

С.Ю. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
А.А. ОКУНЬ, аспирант, НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СТЕКЛЯННОГО ИЗОЛЯТОРА ВЛ 110 КВ

Рассматриваются конструктивные особенности стеклянных изоляторов. Приведены результаты расчетов напряженности электрического поля в объеме сухого чистого изолятора путем моделирования поля посредством метода конечных элементов, реализованного в пакетах Maxwell и CST EM Studio.

Розглядаються конструктивні особливості скляних ізоляторів. Приведені результати розрахунків напруженості електричного поля в об'ємі сухого чистого ізолятора шляхом моделювання поля за допомогою методу кінцевих елементів, реалізованого в пакетах Maxwell та CST EM Studio.

Design features of glass insulators are considered. Results of calculation of electric field intensity in volume of a dry pure insulator by modeling the field using the finite element method implemented in Maxwell and CST EM Studio are given.

До конца 70-х годов XX столетия электротехнический фарфор являлся основным материалом для изготовления изоляторов, что объяснялось его высокой механической и электрической прочностью, малой гигроскопичностью, гладкостью поверхности.

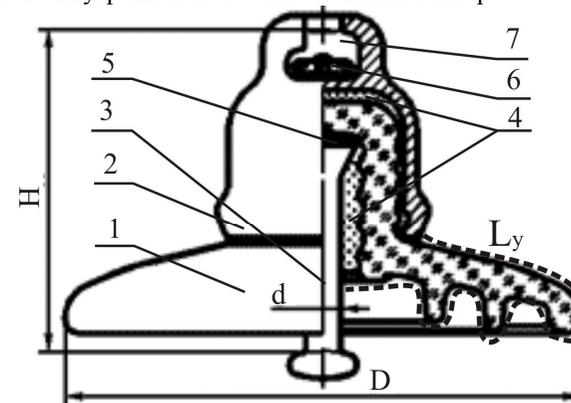
Трудности обнаружения дефектных фарфоровых изоляторов в процессе эксплуатации привели к постепенной их замене изоляторами из закаленного электроизоляционного стекла, которые и продолжают доминировать, несмотря на широкое применение полимерных стержневых изоляторов, имеющих ряд преимуществ по сравнению с вышеописанными (высокие электрические и механические характеристики, меньше масса и габариты).

По механическим и электрическим характеристикам стеклянные изоляторы не уступают, а в некоторых случаях превосходят фарфоровые. Также они более удобны в эксплуатации: пробой фарфоровых изоляторов визуально определить нельзя, а при пробое изоляторов из закаленного стекла происходит видимое разрушение тарелки, причем механические характеристики изоляторов изменяются незначительно. Если происходит перекрытие гирлянды с пробитым фарфоровым изолятором, например, при грозе, то выделяющаяся в узком канале внутри тела изолятора энергия приводит к разрыву изолятора и расцеплению гирлянды, в результате чего происходит авария. Поэтому периодически проводят проверку изоляторов, что требует больших трудозатрат. При перекрытии гирлянды с разрушенной тарелкой разряд развивается снаружи изолятора и, как правило, не приводит к потере его механической прочности. Кроме того, раз-

рушенный изолятор можно выявить во время осмотра с земли. При длительной эксплуатации (20 – 30 лет) электрические свойства стеклянных изоляторов снижаются, что приводит в конечном итоге к разрушениям изолирующего материала в области шапки.

Цель статьи. Данная статья посвящена теоретическому исследованию распределения электрического поля в объеме стеклянного изолятора при изменении приложенного напряжения.

Метод решения. Конструкция стеклянного тарельчатого изолятора представлена на рисунке 1. На изолирующей головке изолятора при помощи цементно-песочной связки крепится шапка из высокопрочного или ковкого чугуна. В верхней части шапки имеется паз, в который вставляется пестик другого изолятора при соединении их в гирлянду. Для предотвращения самопроизвольного расцепления изоляторов имеются специальные пружинные замки, вставляемые в тот же паз. Пестик, имеющий утолщение (с одной стороны – коническое, с другой - в виде эллипсоида вращения), крепится при помощи цементно-песочной связки своей конической частью во внутренней полости головки изолятора.



1 - изолирующее тело изолятора; 2 - шапка изолятора; 3 - пестик; 4 - цементно-песочная связка; 5 - прокладка; 6 - пружинный замок; 7 – паз

Рис. 1 – Подвесной тарельчатый стеклянный изолятор

Внутренняя часть головки изолятора и часть пестика, которая соприкасается со связкой, покрываются тонким, порядка 0,1 мм, слоем компенсирующей промазки. Для уменьшения внутренних механических напряжений между пестиком и телом изолятора устанавливается прокладка из пробки или кирзы.

Цементно-песочная связка защищается от проникновения влаги специальными полупроводящими лаками, которые одновременно снижают напряженность электрического поля около пестика и шапки, где она наи-

большая. Для предотвращения коррозии все металлические части оцинковываются.

При напряжении, меньшем разрядного, около пестика и шапки изолятора возникают коронный или скользящий разряды, которые создают радиопомехи, поэтому одной из характеристик изолятора является напряжение, соответствующее допустимому уровню радиопомех, которое возрастает с 25 до 50 кВ в зависимости от типа изолятора по мере роста механической прочности изолятора. Для повышения напряжения возникновения короны край шапки закругляют, а поверхность цементно-песочной связки покрывают полупроводящим лаком.

В нормальных условиях электростатические процессы на изоляторах настолько слабы, что их количественно определить экспериментальным путем практически не представляется возможным. Поэтому в данной работе определены электрические параметры поля изоляторов в нормальном режиме их работы путем математического моделирования.

Поскольку поля промышленной частоты (50 Гц) являются квазистатическими [1], то возможно описывать их, подобно электростатическим. Таким образом, уравнение, описывающее распределение электрического поля в рассматриваемой области, имеет следующий вид:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \phi) = -\rho_V, \quad (1)$$

где ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ρ_V - объемная плотность заряда.

В качестве примера был взят стеклянный изолятор типа ПС 120Б для сети переменного тока с номинальным напряжением 110 кВ. Исходные геометрические параметры изолятора, принятые в расчетах, приведены в таблице 1. Относительная диэлектрическая проницаемость электроизоляционного стекла равна $\epsilon_r = 5,5$, цементная связки - $\epsilon_r = 6$, воздуха - $\epsilon_r = 1,0006$ [2].

Таблица 1 – Основные размеры изолятора ПС 120Б [3]

Тип изолятора	Максимальный номинальный диаметр изоляционной детали D, мм	Номинальная строительная высота H, мм	Минимальная номинальная длина пути утечки L_{γ} , мм	Стандартное сферическое соединение по ГОСТ 27396 d, мм
ПС 120Б	255	146	280	16

Потенциал верхнего заземленного металлического элемента (шапки) принимаем равным нулю, а потенциал нижней части металлического

элемента (пестика) – наибольшему рабочему напряжению на изоляторе $U_{н.р.из.}$, которое составляет:

$$U_{н.р.из.} = \frac{1,15 \cdot 110}{\sqrt{3}} \cdot 0,18 \approx 13,14 \text{ кВ},$$

где 0,18 – коэффициент, который учитывает неравномерное распределение напряжения по гирлянде изоляторов на ЛЭП 110 кВ (рисунок 2).

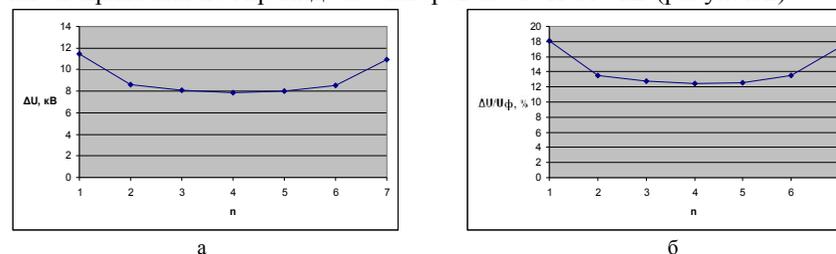


Рис. 2 – Расчетное распределение падений напряжений (а) и их процентное соотношение (б) по гирлянде из 7 изоляторов типа ПС 120Б для ВЛ 110 кВ

В общем случае система уравнений, описывающих квазистатическое поле, решается в трехмерной координатной системе. Существует различные программные средства, реализующие аналогичные задачи на персональных компьютерах - Ansys, FEMLAB, Ansoft Maxwell, CST EM Studio, IES Coulomb и другие [4, 11]. Для решения дифференциального уравнения (1) в работе использовался численный метод конечных элементов, реализованный в пакетах Ansoft Maxwell 3D [5] и CST EM Studio [6]. На рисунке 3 представлены расчетные модели изолятора типа ПС 120Б в разрезе.

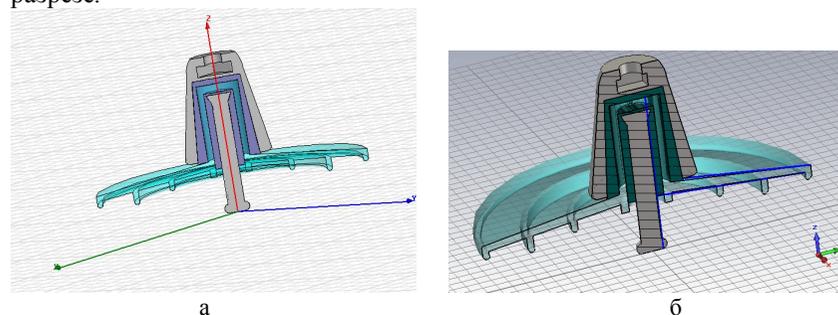


Рис. 3 – Общий вид расчетной модели изолятора ПС 120Б: а – Ansoft Maxwell, б – CST EM Studio

Результаты расчета напряженности электрического поля в объеме сухого чистого изолятора в случае приложенного напряжения $U_{н.р.из.} = 13,14$ кВ приведены на рисунках 4-5. Максимальное значение напряженности поля достигает на поверхности конического утолщения пестика во

внутренней области цементно-песочной связки. Здесь она достигает значений до 4,0 кВ/мм. Однако это не приводит к опасным последствиям, поскольку электрическая прочность стекла при такой его толщине составляет 45 кВ/мм [7].

Опасные значения напряженности поля возникают на поверхностях цементных заделок как пестика, так и шапки. Это наиболее слабые места с точки зрения электрической прочности. Здесь величина поля достигает значений 1,0 - 1,1 кВ/мм. При таких значениях напряженности возможны частичные поверхностные (скользящие) разряды [8]. Это обусловлено тем, что в данных местах поле неоднородно и при относительно небольшом напряжении (13,14 кВ) возникает коронный разряд, который и приводит к возникновению каналов стримеров на внутренней и внешней поверхности стекла.

Появления частичных разрядов инициирует возникновение целого спектра колебаний на достаточно высоких частотах. Это может приводить к возникновению высокочастотных перенапряжений.

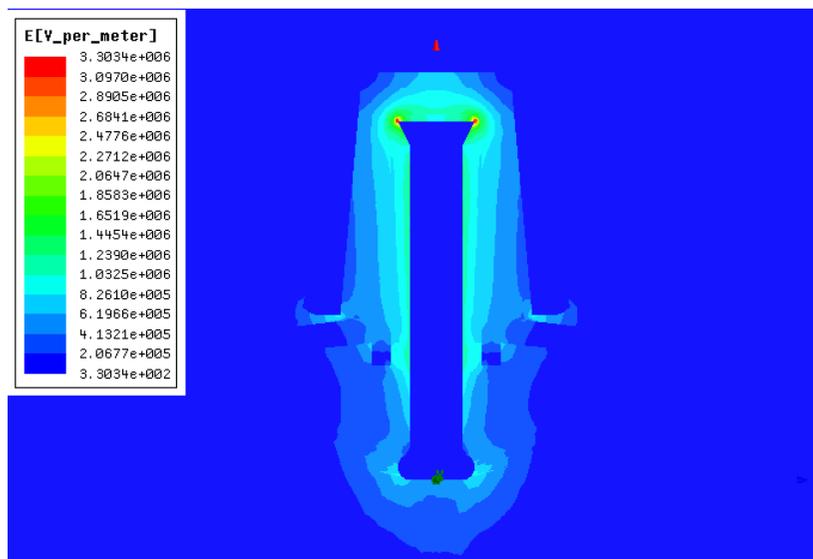


Рис. 4 – Распределение напряженности электрического поля |E| изолятора ПС 120Б при $U_{н.р.из.} = 13,14$ кВ (Ansoft Maxwell)

Далее были проведены расчеты напряженности электрического поля при изменении приложенного напряжения в диапазоне значений $U_{н.р.из.} - 1,5U_{н.р.из.}$, что соответствует возможности появления режимных перенапряжений на промышленной частоте. Эти перенапряжения характеризуются

невысокой кратностью ($1,5 \div 2$) и относительно большой длительностью – от долей секунд до десятков минут [8].

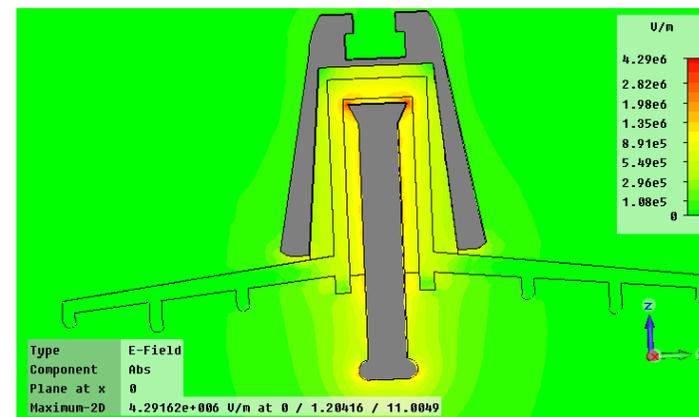


Рис. 5 – Распределение напряженности электрического поля |E| изолятора ПС 120Б при $U_{н.р.из.} = 13,14$ кВ (CST EM Studio)

Результаты расчетов представлены на рисунках 6-8. Видно, что увеличение приложенного напряжения в большей степени влияет на максимальные значения в рассматриваемых областях и соответственно благоприятствует возникновению скользящих разрядов, которые в конечном итоге могут привести к полному перекрытию изолятора при совпадении разрядов, исходящих с поверхностей заделки шапки и стержня.

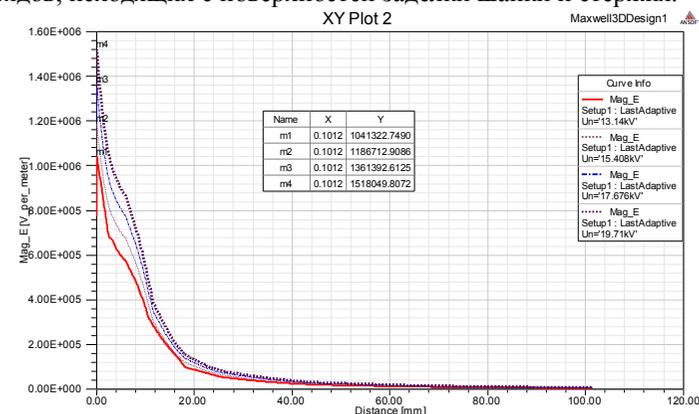


Рис. 6 – Распределение напряженности электрического поля |E| и максимальные значения на поверхности изолирующего тела в направлении от цементной заделки шапки к краю изолятора ПС 120Б при изменении значений приложенного напряжения.

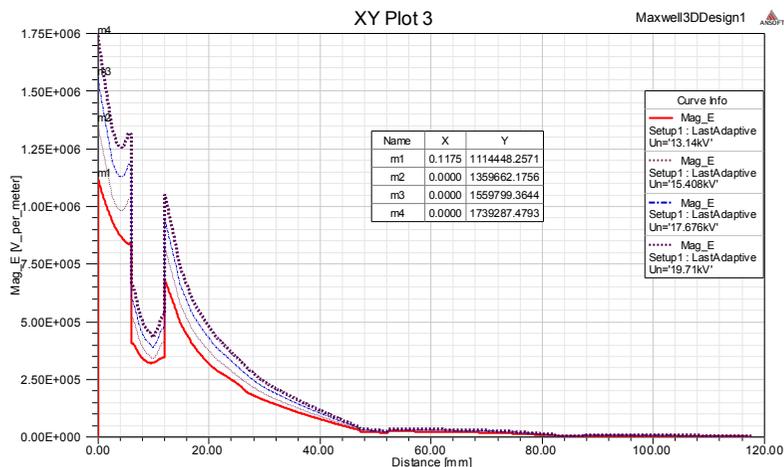


Рис. 7 – Распределение напряженности электрического поля $|\mathbf{E}|$ и максимальные значения под поверхностью изолирующего тела в направлении от цементной заделки к краю изолятора ПС 120Б при изменении значений приложенного напряжения

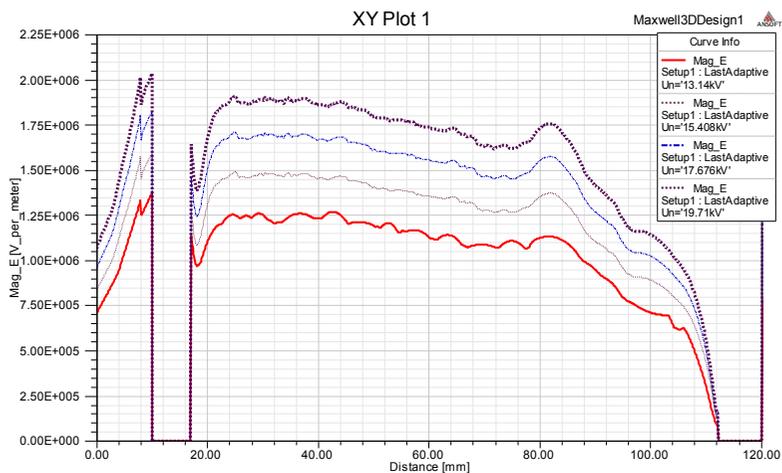


Рис. 8 – Распределение напряженности электрического поля $|\mathbf{E}|$ по длине пестика в направлении от конического утолщения к краю в форме эллипсоида вращения для изолятора ПС 120Б при изменении значений приложенного напряжения. Нулевые значения напряженностей поля соответствуют переходам через утолщения пестика

Приведенные выше рассуждения относятся к изолятору, который рассматривался отдельно, т.е. без влияния соседних изоляторов, провода, траверсы опоры, которые несомненно повлияли бы на результата расчета. Поэтому необходимы исследования поля не только отдельного изолятора, но и гирлянды в целом с учетом влияния провода и траверсы опоры.

Выводы:

1. Изоляторы из электроизоляционного стекла являются наиболее применимыми для ВЛ напряжением выше 35 кВ.
2. Результаты проведенных расчетных исследований свидетельствуют о том, что максимальное значение напряженности поля достигает на поверхности конического утолщения пестика (до 4 кВ/мм) во внутренней области цементно-песочной связки. Однако это не приводит к опасным последствиям, поскольку электрическая прочность стекла при толщине 1,5 мм составляет 45 кВ/мм.
3. Опасные величины напряженности поля возникают на поверхностях цементных заделок как пестика, так и шапки в местах соприкосновения с воздухом. Такие значения полей могут приводить к появлению поверхностных разрядов на его внутренней и внешней поверхностях, которые в конечном итоге могут инициировать перекрытие всего изолятора.
4. При увеличении приложенного напряжения значительно увеличиваются значения напряженностей в “слабых” местах изолятора, что приводит к усилению разрядных процессов.

Список литературы: 1. Колецицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Колецицкий Е.С. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с. 2. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т. 2 / Под ред. Ю.В. Коричко и др. - 3-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 464 с. 3. ГОСТ 27661-88 Изоляторы линейные подвесные. Типы, параметры и размеры. - Введ. 01.01.89. 4. Su C. Overview of Electromagnetic Modeling Software / C. Su, H.Ke, T. Hubing // 25th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, 8-12 March 2009 – P. 736-741. 5. Режим доступа : <http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/> 6. Режим доступа : <http://www.cst.com/Content/Products/EMS/SolverElectrostatics.aspx> 7. Кучинский Г.С. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов / Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь; под общ. ред. Г.С. Кучинского. - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с. 8. Техника высоких напряжений / под общей ред. Д.В. Разевига. - изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1976. – 488с. 9. Александров Г.Н. Установки сверхвысоких напряжений и охрана окружающей среды / Г.Н. Александров. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1989. – 360 с. 10. Ким Е. Д. Электростатические характеристики линейных изоляторов для контактных сетей железных дорог / Е. Д. Ким, В. Г. Сыченко, В. Л. Калмыков // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - №27. – С. 72-76.

Поступила в редколлегию 03.11.2010