

Исследование электрической прочности разрядных промежутков на постоянном и переменном напряжении

Цель работы: изучение влияния полярности и рода напряжения на электрическую прочность воздушного промежутка в системе электродов острие-острие, острие-плоскость.

1. Краткие сведения

Атмосферный воздух является самым распространенным диэлектрическим “материалом” для создания внешней изоляции энергетического оборудования и электрических аппаратов. Изолируемые электроды располагаются на определенных расстояниях друг от друга и от земли и укрепляются в заданном положении с помощью изоляторов. Разрядное напряжение воздушного промежутка зависит от конфигурации электрического поля между электродами и давления, температуры и влажности воздуха. В связи с этим знание процессов, сопровождающих нарушение электрической прочности воздуха, является весьма важным.

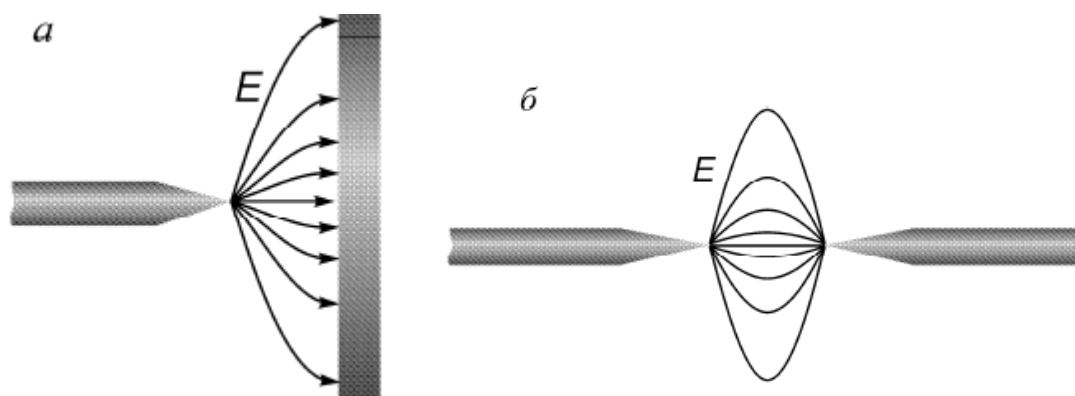


Рисунок 1 – Различные конфигурации электрического поля (резконеоднородное поле)

Электрические поля разделяют на однородные, слабонеоднородные и резконеоднородные (рисунок 1). В однородном поле его напряженность постоянна вдоль силовых линий. Слабонеоднородным можно назвать поле, в котором напряженность изменяется вдоль силовых линий не более чем в 2–3 раза. При больших значениях изменения напряженности электрического поля имеем резконеоднородное поле. Степень неоднородности электрического

поля между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности K_H , который равен отношению максимальной напряженности E_{\max} к средней напряженности $E_{\text{ср}}$ поля между электродами:

$$K_H = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ср}}}. \quad (1)$$

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

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{S}. \quad (2)$$

Максимальная напряженность зависит от формы, размеров электродов, способа их подключения и расстояния между ними.

При нормальных атмосферных условиях электрическая прочность воздушных промежутков невелика и в однородном поле не превышает 30 кВ/см. Электрическое поле реальных изоляционных конструкций в большинстве случаев является неоднородным, и электрическая прочность воздушных промежутков значительно уменьшается. Это связано с особенностями развития разряда в неоднородных полях.

При приложении к воздушному промежутку высокого напряжения происходит эмиссия электронов из катода, их ускорение в электрическом поле и ионизация атомов и молекул воздуха, что приводит к появлению большого количества носителей зарядов в лавинах, которые преобразуются в стримеры. В результате этого при некоторой величине приложенного напряжения в воздухе формируется плазменный искровой канал, который переключает промежуток. Минимальное напряжение, при котором происходит полная потеря диэлектриком изолирующих свойств называется разрядным напряжением (U_p).

В неоднородных и резконеоднородных полях ионизация начинается только в части промежутка с наибольшей напряженностью поля. Возникший в этих областях самостоятельный разряд называется коронным разрядом, а начальное напряжение – напряжением зажигания коронного разряда. В слабонеоднородных полях ($K_H \leq 3$) коронный разряд неустойчив и быстро переходит в полный пробой промежутка. В таких полях напряжение зажигания коронного разряда близко или совпадает с U_p .

В резконеоднородных полях ($K_H > 3$) ионизация и коронный разряд занимают незначительную часть промежутка вблизи электрода с меньшим радиусом, коронный разряд является устойчивым, и разрядное напряжение может быть существенно выше коронного. Возникновение стримерного коронного разряда сопровождается свечением области ионизации, потрескиванием и появлением запаха озона. Коронный разряд может иметь две формы – лавинную и стримерную. Лавинной называется такая форма

разряда, при которой в промежутке развиваются лавины электронов. При этом напряженность поля зарядов каждой из лавин значительно меньше напряженности внешнего поля. Зона ионизации при большом числе лавин имеет более или менее однородную структуру, что приводит к выравниванию электрического поля в промежутке за счет образующегося объемного заряда, знак которого совпадает со знаком "острого" электрода.

При более интенсивной, стримерной форме разряда, кроме лавин электронов в промежутке развиваются стримерные каналы. Если поле зарядов лавины становится соизмеримым с внешним электрическим полем в промежутке, то лавины электронов преобразуются в стример. У головки стримера происходит интенсивная ионизация, обеспечивающая прорастание стримера вглубь промежутка. Коронный разряд, распространяющийся только в части промежутка между электродами, еще не означает потерю электрической прочности, но приводит к значительным потерям энергии, коррозии провода, арматуры и изоляции, вызывает появление шума и радиопомех. Поэтому при работе высоковольтных установок интенсивность коронного разряда необходимо снижать.

Заметное влияние на величину разрядных напряжений при несимметричных электродах оказывает полярность воздействующего напряжения.

Рассмотрим промежуток «стержень-плоскость» («С-П»), являющийся характерным примером резконеоднородного поля. Предварительная ионизация в этом промежутке будет развиваться в области наиболее сильного поля, т.е. у стержня, а искажения поля, создаваемые при этом объемными зарядами, будут различными при положительной и отрицательной полярности стержня.

При положительной полярности стержня возникающий в промежутке электрон, двигаясь к стержню и попадая в область сильного поля, производит ударную ионизацию и образует лавину электронов (рисунок 2, а).

Если напряжение между электродами возрастает медленно, то еще до образования короны (до выполнения условия самостоятельности разряда) в промежутке может образоваться достаточно большое число лавин. Когда каждая из этих лавин доходит до стержня, электроны лавин уходят на электрод, а положительные ионы остаются в пространстве, медленно перемещаясь к противоположному электроду. Таким образом, вблизи стержня создается положительный объемный заряд (рисунок 2, б). Положительный объемный заряд уменьшает поле вблизи стержня и

несколько усиливает его во внешнем пространстве (рисунок 2, в).

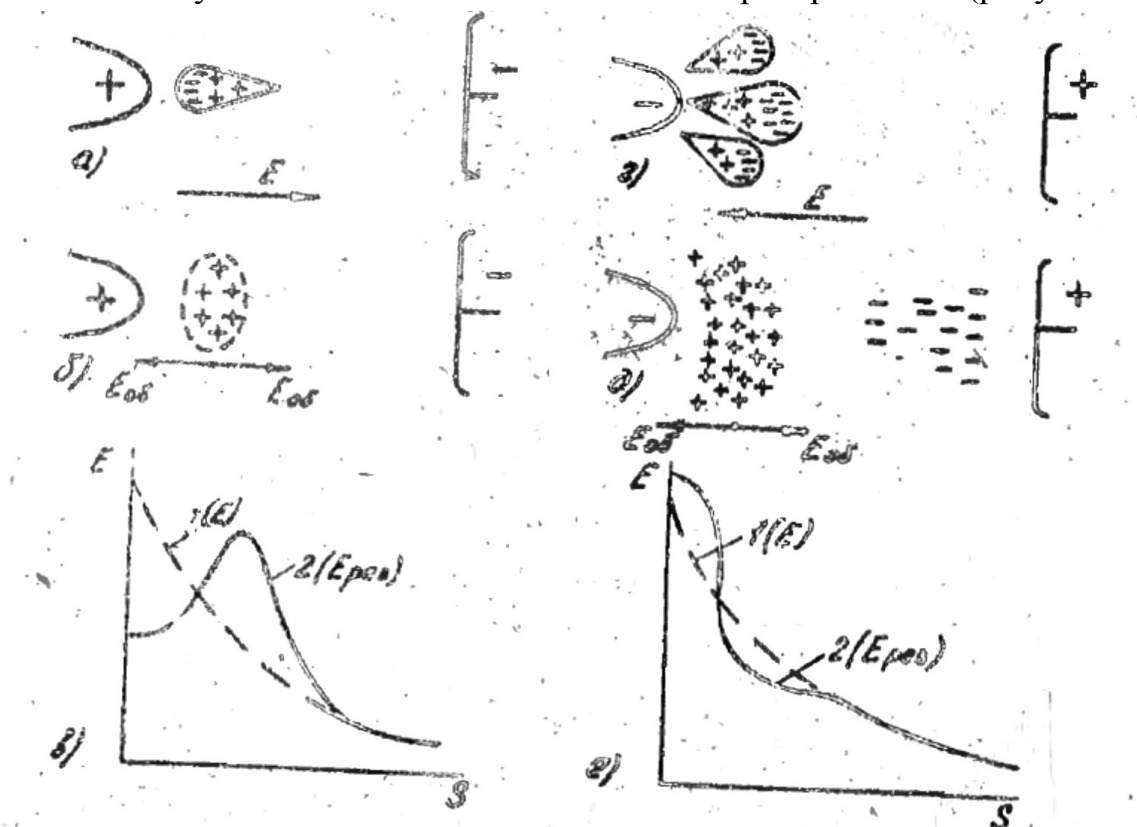


Рисунок 2 – Искажение поля в промежутке «стержень-плоскость» в стадии несамостоятельного разряда при различной полярности стержня: E – напряженность внешнего поля, $E_{об}$ – напряженность положительного объемного заряда, $E_{рез}$ – результирующая напряженность в промежутке после ионизации.

Дальнейшая ионизация вблизи стержня ослабляется, что затрудняет выполнение условия самостоятельности разряда, т.е. образование короны. Если напряжение между электродами достаточно велико, то возникает лавина справа от объемного заряда (рисунок 3,а), электроны которой смешиваясь с положительными ионами объемного заряда, создают зародыш канала **анодного стримера**, заполненного плазмой (рисунок 3, б). В промежутке возникает самостоятельный разряд в виде короны. На головке стримера будет располагаться некоторый избыточный положительный разряд, который частично компенсирует поле в канале самого стримера и создает повышенную напряженность во внешней области (Рисунок 3, г). Наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин (рисунок 3, в), электроны которых втягиваются в канал стримера, постепенно удлиняя его, а ионы создают положительный объемный заряд, приводящий к дальнейшему искажению поля перед головкой стримера (рисунок 3, г, кривая 3).

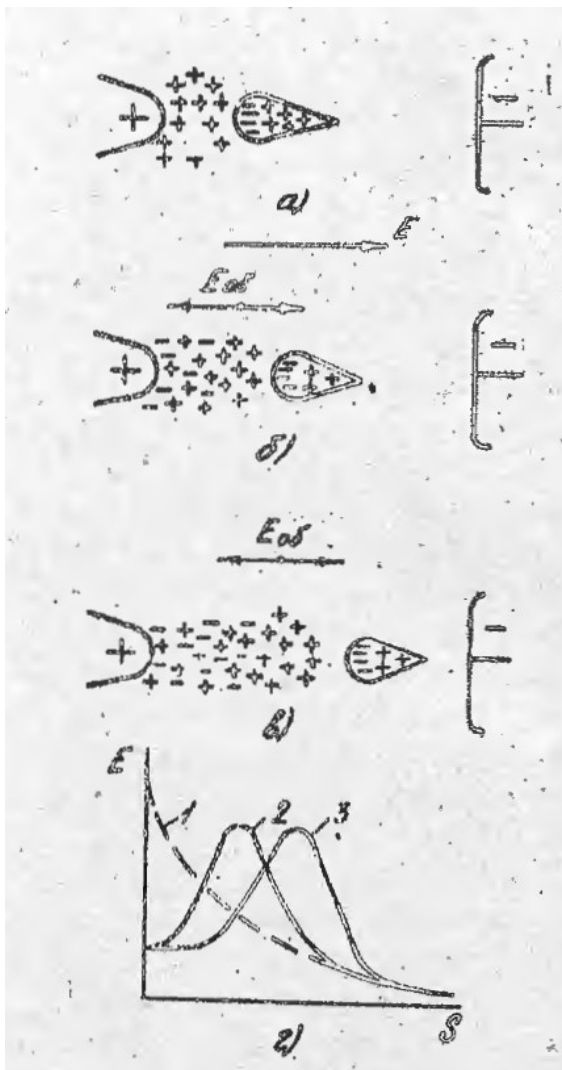


Рисунок 3 – Образование анодного стримера в промежутке положительный стержень – плоскость: 1 – начальное распределение поля; 2,3 – результирующее поле в промежутке

При отрицательной полярности стержня электроны, появившиеся вследствие эмиссии из катода, сразу попадают в сильное электрическое поле и производят ударную ионизацию с образованием большого числа лавин (рисунок 2, г), которые двигаются к плоскости. По мере продвижения к аноду электроны попадают в область слабого поля, скорость перемещения их замедляется и ионизация прекращается. Часть электронов достигает анода и там нейтрализуется, а другая часть захватывается нейтральными молекулами кислорода с образованием малоподвижных отрицательных ионов, которые образуют рассеянный отрицательный объемный заряд невысокой плотности, с действием которого можно не считаться. Из-за малой скорости дрейфа положительных

ионов на катод вблизи стержня формируется компактный положительный объемный заряд (рисунок 2, б). Взаимодействуя с внешним полем, он увеличивает напряженность непосредственно у стержня и уменьшает во внешнем пространстве (рисунок 2, е, кривая 2). Усиление поля вблизи стержня

способствует возрастанию эмиссии электронов из катода с последующим усилением ионизационных процессов в окрестности стержня, что облегчает выполнения условия самостоятельности разряда. Следовательно, напряжение зажигания короны в промежутке «С-П» при отрицательной полярности стержня должно быть меньше, чем при положительной полярности, что полностью подтверждается экспериментальными данными.

При дальнейшем увеличении напряжения на промежутке интенсивная ионизация продолжает концентрироваться в узкой зоне (доли миллиметра)

между стержнем и положительным объемным зарядом. Вследствие большого числа одновременно развивающихся лавин не создаются условия для образования узкого плазменного канала, а возникает более или менее однородный размытый плазменный слой с радиусом кривизны большим, чем у острия (рисунок 4, а). При этом с одной стороны происходит некоторое выравнивание поля, с другой – наблюдается уменьшение напряженности поля в зоне плазменного слоя (рисунок 4, г, кривая 2).

Постепенно плазменный слой увеличивается в объеме и вытягивается в сторону противоположного электрода. Напряженность поля на внешней поверхности плазменного слоя растет, и при дальнейшем возрастании напряжения возникают лавины электронов справа от этого слоя (рисунок 4, б). Большое число возникших лавин и последующее их слияние приводит к удлинению плазменного слоя по направлению к аноду и превращению его в стример. Однако, так же как и в начале процесса, из-за большого числа лавин головка стримера оказывается размытой (рисунок 4, в), и возрастание напряженности на головке стримера оказывается гораздо меньшим, чем при положительном стержне (рисунок 4, г, кривая 3). Наличие компактного отрицательного объемного заряда на головке стримера также снижает напряженность поля вблизи плазменного канала. Стадия толчкообразного удлинения канала (рисунок 4, б) прекращается, и наступает пауза в развитии стримера (рисунок 4, в) вследствие затухания процессов ионизации. С течением времени как из-за роста напряжения, так и вследствие дрейфа отрицательного объемного заряда в область слабого поля (к аноду) напряженность поля вблизи плазменного канала возрастает, и процесс удлинения стримера повторяется, т.е. в цепи наблюдаются импульсы тока.

Таким образом, развитие стримера при отрицательном острие происходит с большими трудностями, поэтому и разрядное напряжение при отрицательном острие значительно выше, чем при положительном (в 2-2,5 раза).

Величина разрядного напряжения зависит от длины промежутка, размеров и формы электродов, способа их подключения, плотности и вида газа, полярности и времени воздействия напряжения.

В реальных условиях изоляционные конструкции имеют самые разнообразные конфигурации и размеры, а, следовательно, и различные электрические поля. Поэтому исследование электрической прочности разрядных промежутков для различных форм электродов представляет большой практический интерес. Для точности сопоставления результатов измерений, проведенных при различных условиях внешней среды (давление,

температура и влажность), U_p корректируют, приводя к нормальным условиям.

2. Порядок работы

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки. Собрать схему на переменном напряжении.

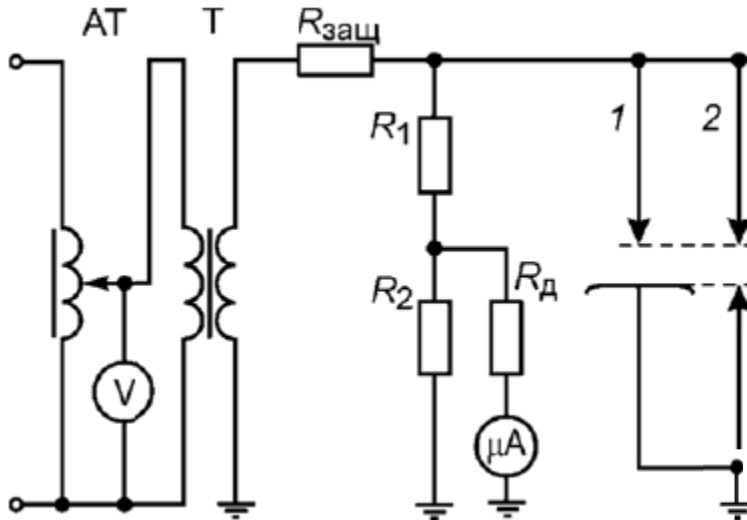


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки, АТ – автотрансформатор, Т – высоковольтный трансформатор, $R_{зашщ}$ - защитное сопротивление, R_1 и R_2 - высоковольтный омический делитель, $R_д$ – добавочное сопротивление, V – вольтметр, μA – микроамперметр, 1-2 – испытуемые электроды.

2. Установить в держателях электроды острие – плоскость.
3. При плавном повышении напряжения для различных расстояний S между электродами (10, 8, 6, 4, 2 см) зафиксировать пробивное напряжение U_p . Для каждого расстояния провести три измерения, результаты занести в таблицу 1. Рассчитать средние значения разрядного напряжения U_{cp} для каждого расстояния S.
4. Провести измерения по п.2-3 для электродов острие-острие.

Форма электродов	S, см	U_p , кВ			$U_{p\text{ ср}}$, кВ
		1	2	3	
Острие-плоскость					
Острие-острие					

5. Собрать схему на постоянном напряжении.

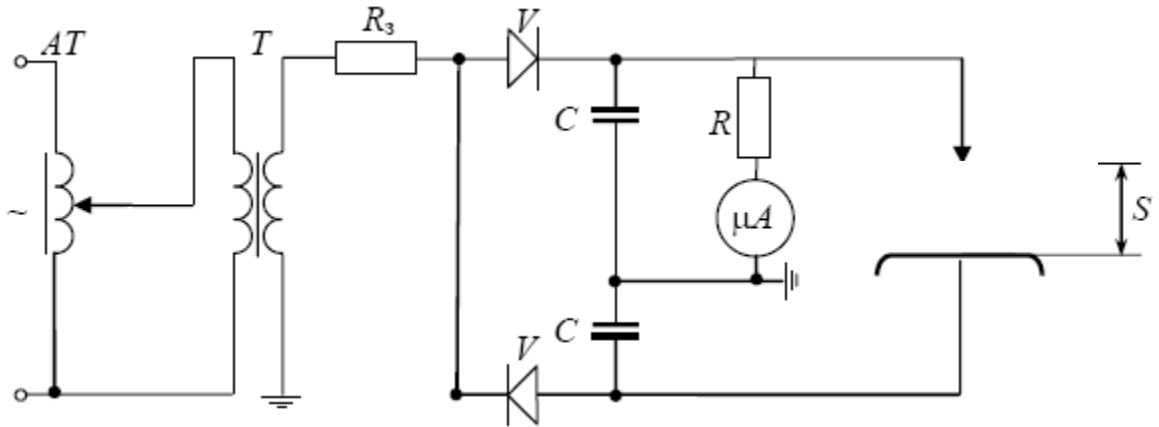


Рисунок 6 – Электрическая схема установки: V – выпрямитель.

6. Установить в держателях электроды острие – плоскость.
7. Для пяти значений межэлектродного расстояния определить величину разрядного напряжения для каждой полярности электродов. Опыты повторить по 3 раза на каждое расстояние. Данные занести в таблицу 2.
8. Провести измерения по п.6-7 для электродов острие-острие.

Форма электродов	S, см	U _p , кВ			U _p ср., кВ
		1	2	3	
Положительное острие – плоскость					
Отрицательное острие – плоскость					
Острие-острие					

3. Содержание отчета

1. По опытным данным построить на одном графике зависимости $U_p=f(S)$ для разных систем электродов на переменном напряжении.
2. Построить на графике зависимость $U_p=f(S)$ при положительном и отрицательном острие при постоянном напряжении.
3. Построить на графике зависимость $U_p=f(S)$ для электродной системы острие-острие при постоянном напряжении.
4. Объяснить полученные зависимости для различных систем электродов, рода напряжения и полярности напряжения.
5. Ответить на контрольные вопросы.

4. Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит разрядное напряжение промежутка?
2. Как можно увеличить разрядные напряжения изоляционных промежутков?
3. В каких электродных системах полярность электродов влияет на величину разрядного напряжения?
4. Чем отличаются процессы в разрядном промежутке на переменном и постоянном напряжении?