

КИМ ЕН ДАР, д-р техн. наук, дир. АО «Социо», Киев;

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКОПРОВОДА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

На основе решения уравнения теплопроводности даны аналитические соотношения для расчета радиального температурного поля в проходном изоляторе, обусловленного протеканием с учетом скин-эффекта тока по токопроводу. Дано аналитическое соотношение между радиальными геометрическими параметрами проходного изолятора и допустимым по условию нагрева номинальным током.

Ключевые слова: проходной изолятор, токопровод, температуропроводность, допустимый ток, условие нагрева

Токопроводы проходных высоковольтных изоляторов с полимерной изоляцией имеют цилиндрическую форму и выполняются из алюминия или меди. Изоляционное тело состоит из двух элементов: из прочной опорной цилиндрической втулки, представляющей собой стеклопластиковую трубу, и из эластичной изоляции, например, из кремнийорганической резины. Резиной целиком заполняется пространство между токопроводом, опорной втулкой и фланцем. Внешняя поверхность втулки покрывается защитной оболочкой из той же резины монолитно со слоем под фланцем. Таким образом, проходной изолятор можно представить как изоляцию цилиндрического конденсаторного типа.

Одним из методов оценки надежной работы проходных изоляторов является испытание на нагрев пропусканием по токопроводу длительного номинального тока I_n до установления равновесного теплового состояния, и затем воздействием кратковременным током $I_{кр}$ промышленной частоты. Если не оговорены иные требования, то согласно действующим стандартам [1, 2] изолятор с номинальным током $I_n < 4000$ А должен выдержать протекание тока $I_{кр}$, равного 25-кратной величине номинального тока I_n с длительностью $t_{кр} = 1$ с, для изоляторов с $I_n > 4000$ А – $I_{кр} = 100$ кА, $t_{кр} = 1$ с.

Испытание должно проводиться в помещении с температурой воздуха не менее $T_v = 40$ °С. Испытуемый объект считается успешно прошедшим испытание, если не обнаружены видимые повреждения и при этом установившаяся температура токопровода $T_{т.н}$ при номинальном токе не превысила 90 °С, а после наложения кратковременного сильного тока токопровод не нагрелась свыше 180 °С:

$$T_v \leq 90 \text{ °С}; \quad T_{т.н} \leq 180 \text{ °С}. \quad (1)$$

© Ким Ен Дар, 2013

Цилиндрическая геометрия изолятора позволяет нам упростить исследование теплового поля и ограничиться рассмотрением

дифференциального уравнения теплопроводности для осесимметричной задачи, в общем случае, нестационарного режима с внутренним источником теплоты

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q_0}{c\sigma}, \quad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности; q_0 – удельная по объему энергия внутреннего источника, выделяемая за единицу времени; c – удельная по массе теплоемкость; σ – плотность вещества.

Поскольку длина l проходного изолятора намного больше среднего его диаметра, то для приближенной оценки температурного распределения можно пренебречь теплообменом с торцов изолятора и слагаемую по z в уравнении (2) принять равной нулю.

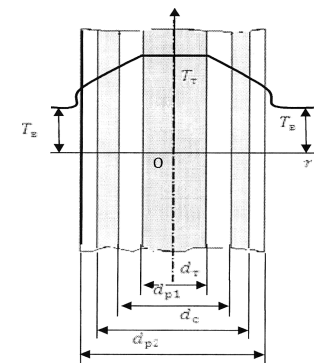


Рис. 1 – Расчетная модель проходного изолятора

Рассмотрим вначале теплопередачу для бесконечно длинного многослойного цилиндра (рис. 1) в стационарном режиме. При этом уравнение (2) упрощается к следующему виду:

$$\alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \frac{q_0}{c\sigma} = 0. \quad (3)$$

Для исследования теплового состояния можно воспользоваться известным решением [3], полученным для граничных условий третьего рода, когда теплота отводится только через наружную поверхность, при этом коэффициент теплопередачи α_v и температура окружающей среды T_v

сохраняются постоянным. А на границах слоев соблюдается условие сохранения линейной плотности теплового потока q_l :

$$q_l = \pi d_1 q_1 = \pi d_2 q_2 = \dots, \quad (4)$$

$$q_l = q_0 \cdot V_0 / l; \quad (5)$$

где V_0 и l – объем и длина реального источника тепла, в данном случае, токопровода; q_1, q_2, \dots – поверхностная плотность теплового потока на границах слоев.

Если принимается допущение о независимости теплофизических параметров материалов изолятора от температуры, то решение уравнения (3) приводит к следующим соотношениям для расчета температур на границах раздела слоев:

$$\left. \begin{aligned} T_{p1} &= T_g + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_{p1} d_{p2}}{d_r d_c} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_r}{d_{p1}} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}} \right) \\ T_c &= T_g + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_r}{d_{p1}} + \frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_{p2}}{d_r} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}} \right) \\ T_{p2} &= T_g + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_{p2}}{d_r} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}} \right) \\ T_{p3} &= T_g + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_g d_{p2}} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где $T_{p1}, T_c, T_{p2}, T_{p3}$ – температуры на границах токопровод–резина при d_r , резина–стеклопластиковая труба при d_{p1} , стеклопластиковая труба–резина при d_{p1} , резина–воздушная среда при d_{p2} соответственно (см. рис. 1); λ_p, λ_c – коэффициенты теплопроводности резины и стеклопластика соответственно; α_g – коэффициент температуропередачи воздуха.

В формулах (6) выражения в скобках представляют собой термические сопротивления на единицу осевой длины между внешней средой и до той границы, на которой определяется температура.

По аналогии с (6) температуру токопровода можно определить через общее для изолятора термическое сопротивление $R_{\tau l}$:

$$T_{\tau n} = T_b + \frac{q_l}{\pi} R_{\tau l}; \quad (7)$$

$$R_{\tau l} = \frac{1}{\alpha_r d_r} + \frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_{p1} d_{p2}}{d_r d_c} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_c}{d_{p1}} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}}. \quad (8)$$

Установим взаимосвязь между линейной плотностью теплового потока q_l и номинальным током I_n с учетом скин-эффекта. Согласно теории распространения электромагнитного поля глубина проникновения

поля в проводящую среду зависит от частоты волны f . При удалении от поверхности проводника она убывает и на глубине θ становится меньше в e раз. На практике принято, что весь ток сосредоточен в слое толщиной θ [4]:

$$\theta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu \mu_0}}, \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ф/м – магнитная постоянная вакуума; μ – магнитная проницаемость проводника.

С учетом последнего получаем формулу для расчета линейной плотности источника теплового потока, соответствующую номинальному току

$$q_l = \frac{\rho I_n^2}{S_s}; \quad (10)$$

где $S_s = \pi \theta (d_r - \theta)$ – эквивалентная площадь сечения проводника.

Как можно видеть из табл. 1 коэффициенты теплоотдачи α у металлов существенно выше, чем у воздуха, вместе с тем коэффициенты теплопроводности резины и стеклопластика близки между собой. Поэтому для инженерного расчета можно воспользоваться упрощенной формулой термического сопротивления изоляции:

$$R_{\tau l} \approx \frac{1}{2\lambda_s} \ln \frac{d_{p2}}{d_r} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}}. \quad (11)$$

В этой формуле в качестве λ_s предпочтительнее принять либо коэффициент теплопроводности резины, если ее толщина заметно больше толщины стеклопластиковой трубы; либо среднюю величину коэффициентов этих двух материалов, если их толщины существенно не разнятся между собой.

Рассмотрим нагрев изолятора кратковременным сильным током.

Из анализа нестационарных тепловых задач [3] вытекает, что процесс охлаждения твердых тел происходит по экспоненциальной зависимости $\exp\left(-\mu_1^2 \frac{at}{b}\right)$ с показателем, определяющим по сути от коэффициента

температуропроводности окружающей нагретого объекта среды a и от характерного геометрического параметра этого объекта b . В данном случае $a = a_p$ или a_c – коэффициент температуропроводности резины или стеклопластика (см. табл. 1) и $b = d_r / 2$ – радиус токопровода. Можно показать, что для рассматриваемой задачи число $\mu \approx 1,53$, и, таким образом, теплоотводом, протекающим в течение даже нескольких десятков секунд можно пренебречь.

Таблица – Удельные характеристики материалов

Материал	Алюминий	Медь	Стеклопластик	Резина	Воздух
Уд. сопротивление ρ , Ом·м	$2,71-2,87 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{16}$
Уд. вес σ , кг/м ³	2700-2800	8960	1800	957-1090	1,1-1,2
Кэф. теплопр. λ , Вт/м·К	209	393	0,35-0,43	0,15	0,02-0,03
Уд. теплоемк. c , Дж/кг·°С	920	400	920	1,46	1000
Кэф. теплоотд. α , Вт/м ² ·К	220	410		13	6,9
Кэф. температ. a , м ² /с	$8,42 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$

Следовательно, нагрев токопровода сильным током протекает, практически, мгновенно без каких-то ни было потерь, по этой причине общее уравнение теплопередачи (2) можно упростить к следующему виду:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_0}{c_T \rho} \quad (12)$$

Откуда получаем выражение для оценки наибольшей температуры токопровода при воздействии кратковременного тока:

$$T_{Т.М} = T_{Т.Н} + \frac{q_0}{c_T \rho} \Delta t, \quad (13)$$

где $T_{Т.Н}$ – начальная температура, равная температуре токопровода при номинальном токе, см. формулу (7); $\Delta t = t_{кр}$ – длительность протекания сильного тока.

Воспользовавшись соотношениями (5) и (10) и с учетом поверхностного эффекта (9), запишем формулу для оценки температуры токопровода, обусловленного протеканием кратковременного тока в следующем виде

$$T_{кр} = \frac{q_0}{c_T \rho} \Delta t = \frac{\rho}{c_T \rho} \frac{I_{кр}^2}{S_T S_s} \Delta t, \quad (14)$$

где S_T – площадь сечения токопровода.

На рис. 2 дан пример расчета по формулам (7) и (13) температуры токопровода моделей полимерного проходного изолятора с различными

номинальными токами. Толщины изоляционных слоев моделей соответствовали изоляторам на 35 кВ, расчет выполнялся для внешней среды, $T_г = 40^\circ\text{C}$. Кривые верхнего рис. 2 соответствуют длительным номинальным токам I_n (7), а кривые нижнего рисунка – длительным и кратковременным токам (13), равным $I_{кр} = 25 I_n$ и $\Delta t = 1$ с.

Анализ приведенных зависимостей (рис. 2) показывают, что, если выбранный токопровод удовлетворяет условию нагрева номинальным током: $T_{Т.Н} \leq 90^\circ\text{C}$, то такой токопровод также удовлетворяет условию последующего нагрева кратковременным током: $T_{Т.М} \leq 180^\circ\text{C}$. Вследствие такого обстоятельства при выборе диаметра токопровода достаточно ориентироваться на условие допустимого нагрева номинальным током.

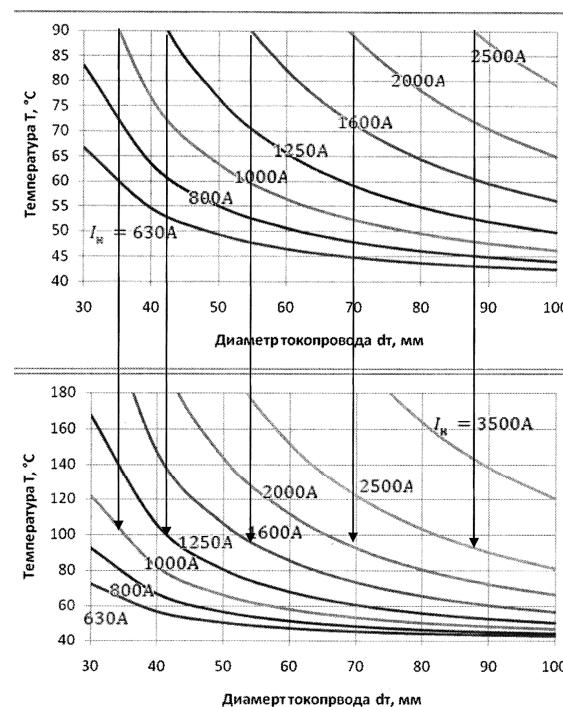


Рис. 2 – Зависимости температуры токопровода от его диаметра при различных значениях номинального тока

Если известны характеристики материалов изоляции и токопровода, то из (7) можно установить оптимальную по условию нагрева (1) область

основных геометрических параметров изолятора, соответствующих заданным номинальным токам. Внешний диаметр d_{p2} цилиндрической части проходного изолятора определяется внутренним диаметром фланца, что в свою очередь выбирается из условия обеспечения необходимой внутренней электрической прочности изолятора. Поэтому есть смысл ввести новый параметр, косвенно, характеризующий внутреннюю прочность $h_{из} = d_{p2} - d_T$.

Полагаем, что температура воздушной среды $T_B = 0$. Соответственно, допустимая температура токопровода равна $T_{Т.д} = 50$ °С. Примем упрощенную формулу (11) для термического сопротивления изолятора, тогда из (7) получаем следующее соотношение для номинального допустимого тока

$$I_{Т.д} < \pi \sqrt{\frac{2\lambda_3 \cdot \theta(d_T - \theta)T_{Т.д}}{\rho \left[\ln\left(1 + \frac{h_{из}}{d_T}\right) + \frac{2\lambda_3}{\alpha_e(d_T + h_{из})} \right]}}. \quad (15)$$

Например, для изолятора с алюминиевым токопроводом и $\lambda_3 = \lambda_p$ имеем:

$$I_{Т.д} < 7980 \sqrt{\frac{d_T - 0,012}{\ln\left(1 + \frac{h_{из}}{d_T}\right) + \frac{0,0435}{(d_T + h_{из})}}}. \quad (16)$$

Согласно критерию (16) на рис. 3 приведены границы оптимальных соотношений искомых параметров проходного изолятора с полимерной изоляцией.

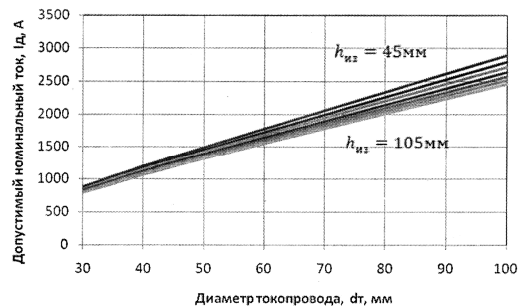


Рис. 3 – Соотношение между допустимым номинальным током, диаметром токопровода и толщиной изоляции

Как можно видеть из этого рисунка, термическое состояние токопровода, практически, линейно зависит от его диаметра, а влияние толщины изоляции отмечается по мере увеличения допустимого

номинального тока. После того как выбран диаметр токопровода по заданному номинальному току, не выходящему за пределы оптимальной области, ожидаемые величины температур токопровода и на границах изоляционных слоев можно вычислить по приведенным ранее формулам.

Выводы. На основе решения уравнения теплопроводности приведены аналитические соотношения для расчета радиального температурного поля в проходном изоляторе, обусловленного протеканием с учетом скин-эффекта тока по токопроводу. Установлено, что, если токопровод изолятора выбран по условию допустимой температуры нагрева при номинальном токе, то такой токопровод заведомо удовлетворяет условию допустимой температуры нагрева при наложении соответствующего кратковременного сильного тока. Дано аналитическое соотношение между радиальными геометрическими параметрами проходного изолятора и допустимым по условию нагрева номинальным током.

Список литературы: 1. IEC 60137:2003. Insulated bushings for alternating voltages above 1 000V. 2. ГОСТ 8024-90 Аппараты и электрические устройства переменного тока на напряжение выше 1 000В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. 3. ГОСТ 22229-83. Изоляторы керамические проходные на напряжение выше 1000 В. Общие технические условия. 3. *Исаенко В. П.* Теплопередача / *В.П. Исаенко, В.А. Осипова, А.С. Сукомэл.* – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с. 4. *Матвеев А.Н.* Электричество и магнетизм / *А. Н. Матвеев.* – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.

Поступила в редколлегию 18.03.2013

УДК 621.315.626.1

Методика расчета токопровода высоковольтных полимерных проходных изоляторов / Ким Ен Дар // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – №17 (990). – С.84-91. Бібліогр.: 4 назв. Табл.: 1. Іл.: 3.

На основе решения уравнения теплопроводности наведены аналитические співвідношення для розрахунку радіального температурного поля в проходному ізоляторі, обумовленого протіканням з урахуванням скин - ефекту струму по струмопроводу. Дано аналітичне співвідношення між радіальними геометричними параметрами проходного ізолятора і допустимим за умовою нагріву номінальним струмом.

Ключевые слова: проходной изолятор, токопровод, температуропроводность, допустимый ток, условие нагрева

Based on the solution of the heat equation and the skin - the effect the analytical relations for calculating the radial temperature distribution in the bushing is given. An analytical relationship between the radial geometric parameters of the bushing and the nominal current that allowable by the heating is given.

Keywords: bushing, conductors, thermal diffusivity, admits timy-current condition heating