

УДК 537.212:621.31.027.8

Д. А. Савельев, Е. В. Бояринцева

## Расчет электрических полей в элементах конструкции комбинированного высоковольтного измерительного трансформатора тока и напряжения

*С использованием программы FEMM выполнен расчет электрических полей в изоляционном промежутке комбинированного элегазового высоковольтного измерительного трансформатора тока и напряжения. Получены картины распределения напряженности электрического поля в исследуемой области.*

Продолжающийся рост потребления электроэнергии и возрастающие требования к энергосбережению вызывают рост единичных мощностей и номинального напряжения энергетического оборудования, применение новых аппаратов высокого напряжения. Для новых конструкций таких аппаратов предъявляются повышенные требования к надежности, на которую оказывают влияние используемые значения напряженности электрического поля в их составных элементах.

В настоящее время для большого числа различных электротехнических материалов, используемых при создании высоковольтной изоляции, достаточно хорошо известны допустимые напряженности электрического поля, соответствующие различным видам действующих напряжений. В свою очередь, для определения условий работы изоляции необходимо знание о распределении электрических полей, в различных частях конструкции аппаратов, что требует проведения соответствующих расчетов.

Успехи в области развития численных методов расчетов электрических полей, а также широкое применение специальных компьютерных программ позволяют производить требуемые расчеты в сложных конструкциях и с необходимой точностью [1]. Таким образом, расчет напряженности электрического поля при известной электрической прочности изоляции является важной задачей, без решения которой нельзя определить все необходимые характеристики применяемой электрической изоляции. К сожалению, до настоящего времени расчет электрических полей в элементах конструкции измерительного высоковольтного измерительного элегазового трансформатора тока и напряжения в известной научно – технической литературе не рассмотрен, востребован практикой и представляет актуальность.

Расчет и анализ электрических полей является важнейшим этапом проектирования высоковольтных аппаратов и их элементов, позволяющим решить целый ряд специальных задач [1]. К таким задачам, например, относятся:

- выбор размеров экранных и других элементов по заданным значениям допустимой напряженности в устройствах с газовой изоляцией;
- выбор формы и размеров изоляторов, работающих в газовой среде, по заданным величинам напря-

женности на поверхности твердой изоляции;

- оценка электрической прочности промежутков по заданным геометрическим размерам и испытательным напряжениям, исходя из величины «напряженной площади» или «напряженного объема»;
- расчет распределения напряженности в комбинированной изоляции и выбор размеров ее элементов;
- оценка распределения напряжения по крышкам аппаратов.

Список подобных задач может быть существенно расширен. Характерной особенностью этих задач является то, что расчет поля должен проводиться для определения либо максимальных значений напряженности, либо значений напряженности в какой-либо отдельной области конструкции электрического аппарата. С учетом этого, можно сформулировать первую особенность расчета электрических полей высоковольтных аппаратов: для проектирования изоляции наибольший интерес представляет область сильного поля и, в первую очередь, распределение напряженности в ней.

Расчет электрического поля высоковольтных аппаратов должен проводиться при достаточно сложных конфигурациях электродов. Поэтому известные аналитические методы расчета электрического поля пригодны лишь для весьма ограниченного круга задач. Более эффективными для практического применения являются численные методы. При этом известные компьютерные программы, которые использовались ранее для расчетов электрических полей, такие как AXIAL и TRITON, не могут обеспечить необходимую точность расчетов и желаемую наглядность результатов.

Целью статьи является расчет электрических полей в закрытой области с кусочно-однородной средой для одного из изоляционных промежутков комбинированного высоковольтного элегазового трансформатора тока и напряжения 330 кВ.

Конструкция данного элегазового трансформатора показана на рис. 1. В настоящее время существует целый ряд программ, позволяющих выполнять расчет распределения электростатических полей в двух и трехмерном виде для закрытых областей. К ним относятся: ANSYS, QuickField, FEMM и др. Для проведения расчета и построения картины электрического поля методом конечных элементов использовалась компьютерная программа FEMM (Finite Element Method

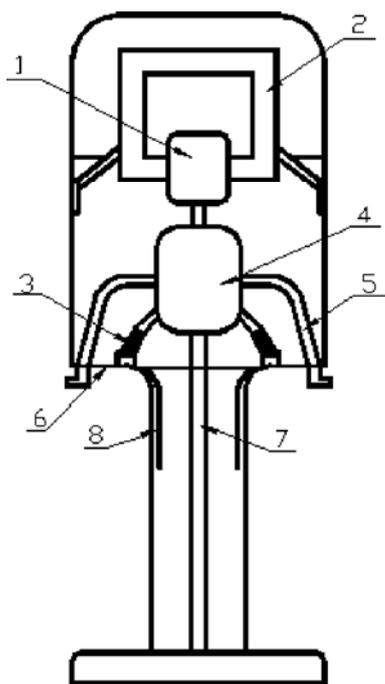


Рис. 1. Эскиз конструкции комбинированного элегазового трансформатора тока и напряжения: 1 – катушки низкого и высокого напряжения; 2 – магнитопровод трансформатора напряжения (ТН); 3 – эпоксидный изолятор; 4 – комплект вторичных обмоток ТТ; 5 – первичная обмотка ТТ; 6 – нижний фланец ТТ; 7 – труба вторичных выводов ТТ и ТН; 8 – экран

Magnetics) V. 4.0 [2]. Данная программа позволяет производить расчеты с высокой точностью и получать наглядные результаты проведенных расчетов. Преимуществом данной программы также является ее простота в использовании и удобный для пользования интерфейс.

В качестве области исследования электрического поля было выбрано место крепления активной части трансформатора тока (рис. 1). Для устойчивости конструкции комплект вторичных обмоток трансформатора тока (ТТ) устанавливается на изоляторы, изготовленные из эпоксидного компаунда. Ввиду сравнительно небольшого изоляционного расстояния, данный изолятор несет повышенную рабочую и испытательную напряженность, что может привести к его разрушению. На практике данный изоляционный промежуток является ненадежным местом трансформатора. При разрушении изолятора возникает дуга, повреждающая элементы конструкции, которые находятся в непосредственной близости от горения дуги: первичную обмотку ТТ, комплект вторичных обмоток ТТ, экраны. В свою очередь, это приводит к полному выходу трансформатора из строя.

При расчете распределения электрических полей в исследуемом изоляционном промежутке исходно задались (на первом этапе исследования) двумерной картиной распределения напряженности электрического поля. Однако, в перспективе, для более глубокого анализа, планируется получение трехмерной модели электрического поля в данном изоляционном промежутке. Эскиз исследуемой области (показанной на рис. 2) вы-

полнен в приложении AutoCAD и может быть легко импортирован в среду программы FEMM. Граничными условиями в данной задаче являются потенциалы проводников, а именно: комплект вторичных обмоток ТТ (рис. 2, позиция 3) имеет нулевой потенциал, а на нижнем фланце ТТ (рис. 2, позиция 2) присутствует потенциал, равный 363 кВ. Расчетная область разбивается на ячейки (в данном случае применено разбиение на элементы первого порядка – треугольники), так как размеры расчетной области намного превышают необходимый шаг сетки. Была выполнена фокусировка – шаг сетки был уменьшен в тех областях, где это необходимо (а именно – на границах раздела диэлектриков). Распределение потенциала внутри элемента аппроксимируется некой функцией (для элементов первого порядка это – билинейная функция) [1]. При проведении расчетов был принят ряд допущений: эпоксидный изолятор не имеет пор; диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  для эпоксидного изолятора составляет 4,2, а для элегаза – 1,0021 [3].

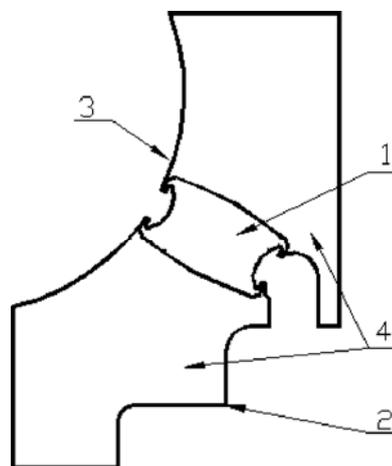


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в промежутке (для наибольшего рабочего напряжения 363 кВ)

Результаты построения картины распределения напряженности электрического поля (показанные на рис. 3 и рис. 4) приведены для наибольшего рабочего напряжения, равного 363 кВ [4]. Картины распределения напряженности электрического поля построены в градации серого цвета (большей напряженности соответствуют более темные оттенки этого цвета). С помощью указанных оттенков цвета можно оценить напряженность электрического поля в любой области исследуемой модели.

В результате исследований было установлено, что значительное снижение напряженности  $E$  в толще изолятора можно получить при замене цилиндрической формы изолятора на коническую, обращенную основанием к токопроводу (показанную на рис. 4). Это свидетельствует о том, что увеличение размеров изолятора вблизи токопровода позволяет снизить напряженность электрического поля в твердом диэлектрике. Данное снижение тем эффективнее, чем больше отличается форма изолятора от формы силовых линий в чисто газовом промежутке. Картина существенно меняется, если подобный изолятор контактирует не-

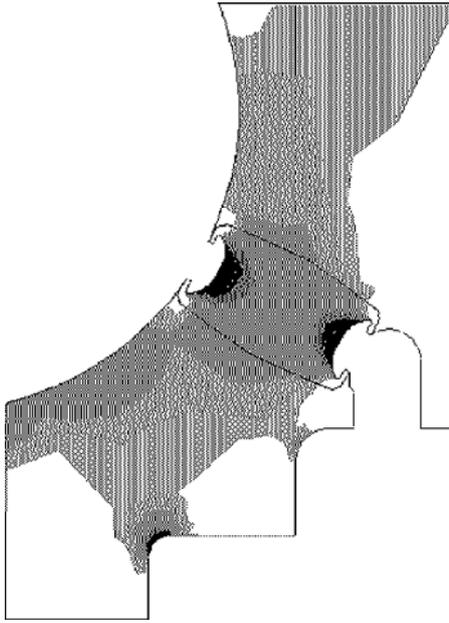


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в промежутке (для наибольшего рабочего напряжения 363 кВ)

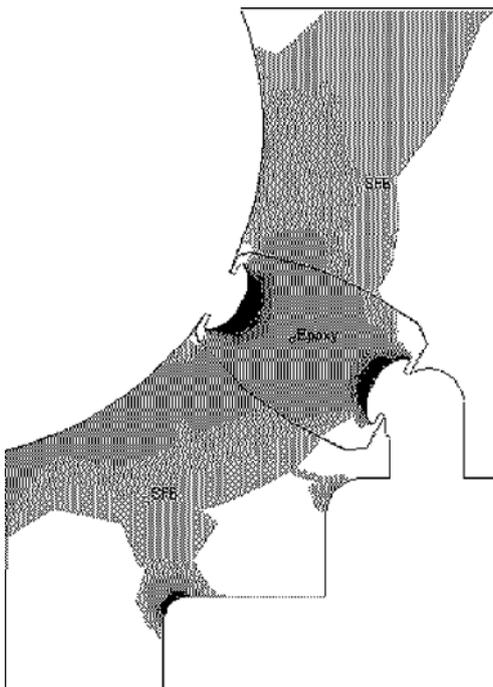


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля в промежутке с измененной формой изолятора (для наибольшего рабочего напряжения 363 кВ)

посредственно не с токопроводом, а охватывает его своей специальной цилиндрической формой [5].

При этом существует ряд факторов, существенно влияющих на надежность изоляторов. К таким факторам относится технология их изготовления. При нарушении технологии вакуумной заливки, несоблюдения температурного режима отверждения компаунда, недостаточного обезжиривания металлических элементов, вводимых внутрь изолятора, существует вероятность отслоения компаунда от металла и появления на границе их раздела зазора, заполненного газом, что приводит к резкому возрастанию напряженности электрического поля в изоляторе. Однако, в данной работе эти факторы не рассматривались, поскольку они являются предметом дальнейшего исследования.

### Выводы

1. Впервые с использованием компьютерной программы FEMM рассчитана напряженность электрического поля в изоляционном промежутке с эпоксидным изолятором для высоковольтного измерительного элегазового трансформатора тока и напряжения.

2. Полученные в результате расчета картины распределения напряженности электрического поля, позволяют оценить наиболее напряженные области, и с учетом этого совершенствовать геометрические размеры и конструкцию изоляторов.

3. Выполненные расчеты свидетельствуют об эффективности программы FEMM применительно к исследованию электрических полей в высоковольтных аппаратах.

### Перечень ссылок

1. Е. С. Колечицкий. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 167 с.
2. Finite Element Method Magnetics. – Режим доступа: <http://femm.foster-miller.com>. – Загл. с экрана.
3. Asea Brown. Switchgear Manual 10<sup>th</sup> edition. – Berlin.: ABB Calor Emag, 2001. – 910 p.
4. ГОСТ 1516.1 – 76. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М. Изд-во стандартов, 1976. – 49 с.
5. Филиппов А. А., Петерсон А. Л. Изоляторы элегазовых КРУ. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 87 с.

Поступила в редакцию 22.02.07 г.

После доработки 22.03.07г.

*З використанням програми FEMM виконаний розрахунок електричних полів в ізоляційному проміжку комбінованого елегазового високовольтного вимірювального трансформатора струму і напруги. Отримані картини розподілу напруженості електричного поля в досліджуваній області.*

*With FEMM programme use the electric fields calculation in insulation gap of combined SF6 high-voltage measuring current and voltage transformer is executed. Distribution pictures of an electric field intensity in investigated area have been received.*