

Оценка термоупругих напряжений в фарфоровом проходном изоляторе

Ким Ен Дар, д.т.н.

На примере проходного изолятора ИПУ10/630-7,5М показана возможность усталостного разрушения фарфорового элемента вследствие статических и кратковременных термоупругих напряжений, обусловленных нагревом токопровода. Расчет температурного поля изолятора выполнялся с использованием в качестве граничных условий результаты испытаний изолятора на нагрев номинальным током.

Фарфоровые проходные изоляторы используются в качестве соединительного элемента высоковольтного оборудования, находящегося в закрытых помещениях, с открытыми распределительными устройствами или линиями электропередачи переменного напряжения от 6 до 35 кВ. С учетом условия эксплуатации проходные изоляторы нормируются не только по механической изгибающей прочности, но и на стойкость к термическим воздействиям. Так, согласно с действующим техническим требованиям [1], изолятор должен выдержать термическую нагрузку без повреждения, обусловленную нагревом токопроводника длительным номинальным током и кратковременным током, в 25 раз превышающим номинальную величину.

По имеющимся сведениям нередко отмечаются случаи выхода со строя проходных изоляторов по причине разрушения фарфорового элемента, несмотря на то, что они

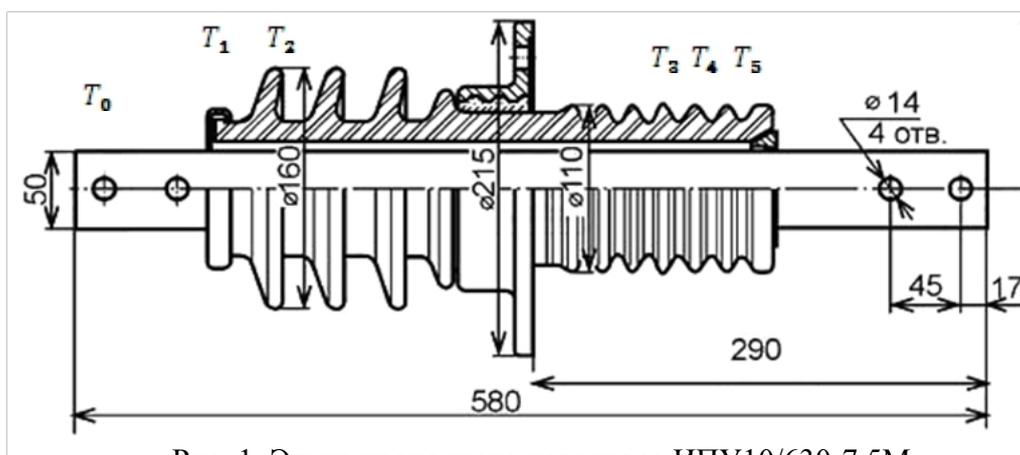


Рис. 1. Эскиз проходного изолятора ИПУ10/630-7,5М

эксплуатировал
ись практически
без
механической
нагрузки. В
связи с этим
возникает
вопрос, не
являются ли
такого рода
отказы

изоляторов последствием воздействия температурного фактора.

Для примера выполним вначале расчет температурного поля проходного изолятора ИПУ10/630-7,5М (рис.1), соответствующего номинальному току, $I_{н} = I_{н} = 630$ А. Для

приближенной оценки воспользуемся пакетом программ расчета статического температурного поля, основанного на методе конечных элементов. Заменяем токопровод прямоугольного сечения на цилиндрическое с эквивалентным сечением и рассмотрим стационарное температурное поле проходного изолятора в осесимметричной постановке задачи:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

В качестве граничных условий воспользуемся данными измерений температуры на отдельных участках изолятора, выполненных в процессе испытаний на термическую устойчивость изолятора: $T_0 = 75$ $T_0 = 75$ °С – температура токопровода из алюминия;
 $T_4 = 36$

$$T_1 = 42 \quad T_1 = 42 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_2 = 35 \quad T_2 = 35 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_3 = 32 \quad T_3 = 32 \quad ^\circ\text{C};$$

$$T_4 = 36$$

°С; $T_5 = 40$ $T_5 = 40$ °С – температура на поверхности фарфорового элемента (см. рис.1). Температура окружающей среды при проведении испытания составляло около 20 °С. Коэффициенты теплопроводности λ λ материалов, необходимые для расчета температурного поля были взяты из справочных данных и приведены в таблице:

Материал	Фарфор, Ф	Алюминий, А	Цементная связка, Ц	Воздух, В
$\lambda, \lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	1,0	230	1,8	0,02 ÷ ÷ 0,03

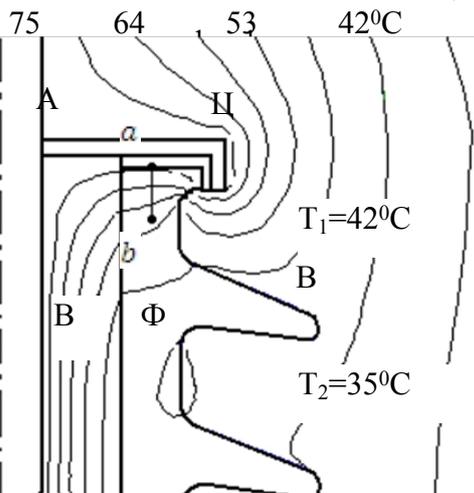
С учетом того, что с нагревом воздуха его теплопроводность несколько увеличивается, при расчете было принято λ λ для внутренней области изолятора равной 0,03 $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, а для наружной области - 0,02 $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Результаты расчета поля для наглядности представлены на рис. 2 в виде линий равной температуры с одинаковым шагом $\Delta T = 5,5$ $\Delta T = 5,5$ °С. На этом рисунке буквами А, Ц, Ф и В обозначены материалы расчетных областей, приведенные в таблице.

Результаты расчета показали, что:

- температура алюминиевых торцевых элементов, находящихся в непосредственном

контакте с токопроводом практически равна температуре токопровода;

- наличие тонкой цементной прослойки, используемой для крепления торцевого фланца с



том, почти не влияет на процесс теплопередачи между металлом и

ки напряженными участками в фарфоре являются контактные зоны с
ескими элементами из алюминия $(a - b)$ и $(c - d)$ $a - b)$ и $(c - d)$;

На рис. 3 приведены распределения температуры в теле фарфора на
участках $(a - b)$ и $(c - d)$. $a - b)$ и $(c - d)$. По данным расчета
теплового поля оценим напряжения на растяжение в фарфоре, как
наиболее опасные для материала, вызванные соответствующими
температурными градиентами на этих участках. Так, на участке $($

$a - b)$ $a - b)$ определим напряжение растяжения вдоль оси
изолятора $(\sigma_{1z}) \sigma_{1z}$, а на участке $(c - d)$ - $(c - d)$ - окружное
(кольцевое) и осевое напряжения $(\sigma_1(\theta,) \sigma_{1z}) \sigma_1(\theta,) \sigma_{1z}$.

Упростим распределение температуры фарфорового элемента
(рис. 3) на участке $(a - b)$ $(a - b)$ линейной функцией:

$$t_{z(a-b)} = \frac{(T_a - T_b)z}{L_{ab}} \quad (2)$$

где $L_{ab} - L_{ab}$ - длина рассматриваемого участка;

$z \in 0 \div L_{ab} - z \in 0 \div L_{ab}$ - текущая координата рассматриваемого

Рис. 2. Температурное поле изолятора при длительном участке номинальном токе

Тогда для напряжения растяжения, обусловленного температурным градиентом,
получаем следующее соотношение:

$$\sigma_{z(a-b)} = \frac{\alpha E(T_a - T_b)z}{2L_{ab}} \quad (3)$$

Для оценки термоупругих напряжений на участке воспользуемся известным
решением, полученным для толстостенных труб [2]:

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E(T_c - T_d)}{2(1 - \mu)(d^2 - c^2) \ln d} \left[\frac{d^2 \left(1 - \frac{\ln d}{r}\right) - c^2 \left(1 - \frac{\ln c}{r}\right) - \frac{c^2 d^2}{r^2} \ln d}{c} \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E(T_c - T_d)}{2(1-\mu)(d^2 - c^2) \ln d} \left[d^2 \left(1 - \frac{2 \ln d}{r} \right) - c^2 \left(1 - \frac{2 \ln c}{r} \right) \right], \quad (5)$$

где для рассматриваемой задачи имеем: $c = 45 \text{ мм}$ $c = 45 \text{ мм}$ – как внутренний радиус

$d = 55 \text{ мм}$ $d = 55 \text{ мм}$ – как усредненный наружный радиус

на участке (см. рис.2); $r \in 45 \div 55 \text{ (мм)}$ $r \in 45 \div 55 \text{ (мм)}$ –

В последнее время для изготовления высоковольтных изоляторов применяют фарфор группы С130, для которого приняты следующие усредненные физико – механические характеристики [3]: $\alpha = 6 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ коэффициент линейного расширения; $E = 120 \text{ ГПа}$ $E = 120 \text{ ГПа}$ – модуль упругости; предельное напряжение материала на растяжение;

$\mu = 0,27$ $\mu = 0,27$ – коэффициент Пуассона фарфора.

В соответствии с формулой (3) для приведенных характеристик и температурного градиента наибольшее

напряжение на первом участке из (3) получаем: $\sigma_{zm(a-b)} = 8,64 \text{ МПа}$. $\sigma_{zm(a-b)} = 8,64 \text{ МПа}$.

Распределение напряжений на участке $(c - d)$, вычисленных $(c - d)$, вычисленных по формулам (4) и (5), представлено на рис. 4. Из этого рисунка вытекает, что внутренняя поверхность диэлектрика подвергается напряжению сжатия, а верхняя находится под воздействием растягивающих напряжений. При этом максимальные значения растягивающих напряжений по окружности фарфорового элемента и вдоль его оси приблизительно равны между собой и составляют: Таким образом, полученные значения достигают до 25% предельного для фарфора напряжения.

Как показывают испытания с сильными кратковременными токами $(25 \times I_{1н})$, $\times I_{1н}$, при которых моделируются режимы короткого замыкания, наибольшие температурные градиенты отмечаются на тех же торцевых участках фарфорового элемента, но при этом их величины в несколько раз превосходили градиенты стационарного режима испытания. Очевидно, что в такой же пропорции подвергается фарфор повышенному напряжению в течение нескольких секунд. В реальных условиях эксплуатации нагрузка на изолятор по току заметно ниже чем предусмотрена при испытаниях, но тем не менее на основании выполненных расчетов можно полагать, что термоупругие напряжения будут значимы, поэтому нельзя ими пренебречь.

Известно [4], что в твердом теле, находящемся под действием растягивающего

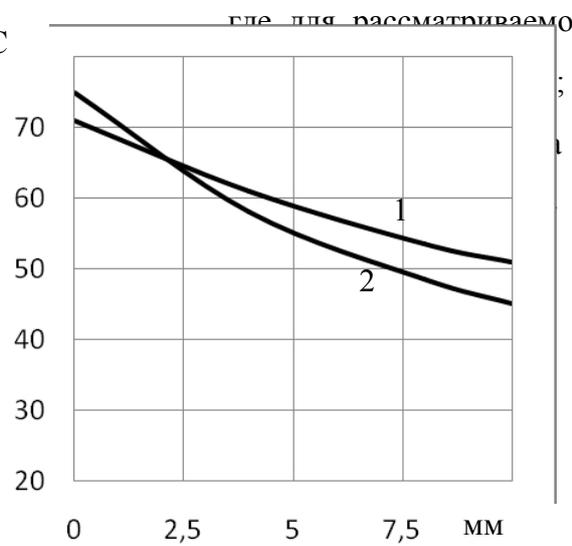


рис. 3. Распределение температуры в фарфоре на участках: 1- $(a - b)(a - b)$; 2- $(c - d)(c - d)$

напряжения, возможны области с локальным напряжением, обусловленным нарушением однородности структуры в виде микротрещин. Так, согласно Инглиса локальное напряжение зависит от конфигурации трещины и может многократно превышать среднее напряжение в ее окрестности:

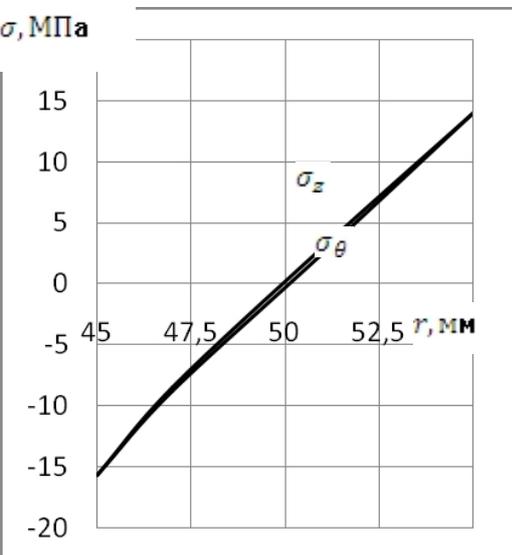


Рис.4. Распределение напряжений растяжения в фарфоре на участке $(c - d)(c - d)$

длина трещины; $d - d$ — диаметр края трещины.

Высокое локальное напряжение, величина которого может превысить предельную для материала прочность, еще не определяет целиком состояние изделия или объекта. Согласно теории разрушения механическое повреждение твердого тела рассматривается как процесс возникновения хотя бы одной трещины и ее распространения, при котором образуются новые поверхности, разделяющие материала на части. Чтобы таким путем произвести в материале разрыв и образовать эти поверхности, потребуется определенное количество энергии, которое черпается из запасенной

в теле упругой энергии. Очевидно, чем значительнее трещина и чем в большем растягивающем состоянии находится тело, тем скорее прорастает трещина до предельной величины. Взаимосвязь между глубиной трещины, свойством материала и уровнем напряженного состояния, иными словами, условие развития трещины можно оценивать соотношением Гриффитса:

где: w_0 — минимальная начальная глубина трещины; $w - w_0$ — удельная поверхностная энергия разрыва всех связей в поперечном сечении (коэффициент поверхностного натяжения материала); σ — среднее напряжение растяжения в окрестности трещины.

В процессе изготовления деталей из фарфора наличие нерастворенных кристаллитов кварца может привести к образованию внутренних напряжений и соответствующих микротрещин, величина которых определяется размерам кристаллитов кварца. Это происходит в результате резкого изменения объема изделия при охлаждении его в печи. Что же касается величины w, w_0 , то для большинства твердых хрупких тел, используемых в технике, удельные энергии разрыва весьма близки между собой и не сильно отличаются от величины 1 Дж/м² [4].

Подставляем известные значения в критерий Гриффитса (7), получаем:

Размеры микропор в керамических материалах, как правило, не превышают 10 мкм. Более крупные, протяженные дефекты могут возникать в материале как следствие слияния мелких пор в процессе изготовления, если имеет место отклонения от технологического регламента или под влиянием случайных внешних факторов. Иными словами, вероятность появления относительно крупных трещин порядка 100 и более микрон для хрупких керамических материалов всегда существует, поэтому нельзя исключить процесс постепенного разрушения рассматриваемого изолятора под воздействием статических и кратковременных термоупругих растягивающих напряжений. Здесь следует также отметить, что, исходя из критерия Гриффитса, с увеличением глубины разрушения процесс пойдет все ускореннее при одном и том же напряжении растяжения. Или же, чтобы поддерживать постоянную скорость продвижения трещины понадобится все меньшее и меньшее напряжение на разрыв.

С точки зрения механики разрушения практически интерес представляет возможность замены хрупких элементов изделия на эквивалентные, изготовленные из более пластичного материала. Дело в том, что при равных прочностных характеристиках энергия, необходимая для образования трещины и его развития в пластических телах существенно больше чем в хрупком материале. Так, например, смолы полиэфирные и эпоксидные используемые при изготовлении стеклопластиковых труб и стержней имеют такую же прочность на разрыв что и фарфор. В тоже время удельная энергия на развитие трещины, что по сути является энергией разрушения изделия, оценивается величиной 100 Дж/м² [4], что на два порядка больше, чем у фарфора. Вследствие этого можно прогнозировать, что при замене в проходном изоляторе фарфорового диэлектрика аналогичным элементом, например, из стеклопластикового материала механическое разрушение, обусловленное нагревом токопровода, практически можно исключить.

Заключение.

Фарфоровый элемент проходного изолятора находится под статическим и кратковременным термоупругим растягивающим напряжением, величина которого в среднем меньше, чем предельная для фарфора удельная прочность.

Вместе с тем повреждение фарфорового элемента возможно при наличии в теле диэлектрика микронеоднородностей в виде трещин с глубиной десятки, сотни микрон.

Одним из технических решений по повышению механической прочности проходных изоляторов представляется замена диэлектрика из хрупкого фарфора равноценным по

назначению элементом из пластического материала, например, стеклопластиковым толстостенным цилиндром.

Литература

1. ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний
2. Ван Цзи-Де. Прикладная теория упругости. Издательство физико-математической литературы. М-1959, С. 400.
3. ГОСТ 20419-83. Материалы керамические электротехнические
4. Дж. Гордон. Конструкции, или почему не ломаются вещи. 1978

Дані автора

Кім Єн Дар, д.т.н., професор УПА

84122, г. Слов'янськ, Донецька обл., вул. К. Маркса, буд. 44, кв. 40