежутке к средней.

11

Для коаксиальной системы электродов ($m=1$)

$$K_n = \frac{S}{r_0 \ln \left(\frac{S}{r_0} + 1 \right)}. \quad (1.16)$$

Граница раздела промежутков с квазиоднородным и слабонеоднородным полем может быть определена из (1.13) при $r_n = S + r_0 = R$, откуда

$$\left(\frac{R}{r_0} \right)_{\text{гр}}^m = \frac{E_0}{b\delta}. \quad (1.17)$$

и для воздуха с учетом (1.14)

$$\left(\frac{R}{r_0} \right)_{\text{гр}}^m = 1 + \frac{0,41 + 0,24m}{(r_0\delta)^{0,38}}, \quad (1.18)$$

Следовательно, граница раздела зависит как от геометрии промежутка, так и от относительной плотности и вида газа. Промежутки, для которых

$$\frac{R}{r_0} \leq \left(\frac{R}{r_0} \right)_{\text{гр}}^m,$$

имеют квазиоднородное поле.

Из (1.14) и (1.15), как и из (1.10), следует, что

$$U_0 = f \left(\delta r_0, \frac{R}{r_0} \right). \quad (1.19)$$

Соотношение (1.19) выражает закон подобия разрядов.

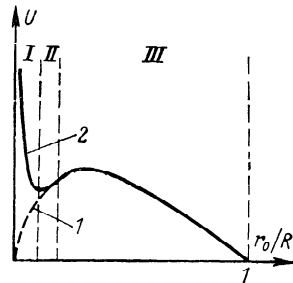


Рис. 1.2. Зависимости начального (1) и пробивного (2) напряжений от отношения радиусов внутреннего и наружного коаксиальных цилиндрических электродов.

На рис. 1.2 приведена зависимость U_0 от r_0/R при постоянной плотности воздуха и постоянном R для коаксиальной системы электродов. Если радиус наружного цилиндра сохранять постоянным, а радиус внутреннего цилиндра увеличивать, то начальное напряжение U_0 вначале будет возрастать (кривая 1, рис. 1.2), а затем сни-

жаться до нуля. Это объясняется тем, что при увеличении r_0 происходит как уменьшение коэффициента неоднородности ($K_n \rightarrow 1$), так и уменьшение длины промежутка $S = R - r_0$ ($S \rightarrow 0$), причем при малых r_0 основное влияние оказывает уменьшение K_n (начальное напряжение вследствие этого увеличивается), а начиная с $r_0 \approx 0,3R$ преобладающее влияние оказывает уменьшение длины промежутка (вследствие этого U_0 уменьшается).

Начальное напряжение промежутка при выполнении в нем условия квазиоднородности не зависит от полярности электродов. То же самое имеет место в симметричных слабо- и резконеоднородных полях.

В случае, если электрическое поле в промежутке слабо- или резконеоднородно, а также несимметрично, то при положительной полярности электрода с меньшим радиусом кривизны начальное напряжение несколько больше, чем при его отрицательной полярности. Объяснить это можно, исходя из влияния полярности электрода на коэффициент вторичной ионизации γ .

Коэффициент вторичной ионизации γ при положительной полярности электрода определяется фотоионизацией в объеме газа, вызванной излучением лавины. В случае отрицательной полярности электрода γ определяется фотоионизацией как в объеме газа, так и на поверхности электрода. Следовательно, значение γ при отрицательной полярности будет больше, чем при положительной. Тогда из уравнения самостоятельности разряда следует, что число электронов в лавине, необходимое для выполнения условия самостоятельности разряда, при положительной полярности должно быть больше, чем при отрицательной. Число электронов в лавине возрастает с увеличением напряженности электрического поля у электрода, следовательно, при положительной полярности электрода напряженность у электрода и соответственно напряжение на промежутке должны быть больше, чем в случае отрицательной полярности. Например, при положительной полярности стержня промежутка стержень—плоскость начальное напряжение выше, чем при отрицательной полярности стержня.

По этой же причине начальное напряжение промежутка при переменном напряжении будет таким же, как и при отрицательной полярности постоянного напряжения.

Коронный разряд. В случае однородного и квази-однородного полей, для которых при выполнении условия самостоятельности разряда ионизация происходит по всей длине промежутка, начальное напряжение равно пробивному.

Если эффективная ионизация при начальном напряжении происходит только в части промежутка, то возникает коронный разряд. Однако если ионизация при этом охватывает большую часть промежутка, то коронный разряд неустойчив и самопроизвольно переходит в полный пробой промежутка. Электрические поля таких промежутков называются слабонеоднородными, и для них начальное напряжение совпадает с пробивным.

Если при выполнении условия самостоятельности разряда эффективная ионизация происходит в сравнительно узкой зоне у электрода, то коронный разряд будет устойчивым. Такие промежутки называются коронирующими или промежутками с резконеоднородным полем. В резконеоднородных полях начальное напряжение соответствует появлению коронного разряда, а пробивное напряжение может быть существенно выше начального.

Возникновение коронного разряда сопровождается появлением свечения газа у коронирующего электрода, что может быть использовано для определения момента возникновения коронного разряда при измерениях начальных напряжений.

Коронный разряд может иметь две основные формы — лавинную и стримерную. Лавинной называется такая форма разряда, при которой в промежутке развиваются только электронные лавины. При этом напряженность электрического поля зарядов каждой из лавин значительно меньше напряженности внешнего поля. Лавинная форма коронного разряда характерна для очень малых радиусов кривизны электродов ($\leq 1-2$ мм). При этой форме коронного разряда зона ионизации имеет более или менее однородную структуру, что приводит к выравниванию электрического поля в промежутке за счет образующегося объемного заряда.

Стримерной называется такая форма разряда, при которой в промежутке кроме электронных лавин развиваются стримерные каналы. Стримерная форма ко-

ронного разряда возникает в том случае, если поле зарядов лавины соизмеримо с полем, бывшим в промежутке до появления лавины. Электронная лавина при этом преобразуется в стример, представляющий собой плазменный канал, у головки которого происходит интенсивная ударная ионизация электронами, обеспечивающая прорастание стримера в глубь промежутка. Прекращение ионизации у головки стримерного канала при попадании его в область слабого поля приводит к остановке стримера и постепенному затуханию в нем процессов ионизации. Протекание тока по каналу стримера приводит к его разогреву. Если температура в канале стримера становится достаточной для термической ионизации газа, то его характеристики изменяются и он преобразуется в лидер.

Таким образом, при стримерной форме короны на коронирующий электрод оказываются как бы насаженными тоненькие проводники — каналы стримеров, на концах которых напряженность электрического поля может достигать очень больших значений.

Пробивные напряжения. Пробивным называется напряжение, при котором происходит полная потеря электрической прочности промежутка. Его значение зависит от длины промежутка, формы и размеров электродов, плотности и рода газов, полярности напряжения (при постоянном и импульсном напряжении) либо его частоты (при переменном напряжении). Пробой промежутков с однородным, квазиоднородным и слабонеоднородным полями происходит при начальном напряжении. Что касается промежутка с резконеоднородным полем, то его пробой происходит при напряжении, большем начального, т. е. при наличии развитой короны. Поэтому пробивное напряжение зависит от формы коронного разряда. Очевидно, что при лавинной короне, которая выравнивает электрическое поле в промежутке, пробивное напряжение должно быть существенно выше, чем при стримерной короне, при которой напряженность поля на концах стримеров всегда очень велика.

В данной лабораторной работе рассматривается влияние на пробивные напряжения длины промежутка, размеров электродов и полярности постоянного напряжения.

Классическим примером промежутка с несимметричным резконеоднородным полем является промежуток

стержень (острие)—плоскость. Пробивное напряжение промежутка стержень—плоскость при отрицательной полярности стержня значительно больше, чем при положительной его полярности. Объясняется это тем, что при отрицательном стержне затруднено формирование стримера, необходимого для пробоя промежутка.

На рис. 1.3 приведено распределение зарядов в зоне ионизации промежутка стержень—плоскость от единичной лавины и кривые изменения напряженности электрического поля $E(x)$ по длине промежутка при положительном (рис. 1.3, а) и отрицательном (рис. 1.3, б) стержнях. Здесь $E_1(x)$ — напряженность при начальном напряжении, $E_2(x)$ — при напряжении выше начального (без учета поля зарядов единичной лавины), $E_L(x)$ — от зарядов единичной лавины.

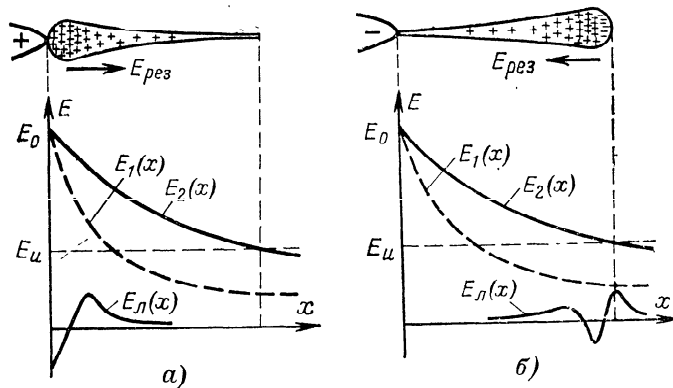


Рис. 1.3. Кривые изменения напряженности электрического поля по длине промежутка.

Из кривых рис. 1.3 видно, что при напряжении $U > U_0$ размеры зоны ионизации, т. е. зоны, в которой $\alpha_{эф} > 0$, возрастают, что вызывает увеличение числа электронов и ионов в лавинах, причем напряженность на границе зоны ионизации равна $E_{и} = b\delta$ (для воздуха $E_{и} = 24,5\delta$ кВ/см), что следует из выражения (1.7).

При пересечении лавиной зоны ионизации в промежутке образуется объемный заряд, который при положительном стержне имеет положительный знак (электроны уходят на стержень) и в основном расположен около стержня (рис. 1.3, а). При отрицательном стерж-

не объемный заряд лавины имеет как отрицательную, так и положительную зону и расположен около границы зоны ионизации (рис. 1.3, б).

При определенном значении напряжения условия формирования стримера у положительного стержня будут обеспечены, т. е. напряженность электрического поля от заряда лавины E_L и результирующая напряженность у головки лавины $E_{рез} \approx E_0 + E_L$ достаточны для возникновения стримера.

При том же напряжении, но при отрицательном стержне величина E_L будет примерно такой же, как и при положительном стержне, так как напряженности электрического поля в промежутках одинаковы и, следовательно, одинаково число электронов и ионов в лавинах. Однако результирующая напряженность $E_{рез} \approx E_{и} + E_L$ существенно меньше, чем при положительном стержне. Следовательно, при отрицательном стержне для формирования стримера, а значит, и для пробоя промежутка необходимо повышать напряжение.

Представленная на рис. 1.3 картина распределения напряженности электрического поля у стержня является весьма упрощенной, так как в электроотрицательных газах, к которым относится и воздух, ток короны имеет импульсную форму. В зоне ионизации при этом возникают серии лавин — лавинные импульсы. Картина поля вследствие этого оказывается более сложной, чем на рис. 1.3.

В отличие от промежутка стержень—плоскость у промежутка стержень—стержень внешнее электрическое поле симметрично (предполагается, что электроды одинаковы, а земля практически не влияет на поле в промежутке). Распределение этого поля таково, что у электродов его напряженность достигает максимума, а в середине промежутка имеет минимум. Кроме того, при одинаковых значениях приложенного напряжения и расстояния между электродами напряженность поля у электродов в промежутке стержень—стержень ниже, чем в промежутке стержень—плоскость. Это объясняется тем, что емкость, а следовательно, и заряд стержня больше у промежутка стержень—плоскость.

С первой особенностью распределения электрического поля в промежутке стержень—стержень связано то, что коронный разряд возникает у отрицательного стержня, а пробой промежутка связан с развитием стримера от положительного стержня.

Вторая особенность этого поля является причиной того, что при прочих равных условиях начальные напряжения для промежутка стержень—стержень несколько выше, чем для промежутка отрицательный стержень—плоскость. Соответственно разрядные напряжения для промежутка стержень—стержень выше, чем для промежутка положительный стержень—плоскость.

Влияние радиуса кривизны электрода и длины промежутка рассматривается на примере коаксиальной системы электродов (цилиндрического конденсатора). Если в цилиндрическом конденсаторе изменять радиус внутреннего цилиндра, сохраняя радиус наружного цилиндра постоянным, то можно последовательно получать промежутки с квазиоднородным, слабонеоднородным и резконеоднородным полем (коронирующие). Кроме того, в случае резконеоднородных полей путем изменения радиуса внутреннего цилиндра можно изменять форму коронного разряда, получая либо лавинную, либо стримерную корону.

Зависимость пробивного напряжения цилиндрического конденсатора от радиуса внутреннего цилиндра (кривая 2, рис. 1.2) может быть разделена на три области:

область III — промежутки искоронирующие (квазиоднородные и слабонеоднородные поля) и пробивное напряжение совпадает с начальным;

область II — промежутки коронирующие (резконеоднородные поля) и пробивное напряжение превышает начальное. Корона здесь имеет стримерный характер сразу после ее возникновения, следовательно, одно из условий пробоя промежутка — образование стримера — здесь уже выполнено. Вследствие этого значение пробивного напряжения близко к начальному. Снижение пробивного напряжения при уменьшении r_0 связано с уменьшением начального напряжения;

область I — так же, как и в области II, промежутки с резконеоднородным полем, но корона из-за малости r_0 при возникновении имеет лавинный характер. Для пробоя промежутка необходимо появление стримера, но с уменьшением радиуса внутреннего цилиндра напряжение появления стримера (переход короны из лавинной формы в стримерную) возрастает, что приводит к увеличению пробивного напряжения промежутка.

Объясняется это тем, что при уменьшении радиуса внутреннего цилиндра уменьшаются размеры зоны ионизации и увеличивается напряженность в ней. Вследствие этого напряженность электрического поля вблизи внутреннего цилиндра возрастает при увеличении напряжения тем меньше, чем меньше радиус этого цилиндра. И для достижения требуемой напряженности E_L зарядов лавины (см. кривые на рис. 1.3 и объяснение к ним), при которой лавина переходит в стример, требуется тем большее напряжение, чем меньше радиус внутреннего цилиндра.

Влияние диэлектрического барьера на пробивные напряжения промежутка с резконеоднородным полем. Барьером называется диэлектрик, который помещается между электродами перпендикулярно центральной силовой линии электрического поля (для промежутка стержень—плоскость, который и будет рассмотрен ниже, центральная силовая линия совпадает с осью симметрии электрического поля промежутка). Изменение пробивного напряжения промежутка при наличии барьера вызвано изменением картины поля в промежутке вследствие осаждения ионов на поверхность барьера.

Если в качестве барьера использовать изоляционный материал, пробивное напряжение которого соизмеримо с пробивным напряжением промежутка, то за счет электрической прочности барьера суммарная электрическая прочность промежутка повышается.

Пробивное напряжение промежутка при наличии барьера зависит от полярности электрода и расположения барьера в промежутке. Соответствующие зависимости для промежутка стержень—плоскость приведены на рис. 1.4 (пунктиром показаны пробивные напряжения при отсутствии барьера).

Если барьер расположен у стержня и касается его, то при малой толщине барьера (лист бумаги) он прак-

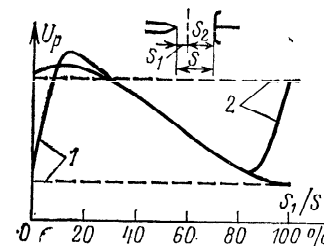


Рис. 1.4. Зависимости пробивного напряжения от положения барьера для промежутка стержень—плоскость с барьером.

1 — положительный стержень; 2 — отрицательный стержень.

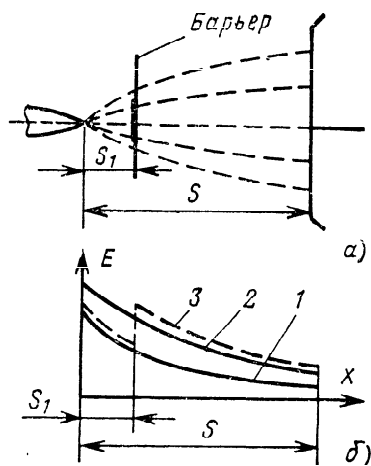


Рис. 1.5. Промежуток стержень — плоскость с барьером.

a — картина электрического поля при отсутствии заряда на барьере; *б* — изменение напряженности электрического поля в промежутке при $U < U_0$ (1), при $U > U_0$ и отсутствии заряда на барьере (2), то же, но при наличии заряда на барьере (3).

тически не влияет на электрическую прочность промежутка. Если диэлектрический барьер расположен у стержня вне зоны ионизации, то он не влияет на начальное напряжение промежутка. Коронный разряд, который возникает у стержня, приводит к появлению в промежутке между стержнем и барьером объемного заряда (электронов и положительных ионов), причем заряды, имеющие знак, противоположный знаку стержня, движутся к нему и нейтрализуются на нем, а заряды того же знака движутся к барьеру и осаждаются на его поверхности (рис. 1.5, *a*).

Заряды, осевшие на барьере, снижают напряженность электрического поля у стержня, и если напряжение на промежутке не увеличивается, то коронный разряд прекращается. При увеличении напряжения у стержня вновь возникает коронный разряд и процесс повторяется.

Одновременно с уменьшением напряженности поля между стержнем и барьером заряд, осевший на барьере, увеличивает напряженность между барьером и плоскостью (рис. 1.5, *б*). Чем большее напряжение приложено к промежутку стержень—плоскость, тем больший заряд осаждается на барьере и тем выше напряженность между барьером и плоскостью. Так как напряженность между стержнем и барьером при этом практически не изменяется, то пробой всего промежутка начинается с пробоя промежутка барьер—плоскость. Вследствие того что силовые линии поля расходятся с удалением от стержня и вследствие диффузии объемного заряда во время его движения к барьеру, пло-

щадь поверхности барьера, на которую осаждается заряд, будет тем больше, чем дальше от стержня находится барьер. Поэтому поле между барьером и плоскостью становится более однородным, чем поле исходного промежутка стержень—плоскость. Оно будет тем однороднее, чем дальше от стержня будет находиться барьер. Это должно приводить к увеличению пробивной напряженности промежутка барьер—плоскость по сравнению с исходным промежутком стержень—плоскость, причем к тем большему увеличению, чем дальше от стержня расположен барьер. Однако, чем дальше от стержня расположен барьер, тем меньше длина промежутка барьер—плоскость и тем ниже его пробивное напряжение, а следовательно, и пробивное напряжение всего промежутка. Вследствие одновременного действия двух рассмотренных выше факторов пробивное напряжение промежутка стержень—плоскость при перемещении барьера от стержня к плоскости вначале возрастает (преобладает фактор увеличения однородности поля), а затем уменьшается (из-за уменьшения расстояния между барьером и плоскостью).

Если барьер расположен близко от плоскости, то пробивное напряжение определяется уже не прочностью промежутка барьер—плоскость, а прочностью промежутка стержень—барьер, поэтому по мере приближения барьера к плоскости его влияние постепенно уменьшается.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная электрическая схема установки представлена на рис. 1.6. Высокое напряжение промышленной частоты получается от трансформатора *Tr* типа ТВО-140/50 с номинальным коэффициентом трансформации 525. Напряжение его питания регулируется автотрансформатором *АTr* и измеряется вольтметром *V*. Для получения выпрямленного высокого напряжения служит диод *D*. Резистор *R* служит для защиты трансформатора и диода от токовых перегрузок, возникающих при пробое испытуемого объекта *Об* или измерительного шарового разрядника *ИР*, а также для успокоения колебаний, возникающих при разряде.

Для проведения опытов на переменном напряжении между точками 1 и 2 схемы должна быть установлена

перемычка, шунтирующая диод. При проведении опытов на выпрямленном напряжении необходимо снять перемычку между точками 1 и 2.

Выключателем B_1 полностью снимается напряжение с испытательной установки. Выключатель (автоматический) B_2 предназначен для дистанционного отключения и включения высоковольтного трансформатора Tr , а рубильник P — для создания видимого разрыва в цепи его питания.

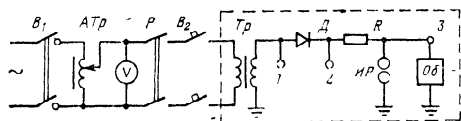


Рис. 1.6. Принципиальная схема установки.

Объекты испытаний (электроды различной формы) укрепляются на изолирующей конструкции. Изменение и измерение расстояния между электродами могут производиться дистанционно.

Высоковольтная часть установки (обведено пунктиром на схеме рис. 1.6) расположена на испытательном поле, которое оборудовано устройством для заземления выводов высокого напряжения установки. Двери ограждения испытательного поля снабжены блокировкой, контакты которой включены в цепи управления выключателем B_2 . Предусмотрена возможность затемнения испытательного поля.

ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ

1. Построить на одном графике примерный ход зависимостей пробивных и начальных напряжений от длины промежутков плоскость—плоскость (однородное поле), стержень—плоскость и стержень—стержень при обоих полярностях выпрямленного напряжения. Дать объяснение.

2. Построить примерный ход зависимостей начального и пробивного напряжения от радиуса внутреннего цилиндра в коаксиальной системе электродов при постоянном расстоянии между ними. Дать объяснение.

3. Рассчитать и построить зависимость начального напряжения U_0 при промышленной частоте от отношения радиусов внутреннего и внешнего коаксиальных цилиндрических электродов. Расчет провести для радиуса наружного цилиндра $R=7,5$ см при изменении радиуса внутреннего цилиндра r_0 от 1 мм до R .

ЗАДАНИЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ

1. Перед началом работы ознакомиться со схемой установки, расположением ее элементов, порядком проведения переключений, необходимых для выполнения всех пунктов задания на измерения, а также с правилами безопасности при работе на установке.

2. Определить градуировочную кривую для установки, т. е. зависимости напряжения на выходе схемы (в точке 3) от напряжения на первичной стороне трансформатора Tr при выпрямленном напряжении. С этой целью собрать схему выпрямления и включить на выход этой схемы измерительный шаровой разрядник. Установив различные расстояния между шарами (1, 2 и 3 см), каждый раз поднимать напряжение до пробоя разрядника. Непосредственно перед пробоем измерять напряжение на первичной стороне трансформатора с помощью вольтметра V . Повторить измерения на переменном напряжении.

Разрядное напряжение измерительного разрядника определяется по градуировочной кривой или таблицам (см. приложение 4). При этом поправку на относительную плотность воздуха вводить не следует. Тогда при пользовании градуировочными кривыми получим напряжения, приведенные к нормальным атмосферным условиям.

Примечание. Поскольку емкость определяется в данной установке в значительной мере емкостью соединительных проводов, градуировочные кривые измеряются при отключенных объектах испытания.

3. На выпрямленном напряжении измерить зависимость начального U_0 и пробивного U_p напряжений от расстояния между электродами S для промежутков стержень—стержень и стержень—плоскость при изменении S от 1 до 4 см. Для промежутка стержень—плоскость

скость опыты проводятся при различных полярностях электродов. По результатам опытов построить зависимость $U_0=f(S)$, $U_p=f(S)$ и $E_{ср}=U_p/S=f(S)$ для указанных промежутков, а также для промежутков шар—шар (по данным п. 2).

4. Установить электроды стержень—плоскость на расстоянии 3,5 см друг от друга и, укрепив между ними бумажный барьер, измерить зависимость пробивного напряжения от расстояния между стержнем и барьером, располагая барьер от стержня на расстоянии 0,5; 1,0; 1,5 см и т. д. Опыт произвести на выпрямленном напряжении при различных полярностях стержня.

По результатам опытов построить зависимости пробивного напряжения от расстояния между стержнем и барьером, отметив на них пробивные напряжения при отсутствии барьера (по данным п. 3).

5. Для цилиндрического конденсатора измерить зависимость начального и пробивного напряжений от радиуса внутреннего цилиндра при переменном напряжении.

По полученным данным построить на одном графике зависимости $U_0=f(r_0/R)$ и $U_p=f(r_0/R)$, где r_0 — радиус внутреннего, а R — радиус наружного цилиндра ($R=7,5$ см).

Нанести на этот же график расчетную зависимость $U_0=f(r_0/R)$.

Сравнить опытные и расчетные зависимости $U_0=f(r_0/R)$ и объяснить причины их расхождения.

Примечание. Отсчет начального напряжения можно проводить при появлении свечения у электрода с большой кривизной.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой разряд называется самостоятельным?
2. Что такое начальное напряжение?
3. Что такое лавина?
4. Что такое стример?
5. Какое электрическое поле называют квазиоднородным, слабоеднородным, резкоеднородным?
6. При какой полярности стержня промежутка стержень — плоскость U_0 больше? Почему?
7. При какой полярности стержня промежутка стержень — плоскость U_p выше? Почему?
8. Какой из перечисленных ниже промежутков имеет наименьшую электрическую прочность: положительный стержень — плоскость, отрицательный стержень — плоскость, стержень — стержень, положительный шар — плоскость?

9. При каком положении диэлектрического барьера пробивное напряжение промежутка стержень — плоскость наибольшее?

Глава 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ЭЛЕГАЗЕ И ВОЗДУХЕ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Работа посвящена изучению зависимости начальных и пробивных напряжений в элегазе, воздухе и их смеси при давлениях от нормального атмосферного и выше в промежутке шар—плоскость при переменном напряжении промышленной частоты.

Применение сжатых элегаза (SF_6) и воздуха вызвано необходимостью уменьшения размеров распределительных устройств и повышения дугогасящей способности выключателей. Так, при применении малогабаритных комплектных распределительных устройств экономия места достигает 80—90%. Кроме того, расположение токоведущих частей в заземленном металлическом корпусе обеспечивает высокую надежность и безопасность эксплуатации.

Электрическая прочность элегаза в 2—3 раза больше, чем воздуха, поэтому использование его в качестве изолирующей среды является весьма перспективным. Однако элегаз, применяемый в различных изоляционных устройствах (технический элегаз), всегда содержит примеси других газов, снижающие его электрическую прочность. Поэтому необходимо знать зависимость электрической прочности технического элегаза от количества содержащихся в нем других газов (например, воздуха).

Начальное напряжение. Зависимость начального напряжения от размеров промежутка и плотности газа может быть получена из условия самостоятельности разряда (1.4), причем при давлениях порядка атмосферного и выше зависимость $\alpha_{эф}/\delta$ от E/δ может быть аппроксимирована уравнением

$$\frac{\alpha_{эф}}{\delta} = \frac{\alpha - \eta}{\delta} = a \left(\frac{E}{\delta} - b \right)^k, \quad (2.1)$$