

УДК 621.316.542.9.001.57

Ю.М. Быковский, доцент, канд. техн. наук,

А.И. Исаев, аспирант

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

ул. Курчатова, Севастополь-33, 99033

E-mail: bymoptic@optima.com.ua

К ОЦЕНКЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В ПРОВОДНИКЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ СЕЧЕНИЕМ

Анализируются распределения электрического потенциала в зависимости от геометрии проводящей среды. Получена функция распределения потенциалов. Смоделировано поведение линий электрического тока при ступенчатом увеличении сечения проводника.

Большие токи и напряжения находят широкое применение в технике генерирования и передачи электроэнергии. Поэтому к оценке качества элементов, принимающих участие в этом процессе, предъявляются весьма высокие требования. Так, например, нарушение целостности высоковольтных изоляторов (появление микротрещин и адсорбции микроэлементов) неизбежно приведет к развитию процесса ухудшения изоляционных свойств и к повышению вероятности их пробоя. Это заставляет искать пути качественного контроля состояния элементов, как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации.

К таким ответственным элементам относятся и вакуумные выключатели (ВВ), выполняющие защитные функции при возникновении опасных ситуаций. Особенностью конструкции ВВ является его не ремонтпригодность, что предполагает уже на стадии разработки и изготовления обеспечение его работоспособности в течение всего срока службы (до 30 лет). Выполнение этого условия представляет собой сложную научно-техническую задачу, обусловленную действием большого числа трудно учитываемых технологических и эксплуатационных факторов.

Во многом эффективность работы ВВ определяется качеством соприкосновения элементов контактной части. Эта часть ВВ размещена в герметичной камере, которая разборке не подлежит. Поэтому в настоящее время оценка качества области контакта осуществляется путем многократного (порядка сотен тысяч раз) механического замыкания контакта его штатным приводом на стенде с изучением (после вскрытия камеры ВВ) характера деформаций контактных поверхностей. Такой способ предполагает: большие временные затраты, необходимость вывода из строя дорогостоящего выключателя (путем его разрушения), избирательность диагностики, поскольку проверяются единичные экземпляры из партии ВВ, а не вся партия. Кроме того, такой анализ не отвечает на один из важнейших вопросов о характере и динамике электрических процессов коммутации, во многом определяющих эксплуатационную надежность ВВ.

Перечисленные аргументы говорят об актуальности разработки методов неразрушающего контроля (диагностики) области контактов ВВ и другой коммутационной техники. Осуществить такой контроль позволяет визуализация процессов, происходящих в ВВ при размыкании, по сопутствующим явлениям (магнитное и электрическое поля; излучения, связанные с ионизацией межконтактной среды, и др.).

Целью статьи является анализ поведения линий тока в проводнике с изменяющимся сечением, характерном для вакуумного выключателя, и определение информационного параметра для их построения.

Вакуумный выключатель находящийся, например, в цепях защиты, должен обеспечивать надежный обрыв цепи при возникновении аварийной ситуации (короткого замыкания, нагружения линии больше расчетного и т.д.). После размыкания цепи переменного тока, дуга горит, как правило, до первого перехода тока через ноль. Значение тока в момент обрыва дуги называют “током среза”. В некоторых случаях, в зависимости от свойств материала контактов ВВ, ток среза бывает относительно большим, т.е. дуга обрывается слишком рано, что вызывает высокие перенапряжения в цепях с большим влиянием индукционной составляющей. Эти и ряд других факторов требуют не просто бороться с дугой в ВВ, а влиять на процесс ее горения. Необходимо создать такие условия, чтобы дуга появлялась и исчезала в нужные моменты времени и минимально ухудшала свойства ВВ.

На параметры дуги [1] в основном оказывают влияние следующие факторы: конфигурация геометрии составных частей ВВ; электрические параметры цепи, в которую включен ВВ; конструктивные материалы, используемые при изготовлении контактной пары и корпуса ВВ.

Геометрия контактов влияет на распределение напряженности электрического поля на поверхности и внутри контактов. Изменяя геометрию профиля контактов можно добиться нужного распределения электрического поля, которое создаст условия для необходимых свойств дуги.

От материала, из которого изготовлены контакты, зависит давление паров металла и содержание посторонних газов внутри ВВ, что влияет на время существования дуги и на электрическую прочность межконтактного промежутка. Результаты исследований, приведенные в [2], показывают сильное увеличение напряженности электрического поля в местах, выделяющихся над основной плоскостью профиля (бугры, острия и т.д.). Геометрические размеры контакта ВВ сравнительно небольшие (это одно из преимуществ такого типа выключателя – использование вакуума создает огромную электрическую прочность в межконтактном промежутке шириной в несколько миллиметров! [1], что позволяет создавать компактные выключатели с быстродействующими приводами). Если различные факторы приведут к тому, что распределение напряженности электрического поля не выровняется на границе контакта и появится область повышенного потенциала, дуга преимущественно будет существовать на ней, выжигая и эрозируя материал контакта, повышая вероятность пробоя или даже отказа ВВ.

Приведенные выше рассуждения свидетельствуют о неоднозначности условий возникновения и развития дуги, определяющих, в конечном счете, надежность ВВ. Очевидно, что поиск решения рассмотренной проблемы должен осуществляться в плоскости выявления эффектов, сопутствующих процессу коммутации, которые могут служить наблюдаемыми информационными признаками, ставя одной из конечных целей исследования получение пространственной картины.

Внешние проявления процессов внутри ВВ при размыкании однозначно зависят от динамического геометрического распределения электронов, ионов и паров материала контактов ВВ, составляющих горящую плазму дуги. Например, если использовать магнитное поле как информативное внешнее проявление процессов внутри ВВ, необходимо знать пространственное расположение линий тока в исследуемом объеме (герметичный корпус ВВ) для определения напряженности магнитного поля по закону Био-Савара

$$d\vec{H} = \frac{i[d\vec{l} \times \vec{r}_0]}{4\pi r^2}. \quad (1)$$

Имея зависимость, определяющую растекание электрического тока в пределах ВВ, можно получить распределение магнитного поля вокруг элементов выключателя как внешнее проявление, отражающее процессы внутри него.

Для анализа электрических явлений, сопровождающих процесс размыкания контактной пары, представим упрощенно контакт ВВ цилиндрическим проводником, имеющим узкую часть, уходящую за пределы герметичной камеры и широкую часть – собственно тело контакта. На рисунке 1 показан разрез такой контактной пары с распределением потенциала, хорошо видна область переходных процессов и стационарные области.

Как распределяется электрическое поле в проводнике? Согласно [2] на это влияет геометрия и материал – потенциалы и линии тока занимают определенное положение в электропроводном объеме ВВ, обусловленное создавшимся электрическим полем. По известной аналогии между течением жидкости в трубопроводах и течением электрического тока (ЭГДА – электрогидродинамическая аналогия [2]) можно без труда восстановить картину распределения электрических потенциалов и линий тока.

Для сбора данных и последующего моделирования расположения линий тока был повторен эксперимент на упрощенной модели контакта, выполненной из электропроводной бумаги, который описан в [2]. Принято допущение, что в некоторый бесконечно малый промежуток времени при протекании переменного тока по контактам ВВ распределение электрического поля в объеме контакта стационарно и может быть смоделировано постоянным током. Поэтому, для получения потенциалов на модели, использовался постоянный источник питания с возможностью изменять подаваемое напряжение питания. На рисунке 2 изображена схема опытной установки.

На профиль модели была нанесена сетка с шагом 2 см, в узлах которой определялся потенциал по показаниям цифрового вольтметра. В узкой части профиля изменения стационарного распределения потенциала не значительны и анализу не подвергались. Вдоль оси (цилиндрического проводника) отложена координата y , перпендикулярно ей – координата x . Геометрические размеры широкой части (в области изменения переменных): $y = 0 \dots 24$ см, $x = \pm 10$ см. Удельное сопротивление используемой электробумаги равно $R_{\text{ш}} = 60$ кОм/м.

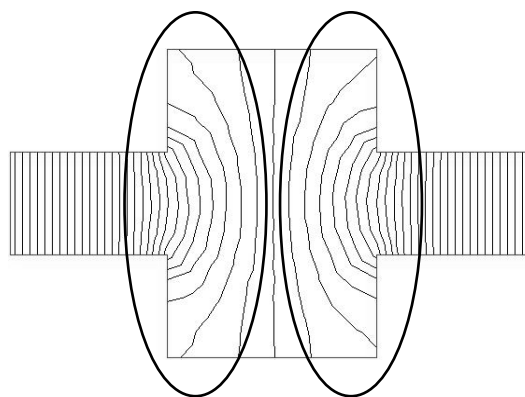


Рисунок 1 — Характер распределения потенциала в местах изменения сечения проводников контактной пары

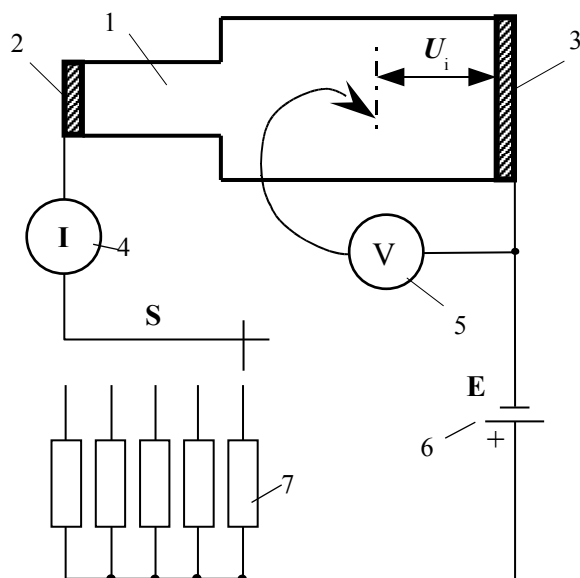


Рисунок 2 — Схема опытной установки: 1 – электропроводная бумага; 2,3 – металлические пластины; 4 – амперметр; 5 – вольтметр; 6 – источник питания; 7 – набор сопротивлений

По полученным данным построены контурные графики изменения потенциала в широкой части профиля, а также экспоненциальным способом [3] получены зависимости значений потенциалов от координаты и подаваемого напряжения.

Например, при токе $I = 1,17$ мА функция зависимости потенциала от координаты вида $\varphi = a \cdot e^{-bx^2} + c$, (где коэффициенты a , b и c являются функциями от y) выглядит следующим образом:

$$\varphi(x, y) = 2,38 \cdot e^{-0,045y^2} \cdot e^{-0,04x^2} + 6,569 \cdot e^{-0,043y} \quad (2)$$

На рисунке 3 показаны графики опытных данных и полученной функции для сравнения.

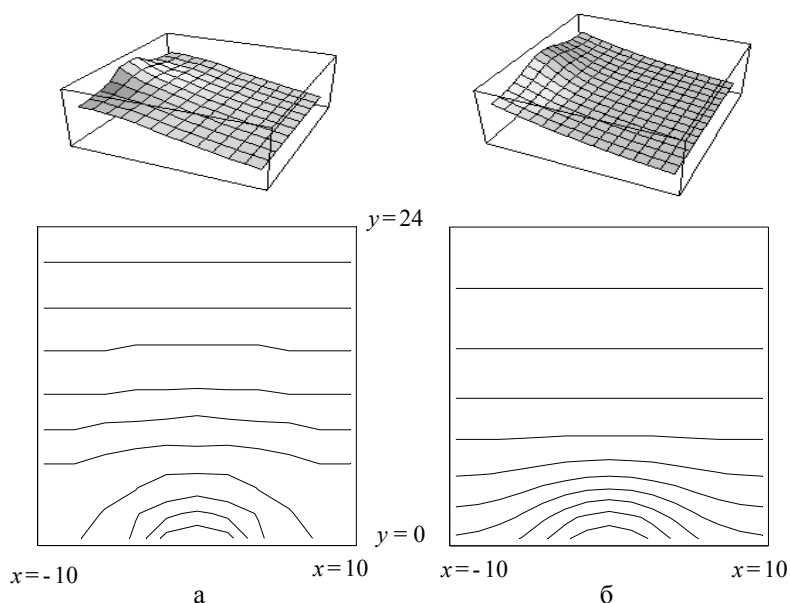


Рисунок 3 — Сравнение графиков опытных данных (а) и результатов аппроксимации (б) для $I = 1,17$ мА

Аппроксимирующая функция достаточно точно воспроизводит распределение потенциалов в заданных геометрических пределах: $x \in [-10 \dots 10]$; $y \in [0 \dots 24]$. Остальные функции, ввиду

громоздкости, не показаны. В дальнейшем для оценки распределение напряженности магнитного поля вокруг контактов ВВ с горящей дугой по закону Био-Савара (1) нужно знать пространственное направление линий тока, протекающего по контактам ВВ и дуге. Поэтому, после детального анализа контурных графиков (типа приведенных на рисунок 3,а) и полученных функций, выявления основных особенностей в направлении протекания тока в месте расширения сечения профиля контакта ВВ, была получена функция, моделирующая поведение линий тока в этой области. Схема получения искомой функции показана на рисунке 4, а.

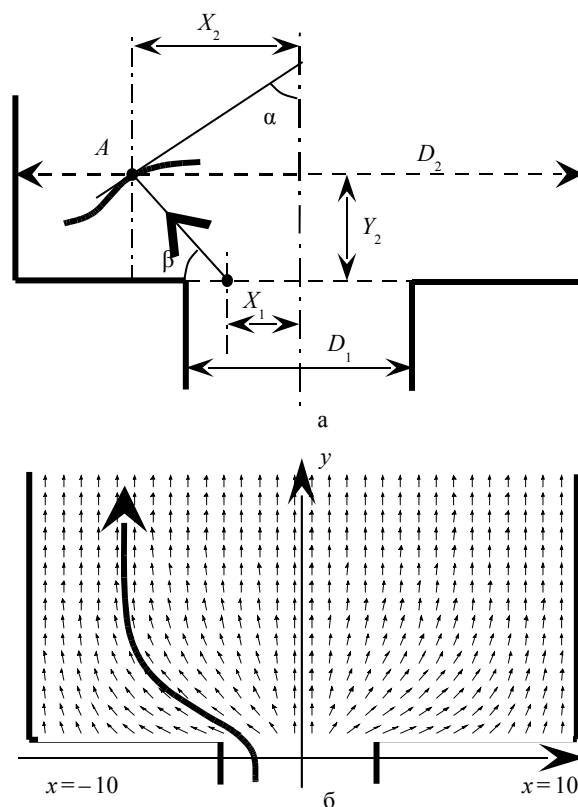


Рисунок 4 — Схема получения функции угла β в любой точке эквипотенциала (а) и векторный график этой функции (б)

При определении траекторий линий тока будем исходить из того, что они проходят по нормали к линиям эквипотенциальных уровней на профиле (см. рисунок 3, а). Имея уравнение линии равных потенциалов (2), можно в любой ее точке (например, в точке А на рисунке 4, а), взяв производную, найти угол наклона касательной к этим эквипотенциалам (угол α), а значит и равный ему угол β наклона линии тока относительно оси x .

Полагая неизменным значение потенциала ϕ при любых величинах x, y в пределах линии, найдем из (2) выражение для x в виде:

$$x = 5 \cdot \sqrt{\ln(2,38) - 0,045 \cdot y^2 - \ln(\phi(x, y) - 6,569 \cdot e^{-0,043 \cdot y})}. \quad (3)$$

Взяв производную функции (3), получим:

$$x' = \frac{2,5 \left(- \frac{0,282 \cdot e^{-0,043 \cdot y}}{2,38 \cdot e^{-0,04 \cdot x^2 - 0,045 \cdot y^2}} - 0,09 \cdot y \right)}{\sqrt{0,867 - 0,045 \cdot y^2 - \ln(2,38 \cdot e^{-0,04 \cdot x^2 - 0,045 \cdot y^2})}}. \quad (4)$$

Теперь искомый угол β наклона линии тока к оси x может быть найден, как

$$\beta = \arctg(x'). \quad (5)$$

На рисунке 4, б приведен векторный график функции (5) угла β в пределах профиля, на котором реконструирована одна из линий тока.

Выводы

Полученная функциональная зависимость угла наклона линии тока в любой заданной точке модели необходима для дальнейшего исследования процессов, происходящих в коммутационном

аппарате (выключателе). Зная данный угол, можно определить магнитное поле и его изменения в области контакта с учетом искривления линий тока, вызванного изменением сечения токопровода в области контакта выключателя.

В динамическом процессе развития дуги в межконтактном промежутке эта информация может быть положена в основу процедуры диагностики качества работы контактной пары. Именно этому направлению будут посвящены дальнейшие исследования.

Библиографический список

1. Вакуумные дуги. Теория и приложения / Дж. Кобайн, Г. Эккер, Дж. Фаррелл и др. — М.: Мир, 1982. — 428 с.
2. Рязанов Г.А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля / Г.А. Рязанов. — М.: Наука, 1966. — 208 с.
3. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. — М.: Наука, 1980. — 976 с.

Поступила в редакцию 6.11.2006 г.