

УДК 621.315.62.027.3.004.1.

В. С. Собчук, к. т. н., проф.; Н. В. Собчук, к. т. н., доц.; Е. В. Слободянюк, к. п. н.**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПОРНОГО ИЗОЛЯТОРА С ВНУТРЕННЕЙ АРМАТУРОЙ ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ УСТАНОВКИ**

Проанализированы возможные механизмы образования дефектов изоляции закрытых экранированных токопроводов из-за электрических, механических и тепловых факторов. Предложена математическая модель опорного изолятора с внутренней арматурами для внутренней установки.

Ключевые слова: *изоляция, закрытые экранированные токопроводы, математическая модель изолятора, осесимметричные тела вращения, коаксиальная система, концентраторы механических напряжений.*

Опорные изоляторы с внутренней арматурой используют в комплектных экранированных токопроводах для соединения генератора и трансформатора в единый блок электрических станций.

Надежность изоляции токопроводов в составе блоков должна быть не ниже надежности изоляции генераторов и трансформаторов. Этому требованию не в полной мере соответствует изоляция пофазноэкранированного токопровода типа ТКЭП-6/3200-125 Новоднестровской ГЭС, для которого статистические данные повреждений изоляторов типа ИОР-10-750ШУХЛ2 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Статистические данные повреждений изоляторов типа ИОР-10-750ШУХЛ2

1	Общая длина токопровода, м	Г1-Т1 140	Г2-Т2 125
2	Количество изоляторов в фазе, шт.	130	85
3	Общее количество изоляторов, шт.	390	255
4	Общее количество выключений токопровода за год	13	3
5	Вероятность повреждения за год одного изолятора	0,0333	0,00118

Приведенные в таблицы данные свидетельствуют о низком качестве опорных изоляторов. Поток отказов изоляторов в токопроводе Г1-Т1 в четыре раза больше, чем в Г2-Т2.

Блок пофазноэкранированного токопровода типа ТКЭП-6/3200-125, показанный на рис. 1, имеет для каждой фазы индивидуальные алюминиевые оболочки с сечением в виде правильного восьмиугольника с высокой жесткостью. Фазы токопровода расположены в одной горизонтальной плоскости. Трубчатые шины 2 диаметром 120 мм и толщиной 10 мм крепятся на опорных изоляторах 5. Каждый изолятор крепится сквозь резиновую прокладку болтом к фланцу, который в свою очередь закрепляется на оболочке 1 четырьмя болтами.

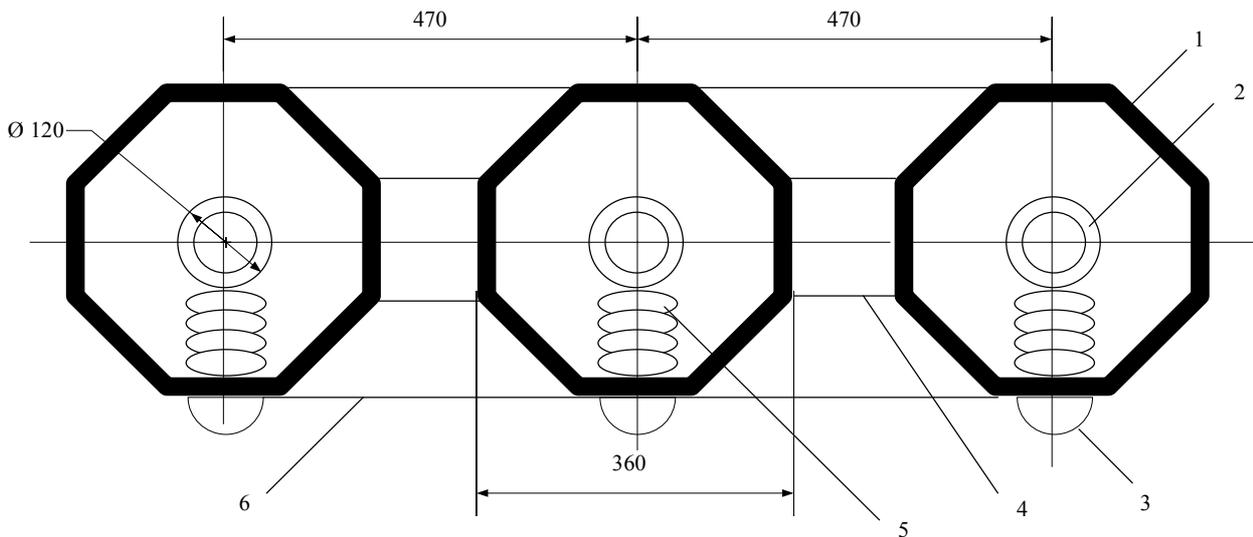


Рис. 1. Токопровод типа ТЗМЭП-6-3150-128У1

Место крепления изолятора закрывается крышкой 3 с резиновой прокладкой. Для усиления мест крепления изоляторов с внутренней стороны экранов приварены бобышки из алюминиевого сплава.

Крепление токопроводов к строительным металлоконструкциям скользящее (свободное) – стальными хомутами. Экраны 1 разных фаз токопроводов соединяются перемычками 4. Фазные оболочки могут объединяться одной общей оболочкой 6.

Такие пофазноэкранированные токопроводы имеют большие габариты по сравнению с токопроводами с общим экраном, и на них расходуется больше металла. Магнитное поле шин этих токопроводов в значительной мере компенсируется магнитными полями токов, которые индуктируются в экранах. Вот почему механические нагрузки, действующие в случае КЗ на шины и изоляторы, здесь меньше. Таким образом, электродинамическая устойчивость пофазноэкранированных токопроводов выше, чем токопроводов с общим экраном.

Известно, что при КЗ температура алюминиевых и медных шин может подниматься до 200 °С и 300 °С соответственно.

Конструкция изолятора типа ИОР-10-750ШУХЛ2, приведенная на рис. 2, состоит из трех соосных цилиндров: внешнего – фарфорового; промежуточного – цементного; внутреннего – металлического. Два первых цилиндра толстостенные, а внутренний состоит из двух сплошных цилиндрических тел из немагнитного серого чугуна марки СЧ, разделенных фарфоровой перемычкой толщиной 25 мм.

Крепление металлической арматуры к фарфоровому телу с помощью цементного раствора осуществляется заполнением кольцевой пустоты между арматурой и фарфоровым телом портландцементным раствором, который состоит из двух частей портландцемента и одной части наполнителя (мелкого речного песка, отмытого от глинистых веществ, или фарфоровой муки), замешанных на воде.

После затвердения портландцементный раствор сцепляется с поверхностью фарфора и арматуры и крепко соединяет их между собой.

Для приготовления раствора используется портландцемент марки не ниже 400 для опорных ребристых изоляторов внутренней установки на 6 – 10 кВ [1].

Предел прочности образцов размером 40×40×160 мм³ после затвердения при сжатии $\sigma_{сж} > 40$ МПа; при статическом изгибе $\sigma_{из} > 5,5$ МПа.

Температурный коэффициент линейного расширения цементной смеси $TK_l = 10 \cdot 10^{-6}$.

Уплотнение цементной смеси после заполнения ею кольцевой пустоты между фарфором

и арматурой достигается кратковременной вибрацией изолятора или же заполнение пустоты цементной смесью осуществляется под давлением 0,2 – 0,3 МПа, что эквивалентно насаживанию цилиндра в цилиндр с натягом.

Неармированные фарфоровые изоляторы не снижают своей механической прочности вследствие действия многих циклов температурных изменений от +50 °С до –40 °С, а также при продолжительном охлаждении до –60 °С.

При изменении температуры армированных фарфоровых изоляторов в местах соединения фарфора с арматурой возникают дополнительные механические напряжения, обусловленные разницей коэффициентов линейного расширения фарфора, цементной смеси и металла арматуры.

Для уменьшения этих дополнительных напряжений поверхности фарфора и арматуры, граничащие с цементной смесью, покрывают слоем компенсирующей промазки толщиной 0,2 – 0,3 мм (асфальтобитумный лак марок БТ-99 или БТ-377). На торцевые поверхности цементного пласта наносится влагостойкое покрытие, например, эмаль ПФ-115. Стоит помнить о том, что цементный слой разрушается под воздействием трансформаторного масла.

Дефекты опорных изоляторов с внутренней арматурой возникают в виде аксиально-радиальных трещин (разломов). В сухом виде электрическое сопротивление изолятора с трещинами не уменьшается, но в случае высокой влажности, характерной для ГЭС, в трещине образуется микропенка воды на обеих поверхностях разлома, в том числе и на фарфоровой перемычке, где длина пути утечки не превышает 25 мм.

У неповрежденного изолятора увлажняется ребристая внешняя поверхность, которая имеет длину значительно большую, чем перемычка, и рассчитана на нормальный уровень изоляции, поэтому перекрытие рабочим напряжением не происходит.

Расчетная средняя влагоразрядная напряженность электрического поля для фарфора составляет величину 2 – 2,5 кВ/см и остается одинаковой для дефектного и бездефектного изоляторов, поэтому остаточный уровень изоляции по увлажненной поверхности перемычки составляет 5 – 6 кВ. Вот почему поток отказов изоляторов ТКЭП 6/3200-125 не уменьшается, не считая постоянные замены дефектных изоляторов новыми.

Есть основания считать, что все изоляторы токопроводов Г1-Т1 и Г2-Т2 имеют дефекты в виде аксиально-радиальных трещин и при увлажнении создают пути для пофазных коротких замыканий. Экспериментальные испытания новых изоляторов «тепловым ударом» в лаборатории техники и электрофизики высоких напряжений Винницкого национального технического университета свидетельствуют о том, что после прохождения тока ОКЗ величиной 31,5 кА по токопроводу температура внутренней арматуры изоляторов достигает 200 °С, вследствие чего фарфоровые детали трескаются с образованием радиально-аксиальной трещины. Эти трещины уменьшают длину пути утечки по ребристой поверхности до величины толщины перемычки (от 180 мм до 25 мм), т. е. в 7,2 раза. В сухом виде изоляторы с такими дефектами сохраняют остаточный уровень изоляции не меньше 30 кВ. В случае увлажнения трещины этот уровень резко снижается до 5 – 6 кВ, т. е. возникает путь для нового ОКЗ. Вследствие этого ОКЗ на все изоляторы фазы действует «тепловой удар» и трескаются последние изоляторы, в том числе и новые, установленные вместо дефектных. Таким образом, можно считать, что все изоляторы этого типа в комплектных экранированных токопроводах Новоднестровской ГЭС являются дефектными: с характерным дефектом – радиально-аксиальной сплошной трещиной. Радикально исправить ситуацию можно немедленной заменой всех изоляторов данного типа на такие, в которых $\Omega < 2$, или $k < 0,57731$. Входной контроль этих изоляторов надо осуществить по методике, приведенной в данной статье.

Для теоретических исследований предложена математическая модель опорного изолятора с внутренней арматурой, разработанная учеными в области сопротивления материалов [1].

При посадке одного цилиндра в другой с натягом круговые напряжения во внутреннем цилиндре являются сжимающими, а во внешнем – растягивающими. Эпюры распределения механических напряжений, возникающие после посадки, представлены на рис. 2.

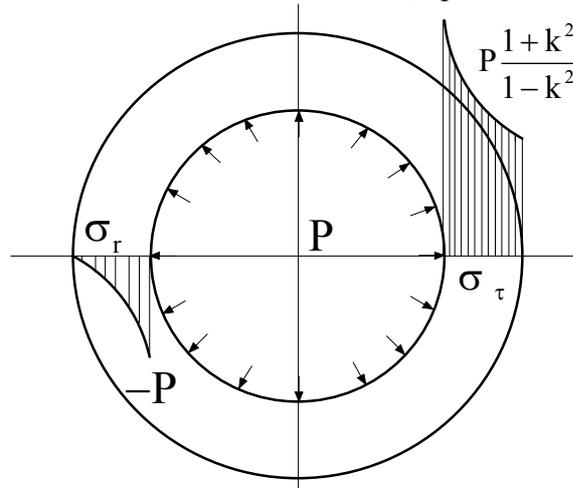


Рис. 2. Эпюры распределения механических напряжений в изоляторе ИОР

Опорный изолятор как сложный цилиндр при изменении температуры внутреннего цилиндра, вследствие ОКЗ в токопроводе, создает во внешнем фарфоровом цилиндре дополнительно растягивающие круговые и сжимающие радиальные напряжения (см. рис. 2). Эти напряжения описывают по формулам:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) p, \quad (1)$$

$$\sigma_\tau = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) p, \quad (2)$$

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 p}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} p \cdot \frac{1}{r}. \quad (3)$$

Напряжение σ_r всюду сжимающее, а σ_τ – растягивающее. Наибольшие величины σ_r и σ_τ будут возле внутренней поверхности цилиндра при $r = r_1$:

$$\sigma_{r(r=r_1)} = -p; \quad (4)$$

$$\sigma_{\tau(r=r_1)} = \frac{1 + k^2}{1 - k^2} \cdot p, \quad (5)$$

где $k = r_1/r_2$.

Радиальный сдвиг возле внутренней поверхности (увеличение внутреннего радиуса)

$$u = \frac{r_1}{E} \cdot \left(\frac{1 + k^2}{1 - k^2} + \mu \right) \cdot p. \quad (6)$$

Известно [1], что цилиндр с толстой стенкой не выдерживает внутреннего давления больше величины $[\sigma]/2$. Подстановка этого критерия в формулу (5) дает соотношение

$$\sigma_{\tau_{крит}}(r=r_1) = \frac{1 + k^2}{1 - k^2} \cdot \frac{\sigma_{\tau_{крит}}}{2},$$

или $\frac{1+k^2}{1-k^2} \leq 2$, а $k \leq 0,57731$.

Напряжения и сдвиги возле внешней поверхности цилиндра при $r = r_2$:

$$\sigma_{r(r=r_2)} = 0; \quad (7)$$

$$\sigma_{\tau(r=r_2)} = \frac{2k^2}{1-k^2} \cdot p; \quad (8)$$

$$u_{r=r_2} = \frac{r_2}{E} \cdot \frac{2k^2}{1-k^2} \cdot p. \quad (9)$$

Эпюры механических напряжений, приведенные на рис. 2, изменяются по гиперболическому закону. Самой опасной для разрушения является точка, которая находится возле внутренней поверхности фарфорового цилиндра.

Круговые напряжения от внутреннего давления будут суммировать с напряжениями от посадки в фарфоре и вычитать от них во внутреннем цилиндре. Радиальные напряжения от внутреннего давления и давления посадки суммировать в обоих цилиндрах.

Суммарные эпюры напряжений после прикладывания давления имеют вид, представленный на рис. 2. Характерным тут является скачок в эпюре σ_r и перелом в эпюре σ_{τ} на радиусе контакта цилиндров. Известно [2], что фарфор имеет значительно меньшую прочность на растяжение, чем на сжатие, поэтому радиально-аксиальные трещины возникают от внутреннего давления

$$p \leq \frac{|\sigma_{\tau}|}{2},$$

как это показано в [1].

Анализ формулы (5) показывает, что конструктивный параметр $\Omega = \frac{1+k^2}{1-k^2}$ является определяющим для условий разрушения фарфорового тела опорного изолятора с внутренней арматурой.

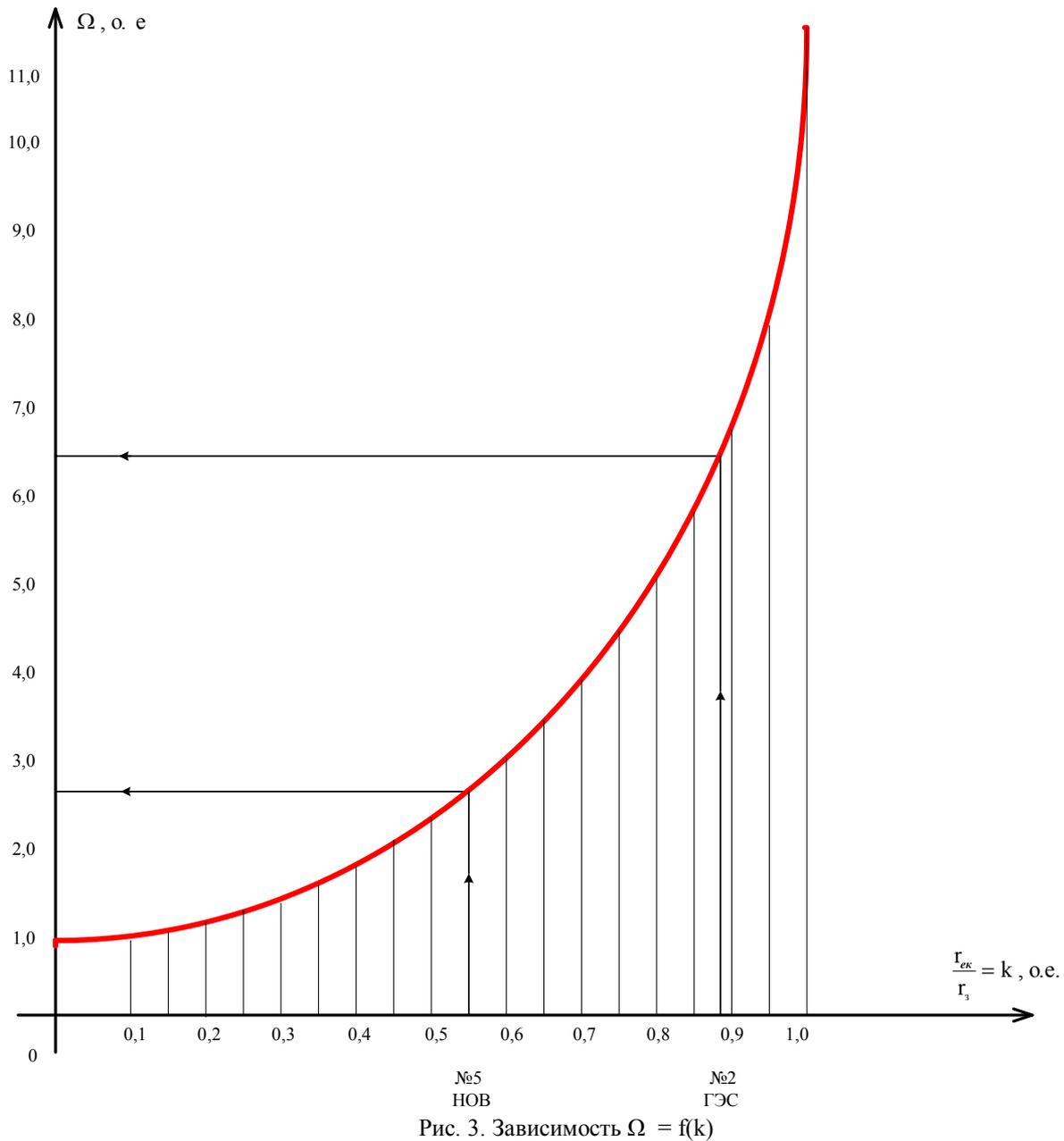
Для определения диапазона изменений этого параметра в современных изоляторах были измерены соответствующие геометрические размеры r_1 , r_2 , r_3 .

Величины ТК₁ [2] для серого чугуна (постоянные) ТК₁₁ = 12·10⁻⁶ 1/град, цементной связки ТК₁₂ = 12·10⁻⁶ 1/град позволяют сделать вывод, что чугун и цементная связка являются однородным материалом по этому параметру. Условия задачи позволяют перейти к двухцилиндровой модели опорного изолятора, у которого внутренний цилиндр имеет радиус $r_{\text{экр}} = r_1 + r_2$, а внешний – соответственно r_3 .

Для такой модели определены экспериментально величины $k = r_{\text{экр}} / r_3$ и построена зависимость $\Omega = f(k)$, представленная графически на рис. 3 и в таблице 2.

Таблица 2

k	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55
Ω	19,5	9,5	6,2	4,55	3,57	2,9	2,46	2,12	1,86

Рис. 3. Зависимость $\Omega = f(k)$

Внутреннее давление в изоляторе возникает вследствие «теплого удара», который соответствует условиям прохождения по токопроводу тока ОКЗ.

Известно [3], что температура алюминиевых и медных шин может возрасти в этом процессе до 200°C и 300°C соответственно.

В экспериментальных исследованиях к внутренней арматуре изолятора кратковременно прикладывалось нагревательное устройство с температурой поверхности 200°C .

Обычно, температурное поле в цилиндрах осесимметричное и постоянно аксиальное. При этих условиях можно считать, что поперечные сечения остаются плоскими и деформация $\sigma_z = \text{const}$. При нагревании изоляторов типа ИОР-10-750ШУХЛ2 с внутренним диаметром $2r_1 = 75$ мм и внешним – $2r_2 = 90$ мм до температуры внутренней поверхности $T_1 = 200^{\circ}\text{C}$, а внешней поверхности до температуры $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$ температурные напряжения в фарфоре можно определить, учитывая, что по толщине стенки температура изменяется по линейному

закону. В расчетах принимаем такие характеристики фарфора:

$E = 0,5 \cdot 10^6$ кГ/см² – модуль упругости;

$\alpha = 4,5 \cdot 10^{-6}$ – температурный коэффициент линейного расширения;

$\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона.

Превышение температуры внутренней поверхности по отношению к внешней составляет 180 °С.

Определим тангенциальное и аксиальное напряжения возле внутренней поверхности фарфорового цилиндра по формуле

$$\sigma_{\tau(r=r_1)} = \sigma_{z(r=r_1)} = \frac{E\alpha T}{3(1-\mu)(r_2-r_1)} \left[3r_1 - \frac{2(r_2^3-r_1^3)}{r_2^2-r_1^2} \right]. \quad (10)$$

Для изолятора типа ИОР-10-750ПУХЛ2 $\sigma_{\tau} = \sigma_z = -684$ кГ/см².

Результаты экспериментов двух типов изоляторов приведены в таблице 2.

Все изоляторы типа ИОР-10-750ПУХЛ2 с Г1-Т1 и Г2-Т2 Новоднестровской ГАЭС раскололись тепловым ударом с образованием аксиально-радиальной трещины по всей высоте изоляторов. Изоляторы второго типа ИОР-10-750 выдержали тепловой удар без разрушения.

Таким образом, экспериментально установлено, что параметр сходства конструкции изоляторов Ω эквивалентен коэффициенту усиления тангенциальных напряжений σ_{τ} на внутренней поверхности фарфорового цилиндра и может быть критерием для выбора надежного типа изоляторов для КЕТ.

Выводы

1. Изоляторы типа ИОР-10-750ПУХЛ2 в эксплуатации трескаются с образованием аксиально-радиальной трещины по всей высоте, что приводит к уменьшению длины пути утечки по поверхности изолятора от 180 мм до 25 мм.

2. Процесс, рассмотренный в П. 1, приводит к разрушению фарфоровой перемычки между внутренней арматурой токопровода и экрана, так как аксиально-радиальная трещина раскрывается и образует вместо перемычки открытую поверхность длиной толщины перемычки, т. е. 25 мм.

3. Остаточный уровень изоляции при сухой поверхности трещины значительно выше фазного напряжения токопровода типа ТЗМЭП-6-3150-128У1.

4. Остаточный уровень изоляции при увлажнении поверхности трещины составляет 5 – 6 кВ, что меньше фазного напряжения.

5. В случае условий П. 4 горение дуги ОЗЗ вдоль высоты перемычки приводит к расплавлению аморфной составляющей фарфора с образованием стекловидного пути (канала).

6. Теплофизические испытания новых изоляторов типа ИОР-10-750ПУХЛ2 привели к растрескиванию всех изоляторов согласно П. 1. При этом возникают четыре трещины, вниз опускаются две очень тонкие (волосяные), они заканчиваются на уровне перемычки, а две другие, шириной 0,1 – 0,18 мм – по радиусу и высоте.

7. Установлена аналогия конструкции ИОР с толстостенными коаксиальными цилиндрами, которые с натягом посажены один в другой.

8. На основе условий П. 7 построена математическая модель изолятора ИОР, которая позволила предложить критерий для геометрических соотношений конструкции $\Omega \leq 2$, или k

$= r_1/r_2 \leq 0,6$ с учетом ОДЗ $p \leq \frac{|\sigma|}{2}$. Наложение на кривую $\Omega = f(k)$ величин $k_1 = 0,6$ и $k_2 = 0,8$

показывает, что изоляторы второго типа ИОР-10-750-I-УХЛ2 не должны трескаться при теплофизических испытаниях новых изоляторов, что и подтверждается экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения : [под ред. В. В. Афанасьева]. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 498 с.
2. Сопротивление материалов : [под. ред. Г. С. Писаренко]. – Киев, ГИТЛ УССР, 1963. – 606 с.
3. Собчук В. С. Импульсный метод профилактических испытаний штыревых изоляторов : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.12 «Техника высоких напряжений» / В. С. Собчук. – Киев, 1983. – 16 с.
4. Собчук В. С. Координація параметрів ізоляції електрообладнання і пристроїв технічної діагностики / В. С. Собчук, В. Н. Пащенко // Вісник ВПІ, 1995, № 3, с. 41 – 43.
5. Руцкий А. И. Электрические станции и подстанции. Часть 1. Основное техническое оборудование / А. И. Руцкий. – Минск, 1984. – 394 с.

Собчук Валерий Степанович – к. т. н., профессор кафедры электрических станций и систем.

Собчук Наталья Валерьевна – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем.

Слободянюк Елена Валерьевна – к. п. н., ст. преподаватель кафедры инженерной и компьютерной графики.

Винницкий национальный технический университет.