Федеральное агентство по образованию

Южно-Уральский государственный университет

Филиал в г. Миассе

ЭТФ

**Лабораторная работа №4**

**Предмет: «Перенапряжения в системах электроснабжения»**

**Тема: «Исследование распределения напряжения по гирлянде изоляторов»**

Выполнили: студенты 546 гр.

Проверил: Пястолов В.В.

2008

**Содержание**

Предварительные сведения 3

Описание установки 10

Измерения с помощью шаровых разрядников 12

Вывод 14

**Предварительные сведения**

На изоляцию электротехнических установок иногда воздействуют импульсы напряжения, возникающие в результате разряда молнии. Напряжение при этом действует кратковременно, и так как пробой изоляции не может происходить мгновенно, её импульсная прочность отличается от прочности при длительном приложении напряжения. Чем больше амплитуда импульсного напряжения, тем меньше время для формирования самостоятельного разряда. Пробой может произойти и на фронте импульса, и на его амплитуде, и после прохождения напряжением амплитудного значения. Поэтому при воздействии импульса в качестве разрядного напряжения принято считать наибольшее напряжение, которое было на изоляции до момента ее пробоя.

При длительном воздействии напряжения условию возникновения самостоятельного разряда соответствует начальное напряжение U0. Для промежутков с однородным электрическим полем величина U0 совпадает с минимальным разрядным напряжением. В промежутках с резконеоднородным полем начальное напряжение соответствует появлению короны и может быть значительно меньше разрядного (т.е при котором наблюдается полный пробой промежутка). Следует обратить внимание на то, что как в случае однородного, так и резконеоднородного электрических полей при кратковременном воздействии на изоляцию напряжения импульсной формы с амплитудой Um, значительно большей U0, разряд не обязательно произойдёт.

Рассмотрим основные этапы развития разряда при воздействии на воздушный промежуток короткого импульса (до 100 мкс) с крутым фронтом (рисунок 1), близкого по форме к импульсу атмосферного перенапряжения.



Рисунок 1. Составляющие времени разряда при воздействии короткого импульса

До тех пор, пока напряжение на изоляции не достигнет величины U0, пробой произойти не может. Требуемое для этого время tх обычно называют холостым временем. Оно будет уменьшаться с увеличением скорости нарастания напряжения на фронте импульса и с уменьшением значения U0. Последнее, как известно, зависит от степени неоднородности электрического поля в промежутке, давления и температуры воздуха и других факторов.

Для начала формирования разряда необходим хотя бы один эффективный электрон, т.е. электрон, способный создать лавину. Время, затрачиваемое на появление такого электрона, называется статистическим временем запаздывания tс. Само название указывает на случайный характер этого параметра, зависящего от большого количества факторов, и способного меняться в достаточно широких пределах. Увеличение амплитуды прикладываемого напряжения вызывает усиление электрического поля в межэлектродном промежутке. Поэтому свободные электроны быстрей приобретают энергию ионизации. В результате повышается вероятность появления эффективного электрона и уменьшается время tс.

Следующий интервал времени называется время формирования разряда tф. Оно необходимо для образования лавины, стримера, главного разряда (а в длинных воздушных промежутках и лидера) и также имеет значительный статистический разброс. Кроме указываемых ранее факторов время формирования зависит от случайного расположения свободных электронов и лавин, случайного характера траектории разряда. Увеличение воздействующего напряжения, а значит и напряжённости электрического поля в промежутке, способствует развитию ионизационных процессов и сокращению времени формирования разряда. Однако это влияние проявляется в разной степени в промежутках с однородным и резконеоднородным электрическими полями.

Сумму статистического времени запаздывания и времени формирования разряда принято называть временем запаздывания tз = (tс + tф).

Итак, полное время разряда в промежутке tр складывается из времени нарастания приложенного напряжения до начального для данного промежутка – холостого времени tх, статистического времени запаздывания tс и времени формирования разряда tф. При этом время разряда, подобно его составляющим, является величиной случайной, зависящей от многих факторов и имеющей существенный статистический разброс. Пробой промежутка будет происходить в том случае, если его время разряда при воздействии импульса напряжения с определенной амплитудой окажется не меньше длины импульса. При этом будет наблюдаться срез импульса в малой окрестности времени tр (см. рисунок 1). В противном случае разряд в промежутке не произойдёт.

Время запаздывания разряда зависит не только от амплитуды воздействующего импульса, но и от его формы. Так, увеличение скорости нарастания напряжения на фронте при неизменной амплитуде (т. е. увеличение крутизны фронта импульса), очевидно, вызовет уменьшение времён tх и tс, а значит и всего времени разряда. При уменьшении длины импульса разряд может не успеть сформироваться, и пробоя промежутка не будет. Поэтому, с целью унификации испытаний и возможности последующего сопоставления их результатов, импульсную прочность изоляции определяют приложением к ней стандартного грозового импульса, близкого по форме к среднестатистическому импульсу атмосферного перенапряжения. Международная электротехническая комиссия (МЭК) рекомендует в качестве стандартного апериодический импульс напряжения с длиной фронта τф, равной 1,2 мкс ± 30%, и длиной волны τи, равной 50 мкс ± 20% (рисунок 2). Обозначают его как импульс 1,2/50. Кроме стандартного грозового импульса для определения импульсной прочности изоляции используют и срезанный импульс длиной 2…3 мкс (стандартный импульс, срезанный в окрестности амплитуды). При этом за длительность фронта импульсного напряжения принимают время нарастания напряжения до амплитудного значения при показанной на рисунке 2 аппроксимации фронта, а за длительность импульса – время от его начала до момента, когда напряжение снижается до половины от амплитудного значения.



Рисунок 2. Стандартный грозовой импульс и его параметры

Наиболее полную информацию об импульсной прочности изоляционных промежутков дают их вольт-секундные характеристики, получаемые путем многократного приложения к ним стандартного грозового импульса напряжения. Вольт-секундная характеристика (ВСХ) изоляционного промежутка – это зависимость среднего времени разряда от амплитуды приложенного к промежутку напряжения. Поскольку ВСХ обычно строят в координатах t – u, то часто её называют зависимостью разрядного напряжения от времени действия импульса. Следует заметить, что такое определение ВСХ соответствует её графическому изображению, но не совсем точно отражает её суть.

Методика построения вольт-секундной характеристики по результатам испытаний с помощью осциллографа показана на рисунке 3. Здесь приведена серия совмещённых осциллограмм напряжения на исследуемом промежутке, полученных при различных амплитудах воздействующего импульса, но неизменных величинах τф и τи, соответствующих стандартному импульсу.

При воздействии импульсов с относительно небольшой амплитудой разряды происходят на хвосте волны. При этом координаты точек ВСХ определяются амплитудой приложенного импульса и временем разряда (см. рисунок 3, точки 1, 2, 3). Максимальное время разряда соответствует минимальной амплитуде импульса, ещё достаточной для разряда в промежутке, которая и принимается равной минимальному разрядному напряжению Upmin. С увеличением амплитуды импульса время разряда уменьшается. При разрядах на фронте волны точки ВСХ строятся по величине напряжения, достигнутого к моменту разряда (см. рисунок 3, точка 4).



Рисунок 3. Построение вольт-секундной характеристики изоляции

Необходимо ещё раз отметить, что использование стандартной испытательной волны позволяет сравнивать импульсные прочности различных изоляционных конструкций, испытанных на разных установках, путем сопоставления их ВСХ.

Приведенная выше методика не учитывает чрезвычайно важного обстоятельства, связанного со статистическим характером процессов в разряде. При многократной подаче на объект даже строго нормированных по величине и форме импульсов напряжения время разряда не будет одинаковым. Это связано с тем, что составляющие времени разряда носят статистический характер, поскольку соответствующие явления обусловлены множеством действующих причин. Таким образом по результатам испытаний изоляционного промежутка получается область точек (полоса), которую можно окаймить верхней и нижней огибающими. С целью упрощения вольт-секундной характеристикой исследуемого изоляционного промежутка можно считать среднюю линию данной области.

Известно, что для каждого значения tp разрядное напряжение подчиняется нормальному закону распределения. Средняя линия на рисунке 3 соответствует средним значениям разрядного напряжения (математическому ожиданию величины разрядного напряжения Up) для каждого tp. Отклонения от среднего, как известно, оцениваются величиной среднеквадратичного отклонения σU.

Если огибающие вольт-секундной характеристики проводить на расстоянии ±2σU, то при каждом tp вероятность попадания Up в зону между огибающими составляет 97,7%. Проведение огибающих на расстояние ±3σU от средней линии повышает вероятность попадания до 99,9%. Для длинных воздушных промежутков с резко неоднородным полем значение σU оценивается в 2,5…3% от среднего значения напряжения. В коротких промежутках с однородным полем значение σU резко снижается, особенно при облучении промежутка. Поэтому ширина зоны (области), занятой ВСХ промежутка, тем уже, чем однороднее его электрическое поле.

Вид вольт-секундной характеристики изоляционного промежутка определяется характером электрического поля в нём (рисунок 4). Различие связано с тем, что в промежутках с однородным и резконеоднородным полями составляющие полного времени разряда имеют разное долевое участие.



Рисунок 4. Вольт-секундные характеристики промежутков с однородным и резконеоднородным электрическими полями

В случае однородного поля напряженность во всех точках промежутка практически одинакова, а значит условие появления самостоятельного разряда (E0 ≥ 25…30 кВ/см) выполняется в них одновременно. Поэтому при появлении эффективного электрона разряд формируется в условиях сильного поля очень быстро, т.е. время формирования разряда tф незначительно, и им можно пренебречь по сравнению с другими составляющими. Следовательно, время разряда в промежутке с однородным электрический полем практически определяется лишь холостым временем и временем ожидания появления первого эффективного электрона, т.е. tр ≈ (tх + tс). При этом минимальное разрядное напряжение, соответствующее горизонтальному участку ВАХ и амплитуде импульса перенапряжения, ещё вызывающего разряд в промежутке, практически равняется начальному напряжению (Upmin ≈ U0), а соответствующее время разряда при воздействии импульса стандартной формы не превышает 2…3 мкс. Оно резко уменьшается с увеличением амплитуды импульса, так как уменьшаются tх и tс. В результате ВСХ промежутка с однородным электрическим полем имеет практически горизонтальный участок при временах разряда в несколько микросекунд и резкий подъём при малых разрядных временах (1 мкс и менее).

Такой вид ВСХ позволяет использовать промежутки с однородным полем для измерения амплитуды приложенного напряжения. Добившись режима минимального разрядного напряжения промежутка, например шар – шар, с достаточной степенью уверенности можно полагать, что амплитуда воздействующего импульса практически равняется начальному напряжению (Um = Upmin ≈ U0). Последнее, в свою очередь, может быть взято из таблиц пробивных напряжений для стандартных шаровых разрядников при известном диаметре шаров и расстоянии между ними.

В промежутках с резконеоднородным электрическим полем вольт-секундная характеристика имеет круто падающий характер в широком диапазоне значений времени разряда (см. рисунок 4). Такой вид ВСХ обусловлен тем, что в резконеоднородном поле самостоятельный разряд начинает развиваться в виде коронного около электрода с малым радиусом кривизны при небольшом начальном напряжении, заметно меньшем, чем в однородном поле при прочих равных условиях. При этом из зоны коронирования испускаются электроны, которые при дальнейшем нарастании напряжения способны стать эффективными в ещё неионизированной части промежутка и обеспечить прорастание канала разряда к противоположному электроду. Поэтому времена tх и tс в условиях неоднородного поля являются минимальными, существенно не влияющими на величину полного времени разряда. Напротив, время формирования разряда tф является существенной величиной, так как в резконеоднородном поле канал разряда формируется при относительно небольшой средней напряжённости в межэлектродном промежутке (Eср = 4,5…10 кВ/см в зависимости от полярности импульса, длины промежутка и степени неоднородности поля). Это обстоятельство заметно снижает интенсивность ионизационных процессов в глубине промежутка, а значит, и замедляет развитие лавин, стримера и лидера. Из вышесказанного следует, что в условиях резконеоднородного поля время разряда в основном определяется временем формирования. Причём с увеличением амплитуды воздействующего импульса время формирования tф, а значит и разряда tр, заметно уменьшаются в достаточно широком диапазоне, так как возрастает напряжённость в канале разряда.

Вольт-секундные характеристики используются для построения рациональной защиты изоляции от атмосферных перенапряжений (рисунок 5).



Рисунок 5. Согласование характеристик защищаемых объектов и защитных устройств

Допустим, что необходимо защитить изоляцию объекта, нижняя огибающая ВСХ которой представлена линией 1 (см. рисунок 5). Для этого параллельно данному объекту включим защитное устройство (ЗУ) с искровым промежутком – собственно искровой промежуток, вентильный или трубчатый разрядник. Если ВСХ изоляции ЗУ близка к линии 2 (верхняя огибающая), то защита объекта, по-видимому, будет обеспечена. Защитное устройство с ВСХ, представленной линией 3 (тоже верхняя огибающая), не может защитить изоляцию объекта при малых временах разряда (при большой амплитуде и крутизне фронта набегающей волны). Защитное действие устройства будет тем выше, чем более пологой окажется его ВСХ. При этом должен обеспечиваться координационный интервал Uк величиной 20…25 % от разрядного напряжения защищаемой изоляции.

Построение вольт-секундных характеристик, особенно экспериментальное, довольно трудоемко. Поэтому часто их строят упрощенно, используя две характерные величины. Известно, что вольт-секундная характеристика изоляционного промежутка может быть приближённо описана выражением

,



где А и Т – постоянные, определяемые опытным путем.

Эти постоянные можно найти, если известны две точки ВСХ (два значения напряжения разряда Uр и соответствующие им значения времен разряда tр).

Одна из характерных величин ВСХ называется пятидесятипроцентным разрядным напряжением, равным амплитуде такого стандартного грозового импульса, при многократном воздействии которого разряд наблюдается в 50% всех случаев. Это напряжение практически равно минимальному разрядному напряжению и соответствует горизонтальному участку вольт-секундной характеристики промежутка и времени разряда порядка 6…10 мкс (рисунок 6). Оно является мерой импульсной прочности изоляции при воздействии на нее полных (не срезанных) стандартных импульсов напряжения. Отношение 50%-ного разрядного напряжения к амплитуде разрядного напряжения при длительном воздействии (например, при постоянном напряжении или напряжении промышленной частоты) называется коэффициентом импульса. Для промежутков с однородным электрическим полем коэффициент импульса равен единице. Для промежутков с неоднородным полем коэффициент импульса практически всегда больше единицы.



Рисунок 6. К определению двух характерных точек ВСХ изоляции

Второй характерной величиной является разрядное напряжение U2m при времени разряда 2…3 мкс, что соответствует разряду на максимуме стандартной волны (или в небольшой окрестности за ним). Её удобно измерять при воздействии срезанного импульса. Последнее исключает пробои на хвосте волны, т.е. при больших временах разряда. Следует заметить, что это также пятидесятипроцентное разрядное напряжение, но полученное при испытании изоляции срезанными импульсами. Поэтому и оно является мерой электрической прочности изоляции при воздействии коротких импульсных напряжений.

**Описание установки**

Для получения испытательных волн напряжения используются генераторы импульсных напряжений (ГИН). ГИН в общей случае представляет собой систему, в которой ряд включенных параллельно друг другу конденсаторов заряжается от общего источника. При достижении, заданного напряжения конденсаторы автоматически соединяются последовательно, в результате чего их напряжения складываются. Последовательная цепь конденсаторов разряжаете на цепь, состоящую из формирующих волну сопротивлений и емкостей. Установка ГИН-1500, используемая в лаборатории содержит три типовых устройства ГИН-500-0,02/5, в состав каждого из которых входит по пять конденсаторов единичной ёмкостью 0,02 мкФ. Питание осуществляется от высоковольтного аппарата АИИ-70, подключаемого посредством штепсельного разъёма к сети через блок-контакты двери защитного ограждения.

Схема ГИН-1500 с представлением внутреннего соединения элементов аппарата АИИ-70 и одного из ГИН-500 приведена на рисунке 7. В схеме приняты следующие обозначения: АТ – регулировочный автотрансформатор; Т – высоковольтный трансформатор; VD1, VD2 и С1– полупроводниковые вентили и конденсатор схемы удвоения; С1э и С2э – экранные ёмкости; R1 и R2 – водяные сопротивления, выполняющие одновременно роль защитных, зарядных и делительных для второго и третьего ГИН-500; R3 и R4 – защитные водяные сопротивления; ЗР1–ЗР3 – запальные разрядники с регулируемым расстоянием между шарами; 1ПР1–1ПР2 – промежуточные разрядники первого ГИН-500; 1С1–1С5 = 0,02 мкФ – основные конденсаторы первого ГИН-500; RФ = 11,6 кОм – фронтовое сопротивление; 1R1–1R5 = 48 кОм, 1R6–1R10 = 12 кОм, 1R11–1R14 = 24 кОм – зарядные сопротивления первого ГИН-500; ИО – испытуемый объект; ШР – шаровой разрядник.

На выходе высоковольтного аппарата АИИ-70 через защитное сопротивление R4 и вентиль VD2 полуволной напряжения положительной полярности происходит зарядка конденсатора С1 примерно до амплитудного значения напряжения, снимаемого с вторичной обмотки трансформатора Т. Величина этого напряжения регулируется с помощью автотрансформатора АТ и контролируется по вольтметру, проградуированному в амплитудных значениях вторичного напряжения. В следующий полупериод отрицательной полярности конденсатор С1 через вентиль VD1 и защитное сопротивление R3 оказывается включенным последовательно с обмоткой трансформатора Т. Поэтому данная схема позволяет удваивать напряжение, которое затем подаётся на вход ГИН. В результате через какое-то время, определяемое постоянными времени цепей заряда, правые обкладки у конденсаторов 1С1 - 1С5 первого ГИН-500 оказываются заряженными примерно до одинакового потенциала –2U, а их левые обкладки приобретают нулевой потенциал земли. Аналогичным образом происходит зарядка конденсаторов у двух других ГИН-500, на которые поступает сигнал отрицательной полярности после схемы удвоения напряжения через сопротивления R1 и R2. При этом между шарами каждого из разрядников оказывается напряжение 2U.

Работа ГИН начинается с момента, когда происходит пробой промежутка между шарами запального разрядника ЗР1, у которого расстояние между шарами конструктивно выполнено несколько меньшим, чем у остальных разрядников. Следует заметить, что в установке ГИН-1500 расстояния между шарами у всех разрядников, в том числе и промежуточных, изменяются синхронно с помощью изоляционной штанги. Соответственно, чем больше эти расстояния были выставлены, тем до большей величины напряжения зарядятся конденсаторы ГИН перед его срабатыванием. Таким образом, регулируя расстояния между шарами, можно изменять величину напряжения на выходе ГИН.

Когда напряжение на конденсаторе 1С1 достигнет величины пробоя запального разрядника ЗР1, он пробивается, и потенциал точки 1 у первого ГИН-500 приобретает нулевое значение. Поскольку напряжение на ёмкости мгновенно измениться не может, то потенциал левой обкладки конденсатора 1С1 (точки 2) скачком возрастает до +2U. При этом напряжение на промежуточном разряднике 1ПР1 повышается примерно вдвое до величины 4U, так как потенциал точки 3 всё ещё сохраняет величину –2U. Разрядник 1ПР1 срабатывает, и конденсаторы 1С1 и 1С2 включаются последовательно. Потенциал левой обкладки конденсатора 1С2 (точки 4) повышается до уровня суммарного напряжения двух конденсаторов (примерно до +4U), и к разряднику 1ПР2 прикладывается почти утроенное напряжение (т. е. 6U) по сравнению с тем, что было перед началом работы ГИН. Поскольку длина искровых промежутков всех разрядников (кроме ЗР1) принята одинаковой, разрядник 1ПР2 срабатывает и последовательно к первым двум, подключается третий конденсатор. Это, в свою очередь, приводит к срабатыванию разрядника 1ПР3 и подключению четвертого конденсатора. Наконец, срабатывание разрядника 1ПР4 обеспечивает последовательное соединение всех пяти конденсаторов первого ГИН-500, вследствие чего к искровому промежутку разрядника ЗР2 будет приложено напряжение величиной почти 12U, что вызовет его пробой. Процесс продолжает каскадно развиваться дальше, пока все 15 конденсаторов ГИН-1500 не окажутся включенными последовательно. В результате, суммарное напряжение конденсаторов (близкое к 30U) через сопротивление Rф прикладывается к испытуемому объекту ИО и измерительному разряднику ШР.

Суммарная ёмкость ИО и ШР совместно с фронтовым сопротивлением Rф определяют длину фронт волны τф. Ёмкость ГИН-1500 совместно с системой его сопротивлений, включая фронтовое, обеспечивают длину импульса τи.



Рисунок 7. Принципиальная схема испытательной установки ГИН-1500

Для более равномерного распределения напряжения между тремя ГИН-500 в конструкции установки предусмотрены экранные ёмкости С1э – С3э, выполненные в виде тороидальных колец, и делитель напряжения, выполненный с помощью водяных сопротивлениях R1 и R2.

В связи с тем, что, во-первых, дальние от источника конденсаторы ГИН заряжаются до меньших напряжений, чем ближние, во-вторых, одновременно с каскадным переключением конденсаторов в последовательную схему идет процесс их разрядки на систему активных сопротивлений ГИН, величина (амплитуда) выходного напряжения в действительности будет меньше, чем 30U. Отношение амплитуды выходного напряжения установки к теоретически ожидаемому называется коэффициентом использования ГИН .



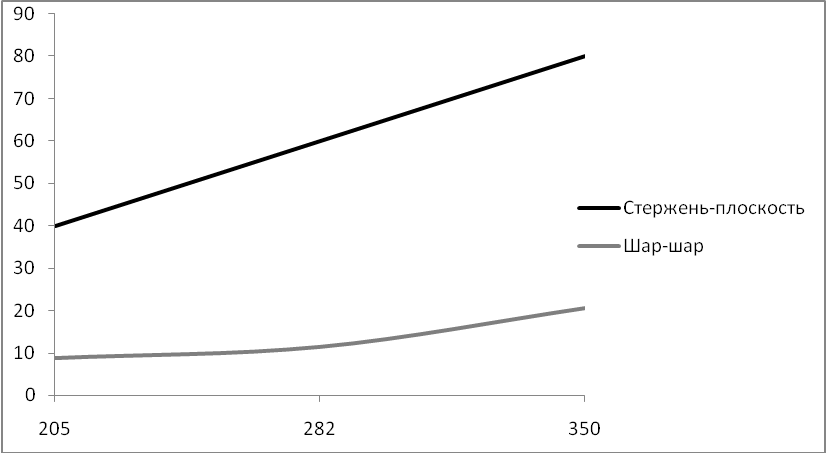
**Измерения с помощью шаровых разрядников**

Шаровой разрядник ШР включается на выходе ГИН. В лабораторной установке используются шары диаметром 25 см. Методика измерения импульсного напряжения заключается в следующем. ГИН, настроенный на заданное напряжение, периодически срабатывает и к ШР прикладываются импульсы напряжения. При достаточном удалении шаров друг от друга пробоев ШР не наблюдается. Шары постепенно сближаются, и начинаются единичные пробои промежутка. При дальнейшем сокращении промежутка число пропусков в его пробоях уменьшается и, наконец, начиная с какой-то длины промежутка, каждый импульс ГИН вызывает его пробой. Разрядным напряжением ШР обычно считают такое напряжение, которое соответствует длине промежутка, вызывающего его пробой в половине случаев разряда ГИН. При расстоянии между шарами меньше их радиуса поле в промежутке будет близко к однородному, а ВСХ промежутка при временах более 1 мкс представляет собой практически горизонтальную линию. В этом случае ШР пробивается при максимальном значении напряжения волны, а найденное напряжение, называемое пятидесятипроцентным разрядным напряжением шарового разрядника, будет близко к амплитуде волны ГИН.

С помощью ШР можно измерить, например, пятидесятипроцентное разрядное напряжение испытуемого объекта. Для этого испытуемый объект и ШР включают параллельно к выходу ГИН, как показано на рисунке 7. Вначале шары разводят на достаточно большое расстояние, чтобы ШР заведомо не пробивался. Путём подбора коэффициента трансформации АТ (грубая регулировка) и размеров искровых промежутков разрядников ГИН с помощью изолирующей штанги (точная регулировка) добиваются выходного напряжения ГИН, равного пятидесятипроцентному разрядному напряжению испытуемого объекта. Выставленное таким образом напряжение необходимо измерить с помощью ШР. Для чего, не меняя настройку ГИН, шары сводят до тех пор, пока число срабатываний ГИН не будет делиться приблизительно поровну между разрядами в ШР и на испытуемом объекте.

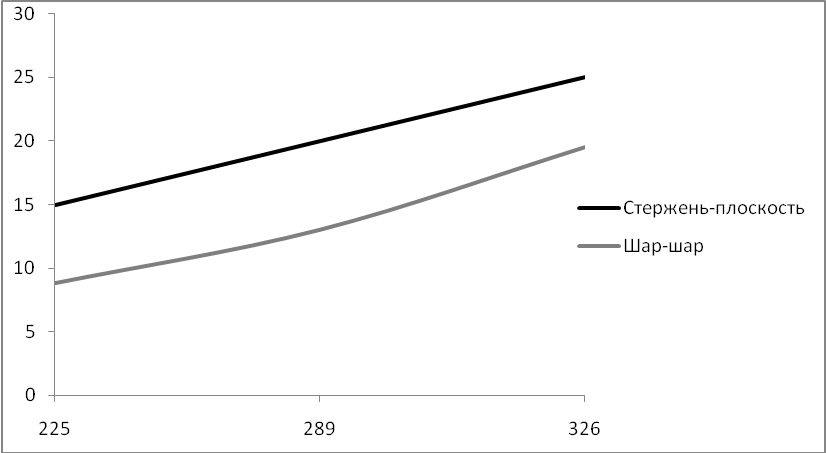
Зависимость пятидесятипроцентного напряжения промежутка стержень – плоскость от длины промежутка при положительной полярности изолированного шара:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Lстержень-плоскость, см | 40 | 60 | 80 |
| Lшар-шар, см | 8,75 | 11,4 | 20,5 |
| Uтабл., кВ | 205 | 282 | 350 |



Зависимость пятидесятипроцентного напряжения промежутка стержень – плоскость от длины промежутка при отрицательной полярности изолированного шара:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Lстержень-плоскость, см | 15 | 20 | 25 |
| Lшар-шар, см | 8,8 | 13 | 19,5 |
| Uтабл., кВ | 225 | 289 | 326 |



**Вывод**

Как видно из полученных данных пятидесятипроцентное напряжение промежутка стержень – плоскость получено для опыта с отрицательной полярностью изолированного шара при меньшем расстоянии между плоскостью и стержнем. Это различие объясняется тем, что электрическое поле между шарами, во-первых, несимметричное, а во-вторых, слабонеоднородное. При заземлении одного из шаров напряженность поля у поверхности изолированного шара будет больше, чем напряженность у поверхности заземленного шара, значит и развитие разряда начинаются у изолированного от земли шара. В условиях даже слабой неоднородности электрического поля образующийся вблизи начальной зоны ионизации положительный объёмный заряд несколько ослабляет поле у положительного электрода и усиливает у отрицательного, поэтому начальное напряжение оказывается несколько больше при положительной полярности изолированного шара, чем при отрицательной.