

## Оценка эффективной длины пути утечки опорных изоляторов в условиях загрязнения и увлажнения

КОРЯВИН А.Р.

Для широкого круга загрязненных опорных изоляторов выполнены расчетные оценки эффективной длины пути утечки  $L_{эф}$ , под которой понимается длина канала дугового разряда в завершающей его стадии  $L_{д}$ . Показано, что лишь при относительно небольших значениях отношения длины пути утечки к высоте изоляторов по их изоляционной части  $L/H$  дуговой канал распространяется вдоль всей длины пути утечки или по большей ее части ( $L_{д} \approx L$ ). При превышении отношения  $L/H$  критического значения величина  $L_{эф}$  и связанный с ней коэффициент эффективности использования каналом разряда длины пути утечки  $K_{эф} = L_{д}/L$  быстро падают. Принимая во внимание практическое равенство электрической прочности загрязненной изоляции падению напряжения в канале дугового разряда в заключительной его стадии, именно эффективная длина пути утечки, а не до сих пор используемая в отечественных и зарубежных нормативных документах длина пути утечки может служить в качестве физически обоснованного параметра при выборе габаритов загрязненных изоляторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: опорные изоляторы, загрязнение, электрическая прочность, путь утечки, эффективная длина

Во многих случаях определяющим при выборе габаритов внешней опорной изоляции электрооборудования является требование к ее надежной работе в условиях загрязнения и увлажнения при длительном приложении рабочего напряжения. На практике изоляторы оснащаются ребрами различной конфигурации, позволяющими увеличить длину пути утечки  $L$ , под которой понимается наименьшее расстояние по поверхности внешней изоляции между металлическими частями разного потенциала. Предполагалось, что если каналом разряда длиной  $l_{д}$  будет использована вся длина пути утечки ( $l_{д} = L$ ), то увеличение  $L$  будет способствовать увеличению электрической прочности изоляции. Это предположение основывалось на результатах исследований, согласно которым в момент полного перекрытия изоляции падение напряжения на канале дуги длиной  $l_{д}$  ( $\Delta U_{l_{д}}$ ) практически совпадает с разрядным напряжением  $U_{р} \approx \Delta U_{l_{д}}$ .

Таким образом, вплоть до настоящего времени в отечественной и зарубежной практике длина пути утечки (или удельная длина пути утечки  $\lambda$ , определяемая как отношение длины пути утечки к наибольшему рабочему напряжению сети), является основным нормируемым параметром, используемым при выборе габаритов загрязненной изоляции. Нормируемые значения удельной длины пути утечки растут по мере увеличения степени загрязнения атмосферы в районах эксплуатации изоляторов. Далее приведены значения удельной длины пути утечки для четырех степеней загрязнения [1]:

Степень загрязнения	Удельная поверхностная проводимость, мкСм	Удельная длина пути утечки $\lambda$ , см/кВ
Легкая (I)	5±0,5	1,6
Средняя (II)	10±1,0	2,0
Сильная (III)	20±2,0	2,5
Очень сильная (IV)	30±3,0	3,1

В свое время введение нормированной удельной длины пути утечки  $\lambda$  и соответственно самой длины пути утечки  $L$  давало производителям продукции простые рекомендации по выбору изоляции для ее эксплуатации в районах с разной степенью загрязнения. Однако вскоре выяснилось, что длина пути утечки не может служить надежным критерием при выборе габаритов загрязненной изоляции. Как отмечалось в [2], при относительно небольших значениях  $L$ , не превышающих некоторое критическое значение ( $L \leq L_{кр}$ ), в завершающей стадии разрядного процесса дуговой канал распространяется вдоль всей длины пути утечки или по большей ее части (эффективное использование разрядом длины пути утечки). В области  $L > L_{кр}$  разрядом используется лишь относительно небольшая часть длины пути утечки, которая уменьшается с ростом  $L$  (неэффективное использование разрядом длины пути утечки). Для оценки степени эффективности использования разрядным каналом длины пути утечки было введено понятие «эффективная длина пути утечки»  $L_{эф}$  [3]. Однако

количественная оценка  $L_{эф}$  охватывала лишь ограниченный круг типов изоляторов, что при разработке новых видов изоляционных конструкций приводило к неизбежности проведения большого объема трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований. Поэтому одной из важнейших задач является определение численной оценки эффективной длины пути для широкого круга опорных изоляторов.

Результаты дальнейших исследований электрической прочности загрязненной опорной изоляции позволили при ее выборе вместо  $L$  или  $L_{эф}$  использовать более информативный и надежный параметр в виде отношения длины пути утечки к высоте изолятора по его изоляционной части  $L/H$  [4, 5]. Именно этот параметр фигурирует в качестве основного во вновь разработанных международных и отечественных нормативных документах [6, 7]. Введение в этих документах рекомендуемых диапазонов изменения отношения  $L/H$  в сочетании с нормированными значениями  $L$ , полностью совпадающих с приведенными в ГОСТ 9920, коренным образом меняет ситуацию при выборе изоляторов для работы в условиях загрязнения, поскольку позволяет однозначно определять их высоту по изоляционной части  $H$ . В определенной степени такой подход является очередным шагом вперед при проектировании внешней изоляции. Однако, как было показано в [2], нормируемые [6 и 7] нижние  $(L/H)_{\min} = 2,5$  и верхние  $(L/H)_{\max} \geq 4,4$  пределы изменения отношения  $L_y/H$  оказываются заметно выше рекомендуемых в [4, 5].

Во многих случаях это приводит к заниженной оценке высоты изоляции  $H$  по сравнению с высотой, полученной по данным [4, 5], а также с минимально допустимой высотой изоляции  $H_{\min \text{ доп}}$ , найденной исходя из требования обеспечения нормируемой электрической прочности изоляции при воздействии других форм воздействующего испытательного напряжения (кратковременного напряжения промышленной частоты, грозового и коммутационного импульсов). Таким образом, габариты внешней изоляции, выбранные по требованию ее надежной работы в условиях загрязнения и увлажнения, должны в обязательном порядке сопоставляться с габаритами, найденными по требованию обеспечения нормируемой электрической прочности изоляции при иных формах воздействующего испытательного напряжения и условиях испытаний. Не исключено, что существенные различия в оценках диапазона изменения  $L/H$  по рекомендациям [6, 7] и данным [4, 5] могут быть обусловлены различиями в методах проведения испытаний загрязненной изоляции.

В зарубежной практике, часто ориентированной на прибрежные районы, испытания загрязненных изоляторов проводятся методом соленого тумана при длительном приложении напряжения и непрерывном увлажнении поверхности изоляторов. В нашей стране с преобладанием континентальных областей предпочтение отдается методу предварительного загрязнения с последующим увлажнением слоя загрязнения и приложением напряжения толчком к изолятору. Совершенно очевидно, что различия в условиях проведения испытаний изоляторов могут приводить к различиям в особенностях механизма перекрытия загрязненных изоляторов.

При испытании методом предварительного загрязнения разрядный процесс протекает по классической схеме: формирование разряда начинается с медленной (тепловой) стадии, в течение которой в результате термического воздействия токов утечки образуются сухие пояса, которые шунтируются частичными дуговыми разрядами (ЧДР). При определенных условиях режим ЧДР переходит в быструю стадию, когда опорные точки дужек с большой скоростью проскальзывают по увлажненному слою загрязнения без его подсушки. Быстрая стадия завершается полным перекрытием изолятора. При испытаниях методом соленого тумана вследствие непрерывного увлажнения нет благоприятных условий для формирования медленной стадии разрядного процесса, имеющего место при твердом загрязнении, и перекрытие изоляторов, скорее всего, осуществляется в основном за счет быстрой стадии.

Приведенные в [4, 5] результаты экспериментальных исследований и эмпирические выражения позволяют определять не только электрическую прочность загрязненной изоляции, но и находить рекомендуемый для практического использования диапазон изменения отношения  $L/H$ . Предложенные для расчета разрядных градиентов напряжения загрязненных изоляторов простые эмпирические формулы удобны для практического использования. Однако их недостатком является отсутствие явно выраженного физического смысла. Поэтому одна из задач этой статьи — наполнение этих формул физическим содержанием и численная оценка эффективной длины пути утечки для широкого круга загрязненных опорных изоляторов с различными значениями  $L/H$ .

Согласно [2, 4, 5] опытные данные по 50%-й разрядной напряженности по длине пути утечки  $E_L$  для загрязненных опорных изоляторов первой группы (характеризующейся относительно большим диаметром тела изолятора [2]) аппроксимируются убывающей линейной функцией

$$E_L = A_1 / \chi^{0,3}, \tag{1}$$

где

$$A_1 = 1,76 - 0,36L / H; \tag{2}$$

$\chi$  – удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения, мкСм;  $L$  – длина пути утечки;  $H$  – высота изолятора по изоляционной части.

В свою очередь, 50%-я разрядная напряженность по высоте изоляции

$$E_H = E_L \frac{L}{H} = \frac{(1,76 - 0,36L / H)L / H}{\chi^{0,3}}. \tag{3}$$

При фиксированном значении  $\chi$  выражение (3) является параболой с вершиной при  $(L/H)_{\text{опт}}$ . Для производной параболы (3) в ее вершине справедливо выражение

$$E'_H = \frac{1,76 - 0,72L / H}{\chi^{0,3}} = 0, \tag{4}$$

отсюда  $(L/H)_{\text{опт}} = 2, (4) \approx 2,45$ .

Поскольку выражение (3) симметрично относительно вертикальной оси, проходящей через вершину параболы, каждому заданному значению  $E_H$  будут соответствовать два значения  $L/H$ :  $1 \leq (L/H)_1 \leq 2,45$  и  $2,45 \leq (L/H)_2 \leq 3,9$ . Связь между  $(L/H)_1$  и  $(L/H)_2$  задается выражением

$$\begin{aligned} (L/H)_2 &= (L/H)_1 + 2\Delta_{L/H} = \\ &= (L/H)_1 + 2[(L/H)_{\text{опт}} - (L/H)_1] = \\ &= 2(L/H)_{\text{опт}} - (L/H)_1 \approx 4,9 - (L/H)_1. \end{aligned} \tag{5}$$

На рис. 1 представлена зависимость 50%-й разрядной напряженности опорных изоляторов первой группы от  $L/H$ , построенная по (3) при удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения  $\chi = 10$  мкСм.

Из (3) следует, что при заданной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения  $\chi$  и

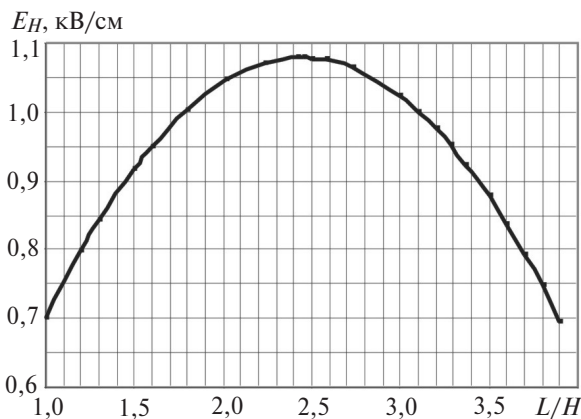


Рис. 1. 50%-я разрядная напряженность  $E_H$  для опорных изоляторов первой группы в зависимости от  $L/H$  ( $\chi = 10$  мкСм)

фиксированном отношении  $L/H$  зависимость 50%-го разрядного напряжения изоляции от ее высоты  $U_{50} = E_H H$  будет определяться линейной функцией, что подтверждается результатами экспериментальных исследований [12]. Действительно, приняв  $\chi^{0,3} = \text{const} = c$  и  $L/H = \text{const} = b$ , получим

$$\begin{aligned} U_{50} = E_H H &= \frac{(1,76 - 0,36b)b}{c} H = \\ &= \left( 1,76 \frac{b}{c} - 0,36 \frac{b^2}{c} \right) H = (m - n)H, \end{aligned} \tag{6}$$

где  $n = 1,76b / c = \text{const}$ ;  $m = 0,36b^2 / c = \text{const}$ .

В свою очередь, равенство градиентов напряжения  $E_H$  при двух парных значениях  $(L/H)_1$  и  $(L/H)_2$  означает, что зависимости  $U_{50(L/H)_1} = E_H H$  и  $U_{50(L/H)_2} = E_H H$  будут описываться одной и той же линейной функцией, что свидетельствует о практической нецелесообразности использования изоляторов с  $L/H$ , заметно превышающих  $(L/H)_{\text{опт}} \approx 2,45$ .

Следует отметить, что в практическом плане выражения (1) и (3), хотя и являются удобной аппроксимацией опытных данных, однако используемое в них в качестве аргумента отношение  $L/H$  довольно условно связано с электрической прочностью загрязненной изоляции. Если же принять, что 50%-е разрядное напряжение загрязненной изоляции  $U_{50}$  практически совпадает с падением напряжения на канале дугового разряда длиной  $L_d$  в завершающей его стадии ( $\Delta U_{L_d}$ ), то выражения (1) и (3) будут наполнены физическим содержанием лишь при условии использования каналом разряда всей длины пути утечки ( $L_d = L$ ). Согласно же имеющемуся феноменологическому материалу выполнение такого условия возможно лишь при относительно небольших значениях  $L/H$ , соответствующих левой ветви параболы (3). Однако даже в этом случае по мере роста  $L/H$  значения  $E_H$  увеличиваются нелинейно, что указывает на постепенное сокращение отношения  $L_d / L$ , т.е. свидетельствует о монотонном снижении эффективности использования каналом разряда длины пути утечки.

Действительно, производная параболы (3) представляет собой убывающую линейную функцию, которая в области  $1 < L/H \leq 2,45$  принимает положительные значения, а в области  $L/H > 2,45$  становится меньше нуля (рис. 2).

Поскольку в левой ветви параболы (3) ее производная больше нуля, то несмотря на сокращение отношения  $L_d / L$ , подъемом разрядной напряженности  $E_H$  при росте  $L/H$  обеспечивается за счет увеличения отношения  $L_d / H$ , которое при

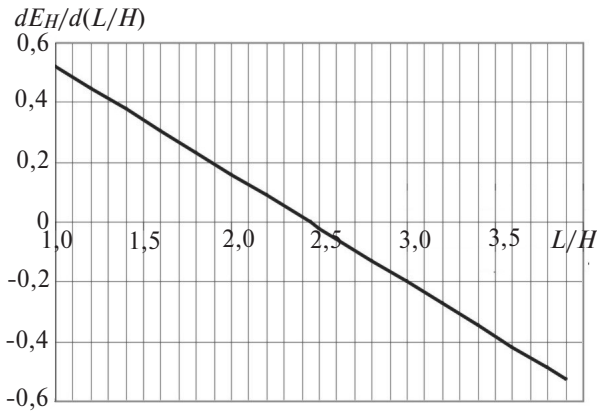


Рис. 2. Производная разрядной напряженности  $E_H$  в зависимости от  $L/H$  ( $\chi = 10$  мкСм)

$L_d / H \approx 2,45$  принимает максимальное значение. При  $L / H > 2,45$  производная (3) становится меньше нуля и, следовательно, снижение градиентов напряжения  $E_H$  по мере роста  $L/H$  в этой области является следствием дальнейшего сокращения отношения  $L_d / H$  по сравнению со значением, полученным при  $L / H \approx 2,45$ .

Исходя из условия  $U_{50} = \Delta U_{L_d}$  и равенства 50%-х разрядных напряженностей изоляторов по их высоте при двух значениях  $L / H$  ( $E_{H(L/H)_1} = E_{H(L/H)_2}$ ), симметрично расположенных относительно вертикальной оси, проходящей через вершину параболы (3), можно записать:

$$E_{H(L/H)_1} = E_{H(L/H)_2} = E_{L_{d1}}(L_{d1} / H_1) = E_{L_{d2}}(L_{d2} / H_2), \quad (7)$$

где  $E_{L_{d1}}$  и  $E_{L_{d2}}$  — градиенты напряжения в дуговых каналах длиной  $L_{d1}$  и  $L_{d2}$  для изоляторов с отношениями  $(L/H)_1$  и  $(L/H)_2$  соответственно.

Рост  $L/H$  в левой ветви параболы (3) с точками  $(L/H)_1$  и сокращение  $L/H$  в правой ее ветви с соответствующими точками  $(L/H)_2$  сопровождается одинаковым приращением  $E_H$  в этих точках. При таком подходе в симметричных точках с отношениями  $(L/H)_1$  и  $(L/H)_2$  обеспечивается не только равенство  $E_H$ , но и равенство производной  $E'_H$ . Это дает основание для предположения о равенстве отношений  $L_{d1} / H_1$  и  $L_{d2} / H_2$  и, как следствие, с учетом (7) — равенстве  $E_{L_{d1}}$  и  $E_{L_{d2}}$ . Тогда градиенты напряжения по длине пути утечки  $E_L$  в зависимости от  $L/H$  могут быть представлены двумя пересекающимися прямыми по выражению (1) и зеркальным его отражением относительно вертикальной оси, проходящей через точку с  $L/H = 2,45$ :

$$E_L = \frac{A_2}{\chi^{0,3}} = \frac{-0,004 + 0,36L / H}{\chi^{0,3}}. \quad (8)$$

Недостатком такого представления зависимости  $E_L = F(L / H)$  является скачкообразное изменение производной  $E_L$  при  $L / H = 2,45$ , что противоречит физическому смыслу. Этот недостаток можно устранить, приняв в качестве зависимости  $E_L = F(L / H)$  гиперболу с асимптотами, образованными числителями выражений (1) и (8), т.е. асимптоты гиперболы могут быть представлены:

при  $1 < L / H \leq 2,45$

$$A_1 = 1,76 - 0,36L / H; \quad (9)$$

при  $2,45 \leq L / H$

$$A_2 = -0,004 + 0,36L / H. \quad (10)$$

Выражение для гиперболы имеет вид

$$\frac{(A - A_0)^2}{b^2} - \frac{(L / H - (L / H)_0)^2}{a^2} = 1, \quad (11)$$

где  $A_0$  — значение коэффициента  $A$  при  $(L / H)_0 = 2,45$ , т.е.  $A_0 = 0,878$ .

Тогда (11) запишется как

$$\frac{(A - 0,878)^2}{b^2} - \frac{(L / H - 2,45)^2}{a^2} = 1. \quad (12)$$

Отношение постоянных коэффициентов гиперболы  $b/a$  равно коэффициенту 0,36, входящему в выражения (9) и (10). Коэффициенты  $a$  и  $b$  определялись из условия минимизации отклонения значений гиперболы от ее асимптот. Расчеты показали, что при  $a = 0,09$  и  $b = 0,0324$  максимальное отклонение значения гиперболы имеет место при  $L / H = 2,45$  и оказывается менее 4%, что вполне приемлемо для практических целей. Подставляя в (12) значения  $a$  и  $b$ , получим

$$A = 0,878 + 0,0324 \sqrt{1 + \frac{(L / H - 2,45)^2}{(0,09)^2}}. \quad (13)$$

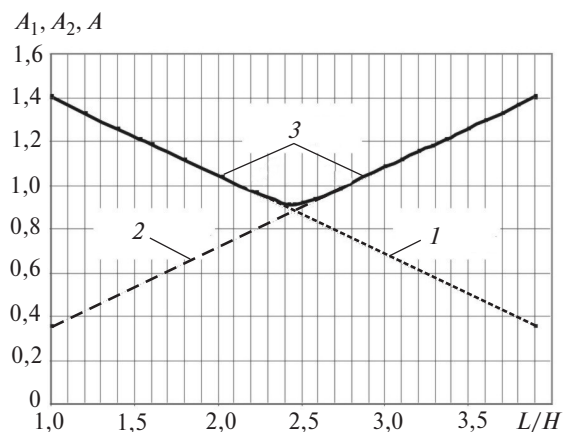


Рис. 3. Гипербола по (13) и ее асимптоты: 1 — расчет  $A_1$  по (9); 2 —  $A_2$  — по (10); 3 —  $A$  — по (13)

Результаты расчета по (9), (10) и (13) представлены на рис. 3.

Поскольку градиенты напряжения в канале дуги  $E_d$  и разрядная напряженность по высоте изоляции  $E_H$  определяются соответственно как

$$E_d = \frac{A}{\chi^{0,3}} \quad (14)$$

и

$$E_H = E_d \frac{L_d}{H} = \frac{A}{\chi^{0,3}} \frac{L_d}{H}, \quad (15)$$

то можно записать:

$$E_d = \frac{0,878 + 0,0324 \sqrt{1 + \frac{(L/H - 2,45)^2}{(0,09)^2}}}{\chi^{0,3}} \quad (16)$$

и

$$E_H = \frac{0,878 + 0,0324 \sqrt{1 + \frac{(L/H - 2,45)^2}{(0,09)^2}}}{\chi^{0,3}} \frac{L_d}{H}. \quad (17)$$

Длина дугового канала

$$L_d = L \frac{E_L}{E_d}, \quad (18)$$

где  $L$  – длина пути утечки;  $E_L$  – градиенты напряжения по длине пути утечки по (1).

Тогда с учетом (1) и (16) формула (18) переписывается как

$$L_d = L \frac{1,76 - 0,36L/H}{0,878 + 0,0324 \sqrt{1 + \frac{(L/H - 2,45)^2}{(0,09)^2}}}. \quad (19)$$

Левая часть выражения (19) является эффективной длиной пути утечки, и в равенстве  $L_d = L_{эф}$  отражена физическая суть такого важного параметра, как  $L_{эф}$ .

Разделив обе части выражения (19) на  $L$ , получим выражение для коэффициента эффективности использования каналом разряда длины пути утечки:

$$K_{эф} = \frac{L_d}{L} = \frac{L_{эф}}{L} = \frac{1,76 - 0,36L/H}{0,878 + 0,0324 \sqrt{1 + \frac{(L/H - 2,45)^2}{(0,09)^2}}}. \quad (20)$$

Отношение  $L_d/H$  с учетом (18) определяется как

$$L_d/H = \frac{L}{H} \frac{1,76 - 0,36L/H}{0,878 + 0,0324 \sqrt{1 + \frac{(L/H - 2,45)^2}{(0,09)^2}}}. \quad (21)$$

Знаменатель (19)–(21) можно представить в виде, аналогичном по структуре формуле (2), в которой вместо отношения  $L/H$  вводится отношение  $L_d/H$ :

$$\begin{aligned} A &= 0,878 + 0,0324 \sqrt{1 + \frac{(L/H - 2,45)^2}{(0,09)^2}} = \\ &= 1,76 - 0,36L_d/H. \end{aligned} \quad (22)$$

Для дальнейших преобразований примем:

$$a = 0,878; \quad b = 0,0324; \quad \sqrt{1 + \frac{(L/H - 2,45)^2}{(0,09)^2}} = \sqrt{C}.$$

Тогда с учетом (21) и (22):

$$a + b\sqrt{C} = 1,76 - 0,36L/H \frac{1,76 - 0,36L/H}{a + b\sqrt{C}} \quad (23)$$

или

$$\begin{aligned} 1,76 - (a + b\sqrt{C}) &= 0,36L/H \frac{1,76 - 0,36L/H}{a + b\sqrt{C}} = \\ &= (a + b\sqrt{C})[1,76 - (a + b\sqrt{C})] = 0,36L/H(1,76 - 0,36L/H). \end{aligned} \quad (24)$$

Левая и правая части (24) имеют одинаковую структуру, из которой следует:

$$\begin{aligned} a + b\sqrt{C} &= 0,36L/H = 0,878 + 0,0324 \sqrt{1 + \frac{(L/H - 2,45)^2}{(0,09)^2}} = \\ &= 0,878 + 0,36 \sqrt{0,09^2 + (L/H - 2,45)^2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Из-за малости первого слагаемого подкоренного выражения можно записать:

$$\sqrt{(L/H - 2,45)^2} = L/H - 2,45. \quad (26)$$

Подставив (26) в (25), получим практическое тождество

$$\begin{aligned} 0,36L/H &\approx 0,878 + 0,36(L/H - 2,45) = \\ &= 0,878 + 0,36L/H - 0,882 \approx 0,36L/H - 0,004. \end{aligned} \quad (27)$$

Максимальное расхождение между левой и правой частями (27) составляет 1,1%.

На рис. 4,а представлены результаты расчета  $L_d/L$ ,  $L_d/H$ , а также  $E_d$  и  $E_H$  в зависимости от  $L/H$  при  $\chi = 10$  мкСм.

Из рис. 4 видно, что отношению  $(L/H)_1 = 1,0$  соответствует парное значение  $(L/H)_2 \approx 3,9$ . При

этих значениях  $L/H$  обеспечиваются равенства:  $E_d = E_H$ ,  $A_{1(L/H)_1}(L/H)_1 = A_{1(L/H)_2}(L/H)_2$ , а также  $L_d/H = 1,0$ . Последнее означает, что перекрытие изоляторов с  $L/H \approx 3,9$  происходит вдоль кромок ребер, а коэффициент эффективности использования каналом разряда длины пути утечки составляет  $K_{эф} = L_d/L \approx 0,254$ .

В диапазоне изменения  $L/H$  от 1,0 до 2,45 коэффициент эффективности использования каналом разряда длины пути утечки падает незначительно (с 1,0 до 0,964), в то время как при дальнейшем росте  $L/H$  вплоть до значения 3,9 наблюдается существенное снижение  $K_{эф}$  до 0,254.

Кривая градиентов напряжения в канале дуги  $E_d = F(L/H)$  имеет U-образный характер с минимумом при  $L/H = 2,45$ , а кривые  $L_d/H = F(L/H)$  и  $E_H = F(L/H)$  при том же значении  $L/H$  приобретают максимальные значения.

Отмеченные закономерности функций  $L_d/H = F(L/H)$ ,  $E_H = F(L/H)$  и  $K_{эф} = L_d/L = L_{эф}/L = F(L/H)$  лишней раз свидетельствуют о нецелесообразности изготовления и использования изоляторов со значениями  $L/H$ , заметно превышающими 2,45.

Для загрязненных изоляторов второй группы опытные данные по 50%-й разрядной напряженности по длине пути утечки  $E_L$  могут аппроксимироваться функцией вида

$$E_L = \frac{B}{\chi^{0,3}} = \frac{1 - 0,29(L/H - 2,45)^3}{\chi^{0,3}} \text{ кВ/см.} \quad (28)$$

Изоляторы этой группы, как правило, были с переменным вылетом ребра, в результате чего для них отношение  $L/H$  было не менее 2,45.

Как отмечалось ранее, перекрытие по кромкам ребер изоляторов первой группы происходит при  $(L/H)_2 \approx 3,9$ . Этому значению  $(L/H)_2$  соответствует парное отношение  $(L/H)_1 = 1,0$ . Для рассматриваемого случая выполняется условие

$$\begin{aligned} A_{1(L/H)_1}(L/H)_1 &= A_{1(L/H)_2}(L/H)_2 = \\ &= A_{1(L/H)_1} \cdot 1,0 = A_{1(L/H)_2} \cdot 3,9 = 1,76 - 0,36 \cdot 1 = \\ &= (1,76 - 0,36 \cdot 3,9) \cdot 3,9 \approx 1,4. \end{aligned} \quad (29)$$

Если принять, что при перекрытии по кромкам ребер изоляторов градиенты напряжения в дуге  $E_d = E_H$  длиной  $L_d = H$  будут одинаковы для обеих групп изоляторов, то для второй группы изоляторов можно записать:

$$\begin{aligned} B_{2(L/H)_2}(L/H)_2 &= \\ &= [1 - 0,29((L/H)_2 - 2,45)^3](L/H)_2 \approx 1,4. \end{aligned} \quad (30)$$

Решив (30), получим, что для второй группы изоляторов условие их перекрытия по кромкам ребер выполняется при  $L/H = 3,742$ . В этом случае выражение для определения градиентов напряжения в дуге примет вид

$$\begin{aligned} E_d = E_H &= \frac{1 - b(3,742 - 2,45)^3}{\chi^{0,3}} \frac{L_d}{H} = \\ &= \frac{1 - b(1,292)^3}{\chi^{0,3}} \cdot 1 = \frac{1,4}{\chi^{0,3}}. \end{aligned} \quad (31)$$

Из уравнения (31) коэффициент  $b = -0,185$ . Тогда выражения для градиентов напряжения в дуговом канале  $E_d$  и разрядной напряженности поля по высоте изоляции  $E_H$  запишутся:

$$E_d = \frac{1 + 0,185(L/H - 2,45)^3}{\chi^{0,3}} \quad (32)$$

и

$$E_H = E_L L/H = \frac{1 - 0,29(L/H - 2,45)^3}{\chi^{0,3}} L/H. \quad (33)$$

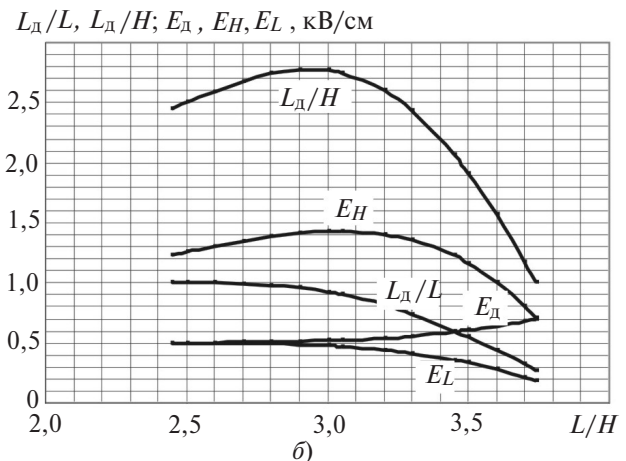
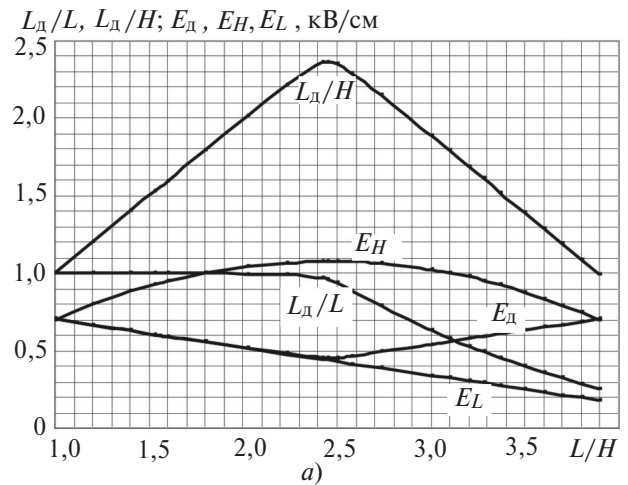


Рис. 4. Влияние  $L/H$  на значения  $L_d/L$ ,  $L_d/H$ ,  $E_d$ ,  $E_L$  и  $E_H$ : а — для изоляторов первой группы; б — второй группы

Учитывая равенство

$$E_L L = E_d L_d, \quad (34)$$

коэффициент эффективности использования каналом разряда длины пути утечки  $K_{эф}$  примет вид:

$$K_{эф} = \frac{L_d}{L} = \frac{E_L}{E_d} = \frac{1 - 0,29(L/H - 2,45)^3}{1 + 0,185(L/H - 2,45)^3}. \quad (35)$$

Поскольку длина дугового разряда определяется как

$$L_d = L E_L / E_d, \quad (36)$$

то с учетом (35) для эффективной длины пути утечки справедливо выражение:

$$L_d = L_{эф} = L \frac{1 - 0,29(L/H - 2,45)^3}{1 + 0,185(L/H - 2,45)^3}, \quad (37)$$

а для отношения

$$\frac{L_d}{H} = \frac{E_L}{E_d} L/H = \frac{1 - 0,29(L/H - 2,45)^3}{1 + 0,185(L/H - 2,45)^3} L/H. \quad (38)$$

Рассчитанные по (32), (33), (35) и (38) значения  $E_d$ ,  $E_H$  (при  $\chi=10$  мкСм),  $L_d/L$  и  $L_d/H$  приведены на рис. 4,б.

Из анализа рис. 4,б следует, что в диапазоне изменения  $L/H$  от 2,45 до 2,9 коэффициент эффективности использования каналом разряда длины пути падает незначительно (с 1,0 до 0,96), в то время как при дальнейшем росте  $L/H$  вплоть до 3,74 наблюдается существенное снижение  $K_{эф}$  до 0,27.

Кривая градиентов напряжения в канале дуги  $E_d = F(L/H)$  имеет возрастающий характер, а кривые  $L_d/H = F(L/H)$  и  $E_H = F(L/H)$  при  $L/H$  в области 3,0÷3,1 приобретают максимальные значения.

Отмеченные закономерности функций  $L_d/H = F(L/H)$ ,  $E_H = F(L/H)$  и  $K_{эф} = L_d/L = L_{эф}/L = F(L/H)$  свидетельствуют о нецелесообразности изготовления и использования изоляторов второй группы со значениями  $L/H$ , заметно превышающими 3,1.

**Выводы.** 1. В качестве физически обоснованного параметра при выборе габаритов загрязненных опорных изоляторов вместо нормируемой поныне длины пути утечки  $L$  предлагается использовать эффективную длину пути утечки  $L_{эф}$ , под которой понимается длина дугового разряда в завершающей его стадии  $L_d$ .

2. Выполненные расчетные оценки  $L_{эф}$  и связанного с ней коэффициента эффективности использования каналом разряда длины пути утечки  $K_{эф} = L_d/L$  свидетельствуют, что лишь при относительно небольших значениях отношения  $L/H$  ( $L/H \approx 2,45$  – для изоляторов первой группы и  $L/H \approx 3,1$  – для изоляторов второй группы) значение  $K_{эф}$  близко к 1,0.

3. Наибольшая электрическая прочность изоляторов достигается при  $(L/H)_{опт} = 2,45$  – для изоляторов первой группы и  $(L/H)_{опт} = 3,1$  – для изоляторов второй группы. Превышение значений  $L/H$  сверх оптимальных значений сопровождается быстрым снижением  $K_{эф}$ , приводящим к существенному спаду электрической прочности загрязненной изоляции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 9920-89. Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции.
- Корявин А.Р. Проблемы выбора внешней изоляции для работы в условиях загрязнения. — Электричество, 2017, № 4, с. 22–30.
- Остапенко Е.И., Годулян В.В., Мерхалев С.Д., Соломоник Е.И. Практика СССР по проектированию и выбору изоляции для загрязненных районов. — Электротехника, 1986, № 3, с. 23–26.
- Годулян В.В., Трифонов В.З., Остапенко Е.И., Волкова О.В., Корявин А.Р. Электрическая прочность аппаратной изоляции сверхвысокого напряжения в условиях загрязнения. — Электротехника, 2004, № 2, с. 8–12.
- Электрическая прочность внешней изоляции /Под ред. О.В. Волковой, А.Р. Корявина — М.: Знак, 2006, 388 с.
- IEC/TS 60815-1: 2008. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions. Part 1: Definitions, information and general principles; Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems; Part 3: Polymer insulators for a.c. systems.
- ГОСТ Р 56736-2015. Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях. Выбор и определение размеров. Ч. 1. Определения, информация и общие принципы; Ч. 2. Керамические и стеклянные изоляторы для систем переменного тока; Ч. 3. Полимерные изоляторы для систем переменного тока.
- Gutman I.Yu., Kinevsky V.R., Trifonov V.Z., Vladimirovsky L.L., Yashin Yu.N. Dielectric strength of polluted EHV insulation. 1988 CIGRE Session, report 33-08.

[28.09.2017]

*А в т о р: Корявин Алексей Родионович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1971 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Физические и инженерные основы создания внешней изоляции электрооборудования сверхвысокого и ультравысокого напряжения». Начальник сектора Всероссийского электротехнического института.*

## Estimation of Effective Creepage Distance of Support Insulators in Polluted Conditions

**KORYAVIN Aleksei R.** (*All-Russian Electrical Engineering Institute, Moscow, Russia*) – *Head of the Sector, Dr. Sci. (Eng.)*

*Estimations of effective creepage distance  $L_{ef}$  which is understood as the length of the arc channel at the final stage  $L_{arc}$  were settled for a wide range of polluted support insulators. It is shown, that only at relatively small values of the relation of creepage distance to height of insulators  $L/H$  the arc channel is distributed along all the creepage distance or its larger part ( $L_{arc} \approx L$ ). When relation  $L/H$  is exceeding the critical value then  $L_{ef}$ , and connected to it effectiveness factor of creepage distance use  $K_{ef} = L_{arc}/L$  are quickly falling. Considering practically equal values of electric strength of the polluted insulation and a voltage drop in the arc channel in its final stage effective creepage distance, instead of creepage distance that is used in domestic and foreign normative documents by now, can be used as physically proved parameter at a choice of dimensions of the polluted insulators.*

**K e y w o r d s:** *support insulators, pollution, electric strength, effective creepage distance*

### REFERENCES

1. **GOST 9920–89.** *Elektrostanovki peremennogo toka na napryazheniya ot 3 do 750 kV. Dlina puti utechki* (Electrical installations of alternating current for voltage from 3 to 750 kV. Creepage distance).
2. **Koryavin A.R.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 4, pp. 22–30.
3. **Ostapenko Ye.I., Gadulyan V.V., Merkhalev S.D. and Solomonik Ye.I.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1986, No. 3, pp. 23–26.
4. **Godulyan V.V., Trifonov V.Z., Ostapenko Ye.I., Volkova O.V., Koryavin A.R.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2004, No. 2, pp. 8–12.
5. **Elektricheskaya prochnost' vneshnei izolyatsii/Pod red. O.V. Volkovoi, A.P. Koryavin** (Electrical strength of external isolation/Edit. by O.V. Volkova and A.R. Koryavin. Moscow, Publ. «Znack», 2006, 388 p.
6. **IEC/TS 60815-1:** 2008. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions. Part 1: Definitions, information and general principles; Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems; Part 3: Polymer insulators for a.c. systems.
7. **GOST R 56736–2015.** *Izolyatory vysokogo napryazheniya dlya raboty v zagryaznennykh usloviyakh. Vybór i opredeleniya razmerov. Part 1. Opredeleniya, informatsiya i obschiye printsipy; Part 2. Keramicheskiye i steklaynnyye izolyatory dlya system peremennogo toka; Part 3. Polimernyye izolyatory dlya system peremennogo toka* (High-voltage insulators for work in polluted conditions. Selection and definition of parameters. Part 1. Definition information and general principles; Part 2. Ceramic and glass insulators for AC systems; Part 3. Polymer insulators for AC systems).
8. **Gutman I.Yu., Kinevsky V.R., Trifonov V.Z., Vladimirsky L.L., Yashin Yu.N.** Dielectric strength of polluted EHV insulation. 1988 CIGRE Session, report 33-08

[28.09.2017]