УДК 621.315.62

Г.В. Смирнов

Оптимизация конструкции проходных секционированных изоляторов

Представлена методика расчета оптимального количества секций в проходном изоляторе, позволяющая получить максимальные значения электрической прочности изоляторов при их заданных габаритах.

Ключевые слова: электротехнические изделия, изолятор, секция, вакуум, градиентное кольцо, напряжение, диэлектрик.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-141-145

Изолятором называют электротехническое устройство, предназначенное для электрической изоляции и механического крепления электроустановок или их отдельных частей, находящихся под разными электрическими потенциалами.

Проходные изоляторы (вводы) используются в местах, где токоведущие части проходят через стены или перекрытия зданий, через ограждения электроустановок или вводятся внутрь металлических корпусов оборудования. Наиболее часто проходные изоляторы используются там, где напряжение нужно передать из одной среды в другую. Например, проходные изоляторы используют, если нужно передать напряжение из воздушной среды в масляную среду в высоковольтных трансформаторах. Большое распространение проходные изоляторы получили в ускорительной технике, где необходимо передать напряжение от высоковольтного источника, находящегося в воздухе, в масле или в сжатом газе, в вакуум, где происходит получение и ускорение пучка заряженных частиц.

Основными характеристиками изоляторов являются разрядные напряжения, геометрические параметры, а также номинальное напряжение электроустановки, для которой предназначен изолятор.

Габариты изолятора в основном лимитируются наиболее слабой, с точки зрения электрической прочности, стороной изолятора. В частности, когда высокое напряжение от источника передается из масла или сжатого газа в вакуум, габариты изолятора определяются вакуумной стороной изолятора, так как напряжение пробоя по поверхности диэлектрика в вакууме значительно ниже, чем по поверхности диэлектриков в упомянутых выше средах [1, 2].

Проведенные исследования показали, что пробивная напряженность поверхности диэлектрика в вакууме возрастает с уменьшением толщины испытуемого на электрическую прочность образца.

Указанное положение находит свое отражение в конструкциях высоковольтных проходных изоляторов, применяемых в высоковольтных трансформаторах, ускорительной технике и т.д.

С целью повышения электрической прочности изоляторов их делят на множество секций проводящими градиентными кольцами. При этом применяют цилиндрическую или дисковую форму элементов секций [3–5]. Высоту секций в этих конструкциях

изоляторов определяют, как правило, исходя из большого объема экспериментальных исследований, что связано со значительным расходом времени и материалов, идущих на изготовление испытуемых образцов изоляторных секций. Кроме того, полученный при исследованиях результат не гарантирует создания конструкции секционированного изолятора с оптимальными габаритами.

Наиболее распространенным способом выбора высоты диэлектрического кольца в секционированном изоляторе является методика, основанная на зависимости поверхностного пробивного напряжения изоляционного материала от толщины испытуемого образца [6]. Этот способ заключается в том, что набор образцов из одинакового изоляционного материала разной толщины подвергают испытанию на электрическую прочность поверхности в какой-либо среде (вакуум, сжатый газ, трансформаторное масло), строят зависимость пробивного напряжения от толщины образца, и определяют на этой зависимости точку изменения наклона кривой, а толщину изоляционного кольца секционированного изолятора выбирают такой, чтобы она не превышала толщины образца при которой снятая зависимость меняет свой наклон.

Однако такая технология весьма условна и не позволяет выбрать для проходного изолятора конкретную толщину диэлектрического кольца в секции, которая обеспечила бы получение максимальных пробивных градиентов при заданной высоте изолятора.

Оптимальная толщина диэлектрика в секционированных изоляторах заданной высоты зависит от толщины градиентных прокладок, материала диэлектрика и конструктивных особенностей изолятора. Поэтому для каждой конкретной конструкции проходного изолятора должна быть определена конкретная оптимальная толщина секционного кольца, а следовательно, и количество колец в конструкции.

Попытка определения оптимального числа секций секционированного изолятора [7]

Определение числа секций в рассматриваемой работе заключается в том, что в макетном приспособлении, состоящем из набора секций в виде чередующихся электроизоляционных и электропроводящих кольцевых элементов с числом таких секций не менее четырех, замеряют распределение напряжения

вдоль поверхности приспособления между соседними электропроводящими элементами при величинах испытательного напряжения, исключающих появление разрядов. По полученному графику находят тангенс угла наклона зависимости коэффициента неравномерности распределения напряжения по длине приспособления от произвольно выбранного числа его секций, а оптимальное число секций изолятора – из соотношения

$$N = \frac{(H+b)(q-\alpha)}{b(1-c)}, \quad (1)$$

где N – оптимальное число секций изолятора; H – высота макетного приспособления; b – толщина электропроводящего элемента; c – тангенс угла наклона зависимости коэффициента неравномерности распределения напряжения по длине приспособления от произвольно выбранного числа его секций; q – показатель степенной зависимости пробивной напряженности при пробое электроизоляционного элемента от его высоты.

Однако определение оптимального количества секций в изоляторе, как это будет показано ниже, не достигает той цели, которую декларирует название работы.

Еще одна попытка определения оптимального количества секций в изоляторе изложена в работе [8]. Этот прием заключается в том, что известным способом определяют среднюю пробивную напряженность E_i изоляционного слоя высотой H и среднюю пробивную напряженность E_n набора из n произвольных, но равных по толщине изоляционных слоев, разделенных градиентными прокладками толщиной b , причем высота набора должна равняться H , после чего определяют оптимальное количество секций по формуле

$$N = \frac{H \ln E_n / E_i}{b [\ln n + \ln E_n / E_i]}. \quad (2)$$

Следует отметить, что выбор толщины градиентного кольца диктуется условиями эксплуатации всего изолятора, технологией его сборки. В частности, при определении b учитывают электрическую прочность среды, окружающей изолятор, требования к механической прочности кольца.

Недостатком такого способа является низкая точность определения оптимального числа секций в изоляторе, что не позволяет при заданной высоте изолятора H и заданной толщине градиентной прокладки b получить максимально возможное пробивное напряжение для указанных габаритов изолятора. Кроме того, способ достаточно сложен и требует для своего воплощения, особенно для изоляторов с большими габаритами, изготовления испытательного стенда со сверхвысоким источником напряжения, что не всегда возможно воплотить в жизнь.

Обоснование методики определения оптимального количества секций в изоляторе

Задача, решаемая в рамках настоящей работы, заключалась в том, чтобы упростить способ и повысить точность определения оптимального количества секций в изоляторе, позволяющую получить мак-

симальное значение пробивного напряжения для заданных габаритов изолятора.

Пробивное напряжение поверхности диэлектрика в любой среде, в частности, в вакууме достаточно точно можно описать в виде степенной функции, имеющей вид

$$U = kd^\alpha, \quad (3)$$

где U – пробивное напряжение по поверхности диэлектрика, кВ; k и α – коэффициенты.

Выражение (3) для секционированного изолятора, имеющего n секций, можно переписать в виде:

$$U = U_1 \times n = kd^\alpha \times n = kkn^{1-\alpha}(H-bn)^\alpha, \quad (4)$$

где U_1 – пробивное напряжение по поверхности диэлектрика одной секции толщиной $d = \frac{H-bn}{n}$, мм;

n – число секций в изоляторе; H – высота изолятора, мм; b – толщина градиентного кольца, мм.

Для определения оптимального числа секций в секционированном изоляторе найдем максимум значения U . Для этого продифференцируем выражение (4) и приравняем значение производной к 0:

$$\frac{\partial U}{\partial n} = k(1-\alpha)n^{-\alpha} \times (H-bn)^\alpha - \alpha kn^{1-\alpha} \times (H-bn)^{\alpha-1} = 0. \quad (5)$$

Преобразовав (5), получим

$$\frac{\partial U}{\partial n} = (1-\alpha) - \alpha nb \times (H-bn)^{-1} = 1 - \alpha - \frac{\alpha bn}{H-bn} = 0. \quad (6)$$

Из уравнения (6) после преобразования получим:

$$H - \alpha H = bn. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует

$$N = n_{\text{опт}} = \frac{H(1-\alpha)}{b}, \quad (8)$$

где N – оптимальное количество секций в изоляторе.

Коэффициенты k и α в выражении (3) для каждого конкретного случая можно рассчитать методом наименьших квадратов, используя экспериментальные значения, полученные при снятии зависимости пробивного напряжения U от толщины диэлектрика d .

Рассмотрим определение указанных коэффициентов на примере полиэтиленовых колец, помещенных в вакуум. Экспериментальные значения пробивных напряжений U полиэтиленовых колец от их толщины d приведены в табл. 1 и отображены на рис. 1 кружками.

Таблица 1
Экспериментальные значения пробивных напряжений U полиэтиленовых колец от их толщины d

№	1	2	3	4	5	6	7	8
d , мм	2	4	8	10	16	20	25	30
U , кВ	10	13	19	21	24	27	29	30

Для упрощения нахождения коэффициентов k и α в формуле (3) линеаризуем уравнение. Для этого прологарифмируем указанное выражение и получим

$$\ln U = \ln k + \alpha \ln d. \quad (9)$$

Введем обозначения $y = \ln U$, $b_0 = \ln k$, $x = \ln d$.

Рис. 1. Зависимость пробивного напряжения поверхности полиэтиленовых колец в вакууме от длины образца

С учетом введенных обозначений уравнение (9) можно записать в виде

$$y = b_0 + \alpha x. \quad (10)$$

Коэффициенты b_0 и α в уравнении (10) с использованием метода наименьших квадратов могут быть определены по выражениям (11) и (12), взятым из работы [10]:

$$b_0 = \ln k = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N y_i x_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}, \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i - \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i}{N}}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}. \quad (12)$$

Для расчета численных значений коэффициентов b_0 и α используем табл. 1.

Подставив численные значения в формулы (11) и (12), получим

$$b_0 = \ln k = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N y_i x_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} = \frac{24,098 \times 50,618 - 59,378 \times 18,85}{49,621} = 2,0257.$$

Проведя потенцирование, получим: $k = 7,648$.

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i - \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i}{N}}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} = \frac{8 \times 59,378 - 24,098 \times 18,85}{8 \times 50,618 - 355,323} = 0,4187.$$

Окончательный вид уравнения (3) после подстановки в него численных значений $k = 7,648$ и $\alpha = 0,4187$:

$$U = k d^\alpha = 7,648 d^{0,4187}. \quad (13)$$

На рис. 1 черными квадратиками обозначены расчетные значения пробивного напряжения поверхности полиэтиленовых колец, определяемого по выражению (13). Как следует из рис. 1, расчетные значения пробивного напряжения от толщины диэлектрика по формуле (13) практически полностью совпадают с экспериментальными значениями, т.е. формула (13) адекватно описывает эксперимент.

Экспериментальная проверка методики и сравнение с аналогами

Задавшись высотой изолятора $H = 300$ мм и толщиной градиентного кольца $b = 3$ мм, по формуле (4) был проведен расчет пробивных напряжений секционированных изоляторов при различной толщине d диэлектрических колец в секции. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Пробивное напряжение в зависимости от числа секций в изоляторе высотой $H = 300$ мм

n	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U , кВ	83	304	433	518	574	606	613	595	447	433	0
d , мм	297	27	12	7	4,5	3	2	1,29	0,75	0,33	0

Как следует из табл. 2, для одной секции высотой $H = 300$ мм, в которой было одно градиентное кольцо толщиной $b = 3$ мм и одно кольцо из полиэтилена толщиной $d = 293$ мм, расчетное пробивное напряжение составило 83 кВ. По мере увеличения числа секций, которому сопутствовало снижение толщины диэлектрика d в каждой секции, происходило повышение пробивного напряжения изолятора. Максимального значения пробивное напряжение достигало при числе секций 60. При дальнейшем увеличении числа секций происходило снижение пробивного напряжения. Это снижение было обусловлено тем, что при дроблении в изоляторе начиналось преобладание металлической составляющей, из-за возрастания в нем количества градиентных колец. Расчет оптимального количества секций N в секционированном изоляторе высотой $H = 300$ мм и толщиной градиентного кольца $b = 3$ мм по формуле (8)

$$N = n_{\text{опт}} = \frac{H(1-\alpha)}{b} = \frac{300(1-0,4187)}{3} \approx 58. \quad (14)$$

Толщина одной секции d при оптимальном количестве секций в изоляторе будет равна

$$d = \frac{H - b n_{\text{опт}}}{n_{\text{опт}}} = \frac{300 - 3 \times 58}{58} = 2,17 \text{ мм.}$$

Расчетное пробивное напряжение такого секционированного изолятора определим по формуле (4)

$$U_d = k d^\alpha \times n = k \left(\frac{H - b n}{n} \right)^\alpha \times n = 7,648 \times 2,17^{0,4187} \times 58 = 613,6 \text{ кВ.}$$

Рассчитанное предельное значение напряжения $U_d = 613,6$ кВ указывает на то, что данный изолятор может быть использован в установках, рабочее напряжение которых не превышает напряжение U_d .

В соответствии с проведенными расчетами был выполнен секционированный изолятор из полиэтиленовых плоских колец, внутренний диаметр кото-

рых составлял 200 мм, а внешний – 300 мм, разделенных градиентными кольцами такого же размера, выполненными из нержавеющей стали. Изолятор был испытан на электрическую прочность на вакуумной установке [10], приведенной на рис. 2.

Рис. 2. Испытательная вакуумная высоковольтная установка

Проверка предлагаемой методики определения оптимального количества секций в проходном изоляторе и сравнение её с аналогами осуществлялись следующим образом. Первоначально рассчитывалось оптимальное количество секций в изоляторе по предлагаемой методике [формула (4)] и по методикам, предлагаемым аналогами, и рассчитывалась величина пробивного напряжения всей конструкции изолятора по формуле (4). После этого делались макеты изолятора, габариты и секции в которых были выполнены в соответствии с проведенными расчетами. После изготовления макетов они испытывались на пробивное напряжение на высоковольтной пробивной установке, приведенной на рис. 2.

Установка включала в себя вакуумную камеру и проходной изолятор. Вакуумная камера представляла собой цилиндр, выполненный из нержавеющей стали. Высота цилиндра равнялась 750 мм, а его диаметр – 1200 мм. Проходной изолятор марки ПТ-220 представлял собой геометрическую фигуру, в нижней части имеющей форму цилиндра, а в верхней части – усеченный конус. Высота изолятора была равна 2870 мм. Внутренние диаметры верхнего и нижнего оснований были равны соответственно 400 и 600 мм. Верхняя часть изолятора заглушалась крышкой, имеющей связь с токоведущей трубой. Источник напряжения представлял собой генератор импульсных напряжений (ГИН), выполненный по схеме Аркадьева–Маркса. ГИН был рассчитан на напряжение 3 миллиона вольт.

При испытании на указанной установке изготовленного макета изолятора, выполненного в соответствии с формулой (4), пробой произошел при напряжении $U = 615$ кВ, что свидетельствовало об адекватности созданной нами методики расчета оптимального количества секций в изоляторе.

Для сравнения результатов, полученных выше с использованием предлагаемой нами методики, с результатами аналогов был произведен расчет оптимального количества секций в изоляторе по этим аналогам. Используя методику-аналог, предложенную в [8], определяли оптимальное число секций по выражению (2)

$$N = \frac{H \ln E_n / E_i}{b [\ln n + \ln E_n / E_i]} = \frac{300 \times \ln 1,116 / 0,278}{3 \times [\ln 12 + \ln 1,116 / 0,278]} \cong 36.$$

Толщина $d_{\text{спрот}}$ одной секции изолятора, выполненного в соответствии с аналогом, равна

$$d_a = \frac{H - bN}{N} = \frac{300 - 3 \times 36}{36} = 5,3 \text{ мм.}$$

Величина пробивного напряжения секционированного изолятора, выполненного по аналогу [8], равна

$$U_a = k \left(\frac{H - bN}{N} \right)^\alpha \times N = 7,648 \times 5,3^{0,4187} \times 36 = 553,5 \text{ кВ.}$$

Как следует из приведенных цифр, предлагаемая в данной статье методика по сравнению методикой, изложенной в работе [8], позволяет повысить пробивное напряжение приведенного в примере изолятора высотой $H = 300$ мм и толщиной градиентной прокладки $b = 3$ мм на 11,7%.

В работе [7] авторы в примере конкретного выполнения утверждают, что при высоте изолятора $H = 385$ мм и толщине прокладок из электропроводящего материала $b = 5$ мм, оптимальное количество секций равно $N = 10$. Пробивное напряжение такого изолятора можно определить по формуле (4).

$$U_{\text{пр}} = k \left(\frac{H - bN}{N} \right)^\alpha \times N = 7,648 \times \left(\frac{385 - 5 \times 10}{10} \right)^{0,4187} \times 10 = 332,7 \text{ кВ.}$$

В соответствии с предлагаемой нами методикой по формуле (8) оптимальное число секций в изоляторе высотой $H = 385$ мм и толщине прокладок из электропроводящего материала $b = 5$ мм будет равно

$$N = n_{\text{опт}} = \frac{H(1 - \alpha)}{b} = \frac{385(1 - 0,4187)}{5} \cong 48.$$

Пробивное напряжение такого изолятора в соответствии с формулой (4) будет равно

$$U_{\text{прот}} = k \left(\frac{H - bN}{N} \right)^\alpha \times N = 7,648 \times \left(\frac{385 - 5 \times 48}{48} \right)^{0,4187} \times 48 = 583,1 \text{ кВ.}$$

Таким образом, изолятор, оптимальное количество секций в котором рассчитано по нашей методике, имеет в 1,75 раза более высокую пробивную прочность, чем изолятор, оптимальное количество в котором определено по методике, предлагаемой в работе [7].

Заключение

Таким образом, предлагаемая методика определения оптимального числа секций в изоляторе по сравнению с аналогами имеет более высокую точность определения оптимального числа секций в изоляторе, что позволяет при заданной высоте изолятора H и заданной толщине градиентной прокладки b получить максимально возможное пробивное напряжение для указанных габаритов изолятора. Кроме того, предлагаемая методика по сравнению с аналогами достаточно проста и не требует для своего воплощения, особенно для изоляторов с большими габаритами, изготовления испытательного стенда со сверхвысоким источником напряжения, что не всегда возможно воплотить в жизнь.

В частности, в рассмотренных нами примерах для реализации заявляемого способа достаточно того, чтобы экспериментальная высоковольтная установка позволяла получать напряжение, не превышающее 30–35 кВ. Тогда как для реализации способов аналогов необходимо, чтобы экспериментальная установка имела возможность экспериментировать при напряжениях 450–500 кВ, что более чем на порядок выше напряжения, необходимого для реализации заявляемого способа.

Предлагаемая методика позволяет, не меняя габаритов изолятора, путем реализации в нём оптимального количества секций повысить его электрическую прочность не менее чем в полтора раза. Кроме того, при заданном рабочем напряжении изолятора выбором оптимального количества его секций можно добиться сокращения габаритов и уменьшения его стоимости.

Литература

1. Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. – М.: Атомиздат, 1972. – 304 с.
2. Раховский В.Н. Физические основы электрического тока в вакууме. – М.: Наука, 1970. – 350 с.
3. А.с. 987684 СССР, МКИ Н 01 В 17/32. Секционированный электрический изолятор / Г.В. Смирнов (СССР), А.Л. Филатов (СССР). – №3236022/24-07; заяв. 09.01.81; опубл. 07.01.83. Бюл. № 1. – 6 с.
4. Пат. 2 556 879 РФ, МПК Н 01В 17/26. Способ изготовления проходного вакуумного изолятора высокого напряжения / Г.В. Смирнов (РФ). – № 2014108628/07; заявл. 05.03.14; опубл. 20.07.15. Бюл. № 20. – 12 с.
5. Пат. 2 557 064 РФ, МПК Н 01В 17/26. Способ изготовления проходного вакуумного изолятора высокого

напряжения / Г.В. Смирнов (РФ). – № 2014108623/07; заявл. 05.03.14; опубл. 20.07.15. Бюл. № 20. – 14 с.

6. А.с. 771735 СССР, МКИ Н 01 В 17/32. Проходной секционированный изолятор / Г.В. Смирнов (СССР). – № 2653014/07; заяв. 31.07.78; опубл. 15.10.80. Бюл. № 38. – 4 с.

7. Пат. 2 557 064 РФ, МПК Н 01В 17/26. Способ изготовления проходного вакуумного изолятора высокого напряжения / Г.В. Смирнов (РФ). – №2014108623/07; заявл. 05.03.14; опубл. 20.07.15. Бюл. № 20. – 14 с.

8. А.с. 1 552 235 СССР, МКИ Н 01 В 17/32. Способ определения оптимального числа секций секционированного изолятора / С.Б. Евлампиев (СССР), Г.С. Коршунов (СССР), Ю.Ф. Свиридов (СССР). – № 3721024/24-63; заяв. 05.04.84; опубл. 23.03.90. Бюл. № 11. – 6 с.

9. А.с. 758266 СССР, МКИ Н 01 В 17/32. Способ определения оптимального числа секций секционированного изолятора / Г.В. Смирнов (СССР), Г.М. Кассиров (СССР), Ю.В. Планкин (СССР). – № 2655953/24-07; заяв. 07.08.78; опубл. 23.08.80. Бюл. № 31. – 6 с.

10. Смирнов Г.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов РЭС: учеб. пособие для магистрантов 27.04.04 «Управление в технических системах» по профилю «Управление в светотехнических системах». – Томск, 2016. – 216 с. – <https://edu.tusur.ru/training/publications/6043>

11. Смирнов Г.В. Экспериментальное изучение вакуумного пробоя сантиметровых промежутков на импульсах микросекундной длительности: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1974. – 129 с.

Смирнов Геннадий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор,
директор НИИ электронного технологического
оборудования и систем связи (НИИ ЭТОСС) ТУСУРа
Тел.: +7-913-829-44-47
Эл. почта: smirnov@main.tusur.ru

Smirnov G.V.

Design optimization of partitioned bushing insulators

The method of calculating the optimal number of sections in the pass-through insulator, allowing to obtain the maximum value of the electric strength of the insulators in their specified dimensions, is presented.

Keywords: electrical product, insulator section, vacuum, gradient ring, voltage, dielectric.