

УДК 621.3:629.4.082

МОДЕЛЬ КОАГУЛЯЦИИ КОНТАКТА ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

В.С. Деева, С.М. Слободян
(ЭНИН НИТПУ)

Установлена связь изменения плотности тока, передаваемого вакуумным выключателем, с величиной смещения элементов его контактной пары как мерой оценки ухудшения физического состояния и надёжности вакуумных выключателей, вызванного эксплуатационными факторами в процессе их практического функционирования.

Ключевые слова: вакуум, электрический контакт, выключатель, оценка.

Повышению надёжности и эффективности элементов, систем и средств электроснабжения потребителей электрической энергии в настоящее время уделяется много внимания. Электротехнической промышленностью разработана и используется [1 – 6] широкая номенклатура выключателей тока для решения задач коммутации линий электро-снабжения и защиты оборудования энергетических систем и электрических сетей от аварий и перенапряжений. Одни из самых перспективных для этой цели – вакуумные выключатели с большой величиной отключаемого тока и ресурса работы, особенно в линиях до 35 кВ, наиболее распространённых в системах электроснабжения всех видов потребителей. Один из путей повышения надёжности вакуумных выключателей – исследование наибольшего числа физических процессов и явлений, протекающих при их практической работе.

Анализ влияния совокупности действующих факторов на основные параметры и качество выполнения заданных выключателю функций может послужить основой как разработки новых принципов и создания нового типа устройств и элементов выключателей тока в средствах оперативного контроля сигнализации об авариях, так и улучшения существующих.

Часто при испытаниях вакуумных выключателей не учитывают большое число факторов влияния, в том числе неидеальной геометрии совмещения контактных плоскостей из-за допускаемого производителем конструктивного смещения осей контакта, равного ~10% от размера элементов круглой формы контактной пары. Эти особенности образования контакта элементов пары часто оказывают превалирующее влияние на пропускную способность выключателей по плотности тока переключения и их надёжность. До сих пор отсутствуют работы по оценке влияния геометрии, формы и других факторов на номинальные значения основных параметров, в частности изменения плотности

тока, передаваемого вакуумным выключателем, в стационарном и динамическом режимах переключения электрических линий. Анализ опыта эксплуатации [1 – 6] вакуумных выключателей показывает, что, несмотря на их эффективное применение, аварийность сетей сохраняется на высоком уровне. В связи с этим проблема выявления факторов, снижающих надёжность, сохранила актуальность и в наше время.

Цель настоящей работы – изучение особенностей влияния взаимного смещения элементов контактной пары на среднее значение плотности тока, передаваемого контактными элементами вакуумных выключателей.

Исследование и анализ работы вакуумных выключателей тока, фрагмент типичного устройства контактного узла которых в отключённом состоянии приведён на рис. 1, наиболее интересны в реальных условиях коммутационного функционирования.

Как показывают экспериментальные исследования и практическая эксплуатация вакуумных выключателей [1 – 6], процессы, протекающие в дугогасящей камере выключателя и электрической линии, связанные с коммутацией тока на стадиях его

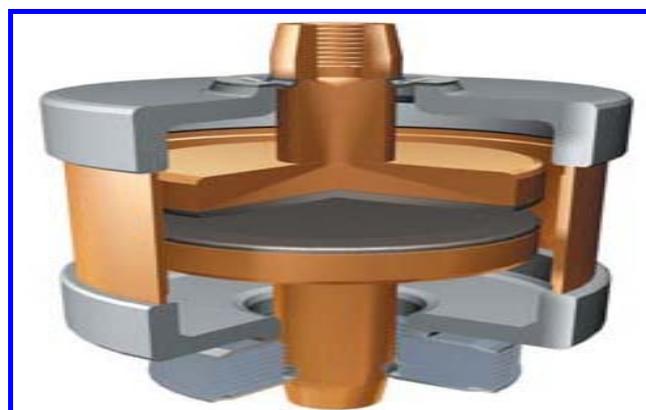


Рис. 1. Типичная конструкция контактного пространства вакуумного выключателя ВВ/TEL [6] в состоянии «отключено»



Рис. 2. Типичная коагуляция контактной поверхности элемента контактной пары вакуумного выключателя (наглядная иллюстрация смещённого воздействия на контактную поверхность элемента)

«включения – отключения», представляют значительную опасность (рис. 2) для состояния элементов контактной пары вакуумного выключателя, электрических линий и оборудования, выбор параметров которого осуществляют для нормального функционирования вакуумного выключателя в стационарном режиме. Результаты эксплуатации (см. рис. 2) наглядно указывают на важность проведения оценки влияния смещения элементов контактной пары на плотность тока, коммутируемого вакуумным выключателем.

В исходном положении смыкание поверхностей двух элементов контактной пары вакуумного выключателя можно рассматривать как смыкание двух двумерных поверхностей, не являющихся зеркальными, или расслоения сечений контактных поверхностей элементов пары. Для математической формализации описания примем, что поверхности сечения контакта двух смежных половин вакуумного выключателя образуют всюду плотное контактное множество. При нарушении жёсткости совмещения и допускаемого конструкторами при проектировании и практическом исполнении наличия взаимного смещения контактных поверхностей элементов пары представляет интерес получение оценки меры коагуляции области пространства контактного взаимного покрытия сопрягаемых элементов контактной пары. В общем виде такая взаимосвязь может быть установлена аналитическим решением двойного интеграла от функции двух переменных, распространённым на площадь перекрытия S в декартовой системе координат:

$$S_{\text{кп}} = \int_S f(x, y) dS \equiv \iint_S f(x, y) dS = \int_a^b \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dx dy,$$

где $y = \varphi_1(x)$ и $y = \varphi_2(x)$ – уравнения верхней и нижней частей кривой описания формы двух контактных элементов, ограничивающей площадь перекрытия $S_{\text{кп}} \equiv S$; a и b – абсциссы крайних левой и правой точек сечения перекрытия; $dx dy = dS$ – элемент площади взаимного перекрытия друг друга элементами контактной пары.

Предположим, что идентичность размеров сечений расслоения контакта элементов круглой формы диаметра $d = 2r$, в таком случае функцию коагуляции площади их взаимного контактного покрытия можно представить в виде $S_{\text{кп}} = \eta_{\text{п}} S_i$. При совпадении площадей и формы элементов $S_{\text{кп}} = S_i$, так как $\eta_{\text{п}} = 1$. Обозначим $\delta = (\delta_x^2 + \delta_y^2)^{1/2}$ – модуль вектора взаимного смещения элемента (круглой или квадратной форм) относительно второго элемента той же формы. Тогда относительное смещение их центров определится соотношением $\delta = (0,5d + x)/d$, где x – абсолютное значение взаимного смещения элементов; $0 \leq x \leq 0,5d$ – интервал изменения смещений.

В сделанных предположениях для коллинеарной геометрии расположения осей симметрии элементов контактной пары и её сохранения для любых траекторий динамического смещения контактных элементов в процессе переключения – коммутации тока линии, используя приведённые выше интегральные выражения, можно вычислить эффективность взаимодействия элементов контактной пары вакуумного выключателя. За основу количественной оценки меры коагуляции как эффективности использования площади контакта элементов контактной пары примем ранее принятое соотношение для коэффициента оценки изменения площади взаимного перекрытия торцов элементов контактной пары $S_{\text{кп}} = \eta_{\text{п}} S_i$ или в относительной мере измерения $\eta_{\text{п}} = S_{\text{кп}}/S_i$.

Для контактного сечения круглой формы диаметра d сплошного заполнения поверхности элементов контактной пары коэффициент эффективности $\eta_{\text{п}}$ как функцию изменения площади их взаимного контактного перекрытия можно представить в виде соотношения, полученного на основе решения интегрального функционала – двойного интеграла от функции двух переменных:

$$\eta_{\text{п}} \sim \left[1 + \frac{4}{\pi} (2\delta - 1) \sqrt{\delta - \delta^2} + \frac{2}{\pi} \arcsin(1 - 2\delta) \right].$$

Для прямоугольной формы $a \times b$ контактной области элементов контактной пары выключателя и взаимного смещения элементов по одному из направлений, например, δ_a или δ_b декартовой си-

стемы координат (x, y) , совмещённой с плоскостью контактного расслоения элементов, коэффициент эффективности контактного перекрытия друг друга элементами контактной пары определяется просто: $\eta_{\text{п}} = \delta_a/a$ или $\eta_{\text{п}} = \delta_b/b$. При векторном смещении эффективность контакта $\eta_{\text{п}} = \delta_a\delta_b/ab$.

Эти соотношения можно использовать для нахождения оценок закономерности изменения плотности тока, передаваемого вакуумным выключателем, при нарушении осевой симметрии контакта элементов пары. В таблице приведены значения результатов расчёта эффективности передачи тока круглой η_0 и квадратной $\eta_{\text{к}}$ форм элементами контакта при их взаимном смещении, а также влияние формы элементов на различие $\Delta\eta_{\text{ко}}$ – эффективности передачи тока элементами при их взаимном смещении.

При определении степени влияния нарушения осевой симметрии совмещения разделяемых элементов (смещения контактных областей) контактной пары вакуумного выключателя на изменение плотности тока, передаваемого через элементы контактной пары, могут быть использованы разные подходы. В первом приближении для упрощения процедуры получения оценок можно применить подход, действующий при большой жёсткости конструкции, управляющей динамикой осевого перемещения подвижного элемента контактной пары. Для конструкции, типа приведённой (см. рис. 1), справедливо предположение, действующее на практике, малости смещения области контакта плоскостей двух элементов разделяемой контактной пары выключателя. Тогда при малом рассогласовании совмещаемых кругов радиусом r элементов контактной пары будет справедливо линейное разложение тригонометрической функции синуса: $\sin \alpha \cong \alpha = \delta/r$; оно действует в диапазоне смещений порядка $\delta \approx 0,1r$.

Степень коагуляции эффективного контактного сечения в области расслоения элементов контактной пары выключателя круглой формы контактных поверхностей элементов пары может быть определена простым алгебраическим соотношением

$$S_{\text{п}|r_1=r_2=r} \cong r^2 \left(\frac{\pi\alpha}{180} - \sin\alpha \right).$$

Относительная погрешность применения этого соотношения для оценки влияния смещения двух (подвижного элемента с неподвижным) элементов контактной пары вакуумного выключателя достаточно точна. Для точного $\delta = 0$ совпадения

δ	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
η_0	2,0	1,58	1,35	1,18	1,07	1,0
$\eta_{\text{к}}$	2,0	1,67	1,42	1,25	1,11	1,0
$\Delta\eta_{\text{ко}}$	0	0,09	0,07	0,07	0,04	0

осей симметрии круглой формы элементов погрешность оценки коагуляции площади взаимного покрытия элементов контактной пары не превышает 3,2% ($\Delta s = S_{\text{п}}/S_0 = 3,04r^2/\pi r^2$). При полном 100% расхождении $\delta/r = 1$ осей симметрии круглой формы элементов относительная погрешность оценки коагуляции площади взаимного покрытия элементами контактной пары тождественна нулю.

Одним из самых тяжёлых для выключателей тока режимов функционирования является разрыв линии передачи тока, протекающего через элементы контактной пары при коротком замыкании сети. Сравнение результатов анализа с данными испытаний нормированными импульсами тока длительностью $2 \cdot 10^{-3}\text{с}$ и $(1,25 \dots 2,5)10^{-3}\text{с}$ подтверждает достаточный запас стойкости и пропускной способности по плотности передаваемого тока в коммутационном режиме выключателя при идеальном совмещении элементов контактной пары. Пересчёт токов для разных вариаций смещения центров элементов контактной пары выключателя может быть проведён с учётом зависимости $\eta I_0 = \text{const}$, где η – коэффициент эффективности относительного использования полной контактной площади перекрытия элементов контактной пары (мера коагуляции). Даже беглый взгляд на это соотношение показывает, что выход из строя выключателей будет происходить при протекании значительно меньшего номинального значения тока отключения, причём перегрузка контактного сечения элементов контактной пары вакуумного выключателя будет расти пропорционально росту плотности тока переключения при разрыве линии.

Тепловые и электродинамические нагрузки электрической дуги отключения нарушают параллельность плоских контактных поверхностей элементов пары (см. рис. 2) и при повторных включениях выключателя эффективная площадь контакта существенно уменьшается. Это увеличивает в контактной области удельную плотность тока, которая может превышать предельные, установленные производителем, значения. Резкий рост удельной плотности тока заметно увеличивает электроэрозионный износ контактных поверхностей, что приводит к аварийным ситуациям, вплоть до сваривания элементов контактной пары. Кроме того, эффект точечного приваривания приводит не только к за-

медлению процесса разрыва линий электрической сети, но и к увеличению перенапряжений в линиях электропередач.

Тепловое воздействие дуги, возникающей в межконтактном промежутке, на контактную поверхность элементов контактной пары и временное замедление разрыва электрической линии – это два фактора, кажущиеся на первый взгляд незначительными и кратковременными, оказывают превалирующее влияние из-за достаточно сильного физико-механического воздействия на контактную поверхность элементов пары, пластическая деформация которых выводит сильноточный выключатель из строя, разрушая, как показано на рис. 2, его плоскостную форму поверхностей контактного разрыва проводника. Отведение тепла из контактной зоны существенно облегчит условия работы токоведущих элементов, позволит увеличить токовую нагрузку без увеличения их активного сечения и повысит эффективность элементов вакуумных выключателей, например [6], серии ВВ/TEL.

Практическая ценность настоящей работы: проведено апробирование метода количественной оценки влияния смещения элементов контактной пары на изменение плотности тока вакуумного выключателя.

Выводы

Показано, что наибольшее влияние на ухудшение качества передачи тока и снижение надёжности вакуумных выключателей оказывает формирование контактной области разрыва линии тока при наличии геометрического смещения элементов пары, обусловленного механической деформацией геометрии осей, электроэрозионной и тепловой деформацией плоскостей контакта элементов контактной пары.

Литература

1. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями / В. А. Воздвиженский, А. Ф. Гончаров, В. Б. Козлов. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 198 с.
2. Чунихин А. А. Электрические аппараты / А. А. Чунихин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
3. Румянцев Д. Е. Современное вакуумное коммутационное электротехническое оборудование сетей и подстанций / Д. Е. Румянцев. – М. : ИПК госслужбы, 2000. – 71 с.
4. Кужеков С. Л. Практическое пособие по электрическим сетям и электрооборудованию / С. Л. Кужеков. – Ростов н/Д : Феникс, 2009. – 492 с.
5. Вакуумные коммутационные аппараты / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, Г. А. Евдокимов [и др.]. – СПб. – 1995. – 62 с.
6. Вакуумные выключатели серии ВВ/TEL [Электронный ресурс]. – М. : ТАВРИДА ЭЛЕКТРИК, 2012. – 34 с. – <http://www.tavrida.ru/Product/CommutationDevice/VacuumSwitch1000A>.

Поступила в редакцию 23.04.2013

*Вера Степановна Деева, аспирант, т. (382) 230-31-33, e-mail: veradee@mail.ru.
Степан Михайлович Слободян, д-р техн. наук, доцент, профессор,
т. (382) 256-32-67, e-mail: sms_46@ngs.ru.*