## РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ДЖОУЛЕВЫХ НАГРЕВОВ В ВАКУУМНОЙ ДУГОГАСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ (ВДК)

С. Ф. Гаранин<sup>1</sup>, С. Д. Кузнецов<sup>1</sup>, В. А. Глазунов<sup>1</sup>, В. Б. Якубов<sup>1</sup>, В. Н. Борисенкова<sup>2</sup>, П. П. Мисюра<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия <sup>2</sup>ООО «Евроконтракт – Высоковольтные аппараты», Балашиха, Россия <sup>3</sup>XK ОАО «НЭВЗ – Союз», Новосибирск, Россия

Одним из вариантов коммутирующей аппаратуры, подходящей для использования в суровых климатических условиях являются сильноточные выключатели на основе вакуумных дугогасительных камер (ВДК). Подобные устройства могут обладать рядом других технологических и экологических преимуществ по сравнению с использующимися в настоящее время. Рассмотрены расчёты для определения полей величин в ВДК, проектируемой на уровень номинальных рабочих токов ~3 кА, размыкаемых токов ~40 кА и рабочие напряжения ~100...200 кВ с системой создания аксиального магнитного поля для улучшения условий дугогашения.

### Введение

Основным типом коммутационных аппаратов, применяемых в настоящее время, являются аппараты с элегазовой изоляцией, хотя ведущими мировыми производителями высоковольтного коммутационного оборудования разработаны и проходят опытную эксплуатацию колонковые и баковые выключатели с вакуумными дугогасительными камерами (ВДК) на наибольшее рабочее напряжение 126–145 кВ в одном разрыве.

Физическая схема ВДК может быть проиллюстрирова на рис. 1. Устройство состоит из двух торцевых контактов, один из которых неподвижен, а другой приводится в движение специальным механизмом, обеспечивающим разведение контактов с проектной скоростью, а также прижатие контактов с заданным усилием для уменьшения контактного сопротивления и потерь в выключателе в замкнутом режиме. На торцевой поверхности контактов могут быть установлены специальные накладки из термостойкого тугоплавкого материала, обеспечивающего большую стойкость контактов при выполнении рабочих циклов размыкания-замыкания, а также размыкания цепи при токах короткого замыкания (КЗ) в нагрузке. В процессе размыкания контактов, через которые проходит мощный электрический ток, между ними зажигается мощный дуговой разряд в парах металла электродов. Процессы гашения этого разряда определяют физику работы устройства и обеспечивают нужные параметры прерывания тока. Экран, окружающий зону разряда, служит для улавливания паров металла из разряда, которые в противном случае осаждались бы на цилиндрическом изоляторе, в котором вакуумируется представленная на рис. 1 конструкция.



Рис. 1. Конфигурация электродов ВДК, цвета электродов соответствуют напряжению на электродах

Работоспособность устройства регламентируется техническими условиями, которые подразумевают способность выдерживать рабочие напряжения, многочисленные циклы включения выклю-

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа основана на результатах исследований, проведенных по договору № 4289-5-96/2013 от 20.05.2013 между ВНИИЭФ и ООО «Евроконтракт – Высоковольтные аппараты».

чения на номинальных токах, определённое количество размыканий тока КЗ, определяется сложными и не полностью изученными процессами горения дуги и процессами на контактах. В настоящее время одним из факторов, улучшающих работоспособность устройства, является создание аксиального магнитного поля между электродами [1]. Системы для создания магнитного поля в общих чертах описаны в литературе [1, 2]; обычно магнитное поле образуется в результате создания токов, протекающих в азимутальном направлении, например, за счёт нарезания прорезей на боковых поверхностях электродов.

В настоящее время на мировом рынке отсутствует вакуумная коммутационная аппаратура на напряжения 110–145 кВ, что объясняется технологической проработкой серийного выпуска данного оборудования. Цель крупных корпораций – достигнуть большей рентабельности вакуумной аппаратуры по сравнению с элегазовым коммутационным оборудованием.

Нижние температуры ( $-45 \,^{\circ}\text{C} - -60 \,^{\circ}\text{C}$ ) эксплуатации комплектных распределительных устройств (КРУ) с ВДК (в отличие от устройств с применением элегаза) позволят использовать их на территории России, Украины, Белоруссии и Казахстана. Стимулом к применению вакуумной коммутационной аппаратуры являются также экологические характеристики, так как применение элегаза в качестве дугогасящей среды, что используется в настоящее время в большей части коммутационных устройств, приводит к образованию в процессе эксплуатации токсичных продуктов разложения элегаза.

Задача улучшение возможностей для понимания процессов происходящих в ВДК может быть разбита на ряд важных технических задач, которые могут улучшить возможности проектирования, уменьшив тем самым расходы на экспериментальную проверку различных технических гипотез и определение реальных рабочих параметров систем.

Расчёты реальной конструкции ВДК проводились по 2D и 3D программам. Схема проведения расчётов, поддерживающих проектирование технических систем, может быть представлена в следующем виде:



При этом необходимо согласовать форматы передачи данных от отдельных модулей, которые по возможности должны быть взаимозаменяемыми и составляться из отдельных коммерческих или свободно распространяемых программ.

При проектировании устройств обычно используются компьютерные системы проектирования CAD, которые должны выдать данные в формате, из которого может быть извлечена 3Dгеометрия для построения расчётных геометрий и сеток. Приведённые в отчёте расчёты были проведены на геометриях, которые были сгенерированы с использованием доступных во ВНИИЭФ САДсистем, которые позволяют также генерировать расчётные сетки для используемого решателя. Для генерации сеток могут быть использованы и другие, распространяемые по свободной лицензии генераторы сеток. В расчётах использовались конечно-элементные сетки, составленные из элементов-тетраэдров первого или второго порядка [3]. Выбор этого типа элементов обусловлен лучшими возможностями используемых программ сеткогенераторов для построения сетки во всём пространстве. После получения сеточной постановки задачи с граничными условиями к задаче применяется решатель, который ищет решение уравнений в заданной области. После получения решения уравнений, требуется проведение ряда векторных и дифференциальных операций с полученными векторными полями, а также вычисление интегралов от полей по некоторым областям; для этих целей написан специальный обработчик. Результаты расчётов выдаются в формате для дальнейшей визуализации, для которой использовалась бесплатная программа Paraview [4].

## 1. Распределение электрических полей в ВДК

В качестве примера в этом разделе приведены результаты расчётов, проведенных для камеры с условным обозначением КДВ НЭВЗ 110-40/3150.

## 1.1. Методика и постановки расчётов для получения результатов в областях задачи с малыми радиусами скругления электродов

Расчетная геометрия подверглась некоторому упрощению при описании несущественных для электростатических расчётов деталей. Потенциал торцевых элементов (в виде блюдец без дна) задавался равным потенциалу соответствующих электродов, что соответствует хорошему электрическому контакту между торцевыми элементами и электродами. На рис. 2 показаны необходимые для электростатического расчёта металлические электроды и половина экрана в изометрии из расчёта задачи при межэлектродном промежутке 75 мм, цвета электродов и экрана соответствуют напряжению на электродах в единицах напряжения, приложенного между электродами, полученному в расчёте. При этом потенциал экрана в силу симметрии задачи равен <sup>1</sup>/<sub>2</sub> от напряжения между электродами.



Рис. 2. Конфигурация электродов задачи при межэлектродном промежутке 75 мм, цвета электродов соответствуют напряжению на электродах, полученному в расчёте

Для упрощения задачи из всей области был извлечён сегмент в 10 градусов. В силу симметрии задачи относительно плоскости перпендикулярной оси, расположенной на равном расстоянии от электродов, в расчётах рассматривалась только половина всей области с одной стороны от плоскости симметрии. Потенциал плоскости симметрии полагался равным потенциалу экрана. Расчетная область содержит все необходимые детали конструкции, расчётная сетка в вакуумной области показана на рис. 3.

Нужно отметить, что решение задачи ищется для потенциала электрического поля, а напряжённости электрического поля получаются из этого решения в результате дифференцирования. В результате напряжённости электрического поля имеют меньшую гладкость, и их значение может быть искажено в результате интерполяции при получении изображения. Для получения значения напряжённости электрического поля на поверхности с приемлемой точностью, что требуется для оценки вероятности пробоя, должен быть предпринят ряд мер. Одной из особенностей является то, что поле на границе с поверхностью электрода вычисляется в элементах имеющих конечный размер или физически на некотором расстоянии от электрода, что даёт оценку снизу для напряжённости электрического поля. То есть характерный размер приграничных элементов должен быть достаточно малым по сравнению с радиусом скругления электрода, это достигается увеличением числа точек на скруглении. На рис. 3 показана сетка вблизи граничной поверхности расчётного сегмента, в которой на границе фаски электрода задано 10 узлов. Предварительные расчёты показали, что сходимость результатов достигается при числе узлов на границе фаски электрода ~10.



Рис. 3. Расчётная сетка со сгущением на малых радиусах скругления: а – общий вид, б – вид в области угла электрода при ~10 расчётных элементах на радиус фаски

Задание большого числа элементов на скруглении может приводить к излишнему сгущению элементов в областях, где ничего интересного не происходит. Важным моментом также является выдача поэлементных величин электрического поля, а не результатов сеточных интерполяций этого поля, которые используются в программах построения картин поля. Интерполирование даёт усреднение поля по нескольким расчётным элементам, что уменьшает максимальное значение поля в областях, где величина поля существенно изменяется.



Рис. 4. ие задачи с размещением ВДК в металлическом баке КРУ, расчётные детали выделены цветом: 1) синий – электроды; 2) голубой – экран; 3) красный – керамика; 4) зелёный – изолятор; 5) серый – вакуумная область



б

Рис. 5. Результаты расчета электрического поля в ВДК: а – изолинии потенциала электрического поля, б – изолинии модуля напряженности электрического поля

Приведенные в следующем разделе расчёты выполнены с учётом изложенных в этом разделе соображений:

1) Рассчитывается сегмент в 10 градусов (для уменьшения размера элементов);

2) Задаётся не менее 10 расчётных элементов на радиус скругления.

## 1.2. Результаты расчётов электрического поля в камере с разомкнутыми электродами при помещении в бак комплектного распределительного устройства

В этом разделе приведены результаты расчётов поля в ВДК, помещённой в круглый металлический заземлённый бак Ø400 мм и длиной 900 мм, имитирующие размещение вакуумного выключателя в ячейке КРУ, такое размещение

коммутационной аппаратуры является стандартным и повышает её защищённость, а также унифицирует систему коммутации. К подводящим электродам ВДК в расчёте подсоединены металлические цилиндры, имитирующие закрепление электродов и приводы подводящих механизмов. Были проведены расчёты с несколькими вариантами экрана ВДК. Приведен расчёт для простого цилиндрического экрана со скруглением углов для уменьшения электрического поля на углах. На рис. 4 показана геометрия задачи. Учитывались изолирующие слои из керамики и внешний изолятор. Задача с ВДК в баке интересна тем, что в ней имеются ёмкостные связи электродов с землёй, и можно ожидать изменения плавающих потенциалов электродов по сравнению со случаем, когда

связи с заземлёнными элементами, окружающими ВДК, не учитываются.

При постановке задачи потенциалы задаются на электродах ВДК с присоединенными элементами, а заземляющий потенциал 0 задаётся на внешней поверхности цилиндра, который ограничивает вакуумную область.

На рис. 5а показано распределение потенциала электрического поля в ВДК, полученное в расчёте, когда потенциал левого электрода равен потенциалу земли. Видно, что плавающий потенциал экрана в расчётах сильно смещён в сторону земли. В силу зеркальной симметрии задание потенциала правого электрода равным потенциалу земли приведет к зеркальному отображению распределения потенциала, а в общем случае, когда в конструкции ВДК отсутствует зеркальная симметрия, это не так.

На рис. 5б показаны изолинии электрического поля из расчётов. Из рис. 5б видно, что поля в углах электродов, а также возле углов экрана, становятся несимметричными и значительно возрастают около электродов, имеющих высокий потенциал относительно земли. В этом смысле условия на пробой в ВДК при размещении выключателя в баке ячейки КРУ становятся хуже, чем в симметричной задаче.

## 2. Расчёты токов, магнитных полей и сил в замкнутых электродах для реальных геометрий торцевых электродов



Рис. 6. Расчётные варианты: 1) без прорезей в электроде; 2) и 3) с прорезями, но отличающиеся в состыковке борозд на крышке

Были проведены расчёты токов, магнитных полей и сил для контактной системы, как с прорезями, так и без прорезей в чаше электрода. Кроме того, варьировалось взаимное расположение прорезей на электродах с помощью относительного поворота электродов. Расчётная геометрия приведена на рис. 6, размеры электродов были взяты из чертежей, общая длина рассчитываемого участка электродов со стержнями составляет 176 мм. Были проведены 3 варианта расчётов для:

1) Простых торцевых электродов без прорезей;

2) Торцевых электродов с прорезями для создания кольцевых токов с совмещением прорезей в крышках электродов;

 Торцевых электродов с прорезями для создания кольцевых токов с равномерным расположением прорезей в крышках.

Осевое магнитное поле на крышке электрода в расчетах для электродов варианта 1 не возникает, так как не возникает азимутальных токов. Результаты расчёта аксиального и полного магнитного поля на крышке электрода для вариантов 2, 3 для номинального тока 3,15 кА (соответствующего току в момент начала размыкания электродов) приведены на рис. 7–9.



 6

Рис. 7. Осевое магнитное поле электрода из расчётов: а – вариант 2, б – вариант 3 при номинальном токе 3,15 кА



Рис. 8. Векторы напряжённости магнитного поля на крышке из расчётов: а) вариант 2, б) вариант 3 (окрашены по величине осевого магнитного поля) при номинальном токе 3,15 кА

По рассчитанным токам и напряжённостям магнитных полей были вычислены силы, действующие на рассчитываемые в задаче участки электродов. Результаты по расчёту сил согласуются с порядковыми оценками и были проверены в ряде простых тестов, имеющих аналитическое решение. Прибавка к силе в вариантах 2 и 3 из-за учёта притяжения азимутальных токов увеличивает силу в ~1,5 раза, по сравнению с действующей на простые торцевые электроды. Пиковое значение силы притяжения электродов при максимально возможном токе 10<sup>5</sup> А оказывается ~100 кгс. При росте тока увеличивается сила, сжимающая электроды, что является благоприятным обстоятельством. При этом нужно отметить, что задача решалась в приближении идеального контакта между электродами. В случае ослабления прижатия электродов в реальных системах электродов происходит проникновение магнитного поля в зазор и взрыв материала электродов, что может вызвать сильное отталкивание электродов, которое в данной работе не рассчитывалось.



Рис. 9. Аксиальная компонента напряжённости магнитного поля на крышке электрода вдоль линии, проходящей через противоположные прорези электродов, и перпендикулярно этой линии (вдоль линий, показанных на рис. 7)

# 3. Расчёты нагрева электродов в замкнутом состоянии номинальными рабочими токами

Задача о нагреве джоулевым теплом замкнутых электродов с учётом теплоотвода на концах токоподводящих стержней решалась в следующей модельной постановке, в которой, возможно, не учтены многие решающие физические процессы, связанные с разогревом за счёт контактных сопротивлений, но которая позволяет сравниться с простым аналитическим решением. Под действием протекающего тока происходит выделение джоулева тепла в материале электрода. Отвод тепла осуществляется за счёт поддержания торцов электродов при постоянной температуре 300 К. В качестве параметров вещества в расчёте взяты: проводимость  $\sigma = 0,7 \cdot 10^5 1/Om/mm$ , теплопроводность  $\lambda = 0,1$  BT/K/мм.



Рис. 10. Распределение температуры по электроду, нагреваемому протекающим током, с заданной температурой на торцевых площадках

На рис. 10 показано поле температур внутри электрода, получаемое в расчёте. Поле ведёт себя ожидаемо, температура возрастает около центра системы электродов, спадая к поверхностям, находящимся при постоянной температуре.

Для проверки результатов расчётов может быть получено решение одномерной задачи о нагреве стержня постоянного сечения протекающим по нему током.

Поток тепла в каждом сечении определяется при этом как

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dx}.$$

Если концы стержня поддерживаются при постоянной температуре, то приращение температуры в центре может быть оценено как

$$\Delta T = \frac{W\ell}{2S\lambda} = \frac{1}{\lambda\sigma} \left(\frac{I\ell}{S}\right)^2,$$

где *W* – джоулев нагрев единицы объема, *S* – сечение стержня, *l* – его длина. При *l*/2 = 84 мм, для цилиндрического стержня радиусом r = 22 мм,  $S = \pi r^2 = 1520$  мм<sup>2</sup>, и для *I* = 3,150 кА  $\Delta T = 9,5$  К.

Полученный в расчёте разогрев электродов, имеющих форму более сложную, чем рассмотренный стержень, составил в центре электродов  $\Delta T = 5.6$  K, что согласуется с оценкой по порядку величины.

## Заключение

Показана возможность решения ряда задач, необходимых для моделирования работы ВДК и для расчёта её характеристик на стадии проектирования. Показаны примеры расчётов электрических полей, распределения тока и магнитного поля по электродам (и плазме), сил, действующих на электроды со стороны магнитного поля, и нагрева электродов под действием джоулевого тепла с учётом теплопроводности материала.

### Список литературы

1. Slade P. G. The Vacuum Interrupter / Theory, Design, and Application. Taylor & Francis Group, 2008.

2. Александров Г. Н. Электрические аппараты высокого напряжения. Ленинград: Энергоатомиздат, 1989.

3. Zienkiewicz O. C. The Finite Element Method. McGraw-Hill: London, Third Edition, 1977.

4. Paraview: Parallel Visualization Application [Electronic resource] Mode of access: http://paraview.org