

УДК 536-3: 53.043:537.5

**С.М. Слободян<sup>1</sup>, В.С. Деева<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, Омск, Россия<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

## **ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ОСЕЙ СИММЕТРИИ КОНТАКТА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ТОКА**

Нарушение соосности в динамике движения элементов контакта выключателя мощного тока, в частности вакуумного выключателя (ВВ), при разрыве линии высокой плотности тока и высокого уровня напряжения в сильной мере ухудшает надёжность процедуры включения/отключения и снижает живучесть выключателя. В работе проведён анализ меры влияния нарушения соосности контактных элементов выключателя на изменение плотности тока в пространстве геометрии динамического разрыва контакта. Предложена аналитическая модель, устанавливающая зависимость изменения плотности тока в пространстве динамического разрыва контакта от относительного смещения осей симметрии элементов контакта. Выполнены численные расчёты, указывающие на высокую критичность влияния изменения плотности тока, передаваемого вакуумным выключателем, при нарушении соосности элементов его контактной пары. Эксперименты и теоретическая оценка модели указывают на важность учёта влияния этого геометрического фактора для предотвращения ухудшения физического состояния и надёжности вакуумных выключателей. Приведён пример (фото) наглядного действия геометрического фактора на разрушение поверхности элемента контакта вакуумного выключателя. Модель учитывает влияние ряда факторов в практической эксплуатации мощных выключателей.

**Ключевые слова:** вакуум, электрический контакт, мощный выключатель тока, оценка.

**S.M. Slobodyan<sup>1</sup>, V.S. Deeva<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Omsk State Technic University, Omsk, Russian Federation<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

## **THE EFFECT OF THE MISALIGNMENT OF THE AXIS ON THE POWER SWITCH**

It is known that the misalignment on the contact elements in high power switches on breaking the contact results in a lower reliability and durability. We investigate the relationship between the change in the misalignment on the contact elements and the change in the current density in regards to the dynamic behavior of the contact. The analytical model for electrical contact between elements in high power switches describing the impact of the relative misalignment on the change in the current density in the dynamic contact area. The numerical calculation and verification demonstrate the critical influence of the misalignment of the contact elements on the current density, and therefore when planning to enhance reliability of the electrical contact it is important to make allowance for this result. The example of the crushing the surface of the contact elements under misalignment is considered in this paper.

**Key words:** vacuum, electrical contact, high voltage switches, evaluation.

Повышение эффективности систем и средств электроснабжения потребителей электрической энергии [1–11] является в настоящее время ключевым вопросом. Электротехническими предприятиями как мировой, так и отечественной энергетики разработаны и активно используются [7–11] выключатели широкой номенклатуры тока для решения задач коммутации линий электроснабжения и защиты оборудования энергетических систем и электрических сетей от аварий и перенапряжений. Наиболее перспективны для этой цели вакуумные выключатели [7, 8, 10–15], обладающие большей величиной отключаемого тока и длительным ресурсом работы. Их широко применяют в электрических линиях до 35 кВ, наиболее распространенных в системах электроснабжения всех видов потребителей. Один из путей повышения надёжности вакуумных выключателей – это [1–5] исследование влияния большого числа физических процессов и явлений, возникающих как при функционировании выключателей, так и в технологическом процессе их производства, а также в практической работе.

Проведение тщательного анализа влияния действующих факторов на технические параметры и качество выполнения заданных выключателю функций может послужить основой не только для разработки и создания выключателей нового типа, но и улучшения существующих элементов и устройств выключателей мощного тока и высокого напряжения в средствах оперативного контроля и сигнализации об авариях.

Часто при испытаниях вакуумных выключателей не учитывают большого числа факторов влияния, в том числе конструкционного геометрического фактора несоосности и некомпланарности поверхностей границ контактного пространства пары элементов вакуумного выключателя. Определение важности влияния этого явления на живучесть выключателя и протекающие в выключателе физические процессы требует установления аналитической зависимости взаимосвязи и оценки степени влияния геометрии, формы и других факторов на номинальные значения основных параметров выключателя. В частности, выявление степени влияния геометрического фактора на изменение плотности тока, передаваемого вакуумным выключателем в стационарном и динамическом режимах включения и отключения электрических линий. Анализ эксплуатации [7–15] вакуумных выключателей показывает, что, несмотря на их

эффективное применение, аварийность электрических сетей сохраняется на достаточно высоком уровне. Поэтому проблема выявления факторов, снижающих надёжность, является актуальной в настоящее время.

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

Исследование и анализ работы вакуумных выключателей тока, фрагмент типичного устройства контактного узла которых в отключенном состоянии приведён на рис. 1, *а*, наиболее интересны в реальных условиях коммутационного функционирования (рис. 1, *б*).



Рис. 1. Фрагмент подобия типичной конструкции в состоянии «отключено» (слева) и фрагмента (справа) сечения расслоения «трубки» тока контактного пространства вакуумного выключателя ВВ/TEL [11] в момент динамического разрыва непосредственного контакта поверхностей элементов пары

Геометрически неидеальная компланарность границ и сечения расслоения контактного пространства является в процессе практической эксплуатации вакуумного выключателя [11–15] фактором движения выключателя к катастрофе. Пространственное ( $X$ ;  $Y$ ;  $Z$ ) нарушение идеальности совмещения плоскостей контактной пары элементов в сечении расслоения контакта ведёт к неконтролируемому ускорению формирования критически аварийного состояния вакуумного выключателя. Смещение осей продольной симметрии элементов контакта в начальном состоянии может [7–11] достигать значений, примерно равных  $\sim 10\%$  от размера (диаметра) контактной поверхности формы круга элементов пары выключателя. Этот случайно возникающий геометрический фактор несоосности осей симметрии контакта пары элементов часто оказывает существенное влияние на изменение пропускной способности потока электронов «трубки» тока в сечении расслоения контактного пространства вакуумного выключателя. Несосоосность

осей симметрии увеличивает в пространстве сечения расслоения «трубки» тока – области разрыва поверхностей контакта элементов удельную плотность распределения электрического тока, протекающего через элемент площади реальной области контакта (дифференциальный закон Ома). Согласно закону Джоуля–Ленца уменьшение площади сечения проводника (в данном случае «трубки» тока в сечении расслоения поверхностей, образующих пространство разрыва непосредственного контакта) увеличивает квадратично мощность тепловых потерь в элементах, образующих это пространство разрыва. Повышение температуры элементов контакта ухудшает [16–17] термодинамику контактного пространства разрыва «трубки» тока, снижая надёжность вакуумных выключателей.

Как показывают данные эксперимента и практика реальной эксплуатации вакуумных выключателей [1–15], процессы, протекающие в дугогасящей камере выключателя и электрической линии, связанные с явлениями коммутации мощных токов, ведут [1–6] к возникновению скачка перенапряжений в электрической линии на стадиях «включения–отключения» линий. Эти процессы ввиду высоких потерь тепловой мощности в пространстве контакта элементов и электродинамического действия большой силы токов и магнитных полей представляют собой опасный фактор, приводящий (рис. 2) к тепловой и механической деформации поверхности элементов контактной пары вакуумного выключателя электрических линий. Тепловая и механическая деформация поверхности элементов контактной пары существенно меняет форму и геометрию поверхности элементов контактной пары вакуумного выключателя электрических линий, приводя выключатель в аварийное состояние.

Как видно на фото (рис. 2), реальное состояние формы и геометрии контактных поверхностей элементов пары вакуумного выключателя существенно отличается от исходной формы и геометрии контактных элементов, выбор параметров которых осуществляют инженеры и конструкторы для нормального функционирования выключателя в установившемся стационарном режиме. Результаты практической эксплуатации (см. рис. 2) наглядно указывают на важность получения аналитической взаимосвязи и численной оценки влияния нарушения соосности элементов контактной пары на плотность тока, коммутируемого вакуумным выключателем.



Рис. 2. Типичная деформация контактной поверхности элемента вакуумного выключателя (асимметрия действия «трубки» мощного тока на контактную поверхность сечения расслоения)

**Аналитическая модель.** Примем, за А верхний цилиндрического типа контактный элемент, а за Б – нижний также цилиндрического типа элемент контактной пары. В исходном состоянии контактного пространства смыкание поверхностей двух (А–Б) элементов контактной пары вакуумного выключателя можно рассматривать как смыкание двух двумерных поверхностей, не являющихся строго зеркальными. Другими словами, динамическое контактное пространство пары элементов вакуумного выключателя можно рассматривать как расслоение сечений однородной плотности пространства материала поверхностей контакта элементов пары выключателя. Для математической формализации описания аналитической модели контактного пространства примем, что поверхности сечения контакта двух смежных половин вакуумного выключателя геометрически образуют всюду плотное контактное множество. При нарушении жёсткости совмещение поверхностей элементов контактной пары в динамике их движения происходит в пределах допуска, который установлен конструкторами при проектировании и практическом исполнении вакуумного выключателя [11]. Наличие допуска несоосности контактных элементов обуславливает наличие определённой изготовителем некоторой величины взаимного смещения осей симметрии контактных поверхностей элементов пары внутри выключателя. Вот эта величина взаимного смещения осей симметрии контактных поверхностей элементов может служить базовой основой для получения численной оценки размера пространства  $(X; Y; Z)$  и площади реального контакта. Реальный размер контактного пространства  $(X; Y; Z)$  выключателя определяется размером области взаимного покрытия сопрягаемых поверхностей элементов контактной пары в момент их совмещения. Учёт

значения допуска несоосности является мерой величины смещения осей симметрии элементов. В общем виде такая взаимосвязь устанавливается аналитическим решением двойного интеграла от функции двух переменных, распространённым на площадь  $S$  перекрытия поверхностей сопригаемых элементов контакта в декартовом представлении системы координат выключателя:

$$\int_S f(x, y) dS \equiv \iint_S f(x, y) dS = \int_a^b \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где  $y = \varphi_1(x)$  и  $y = \varphi_2(x)$  – уравнения верхней и нижней частей кривой, соответствующей функции описания формы поверхности контактных элементов А и Б, ограничивающей площадь перекрытия элементов контакта  $S_{\text{кп}} \equiv S$ ;  $a$  и  $b$  – абсциссы крайних левой и правой точек сечения площади перекрытия;  $dx dy$  – элемент площади контакта как площади взаимного перекрытия элементов в сечении расслоения «трубки» тока контактной пары выключателя (дифференциал),  $dx dy = dS$ .

В предположении идентичности геометрии и размеров сечений поверхности расслоения контакта обоих элементов А и Б круглой формы диаметра  $2r$  функцию изменения площади их взаимного контактного перекрытия можно представить в виде

$$S_{\text{кп}} = \eta_{\text{п}} S_i. \quad (2)$$

При совпадении площадей и формы поверхности контактных элементов и при совмещении осей симметрии получим равенство  $S_{\text{кп}} = S_i$ . При совмещении осей симметрии элементов коэффициент степени взаимного покрытия площадей элементов контакта равен единице,  $\eta_{\text{п}} = 1$ .

Обозначим  $\delta$  – модуль вектора взаимного смещения центра элемента А (круглой или квадратной форм) относительно центра второго элемента Б той же формы,  $\delta = (\delta_x^2 + \delta_y^2)^{1/2}$ . Тогда относительное смещение центров симметрии площадей элементов контакта определится соотношением:

$$\delta = 1 + x/r, \quad (3)$$

где  $x$  – абсолютное значение взаимного смещения осей симметрии обоих А и Б элементов контакта.

В сделанных предположениях принята коллинеарная геометрия расположения осей симметрии элементов контактной пары выключателя. Считаем, что она сохраняется для любых траекторий динамического

смещения контактных элементов в процессе выполнения операций «включение–выключение» или коммутации мощного тока линии. Используя приведённые выше интегральные уравнения, можно вычислить эффективность динамического взаимодействия элементов контактной пары выключателя в разных условиях нарушения осевой симметрии элементов контакта. Основой количественной оценки эффективности использования площади контакта элементов контактной пары для передачи тока будет являться ранее принятое соотношение для относительного коэффициента степени перекрытия площадей элементов контакта – меры изменения площади взаимного перекрытия сечения торцов элементов контактной пары:

$$S_{\text{кп}} = \eta_{\text{п}} S_i,$$

или в относительной мере измерения:

$$\eta_{\text{п}} = S_{\text{кп}} / S_i. \quad (4)$$

Для контакта элементов с сечением формы круга диаметром  $2r$  и сплошного (всюду плотного) заполнения контактной области совмещения поверхностей элементов коэффициент эффективности  $\eta_{\text{п}}$  контактной пары, соответствующий функции изменения площади взаимного контактного покрытия, можно получить решением многомерного функционала вида двойного интеграла от функции двух переменных. При решении функционала – двойного интеграла от функции двух переменных коэффициент эффективности  $\eta_{\text{п}}$  контактной пары элементов выключателя получим из соотношения:

$$\eta_{\text{п}|r_1=r_2=r} \cong \left( \frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha \right). \quad (5)$$

Для прямоугольной формы форматом  $a \times b$  элементов контактной пары выключателя при взаимном смещении осей симметрии элементов по одному из направлений, например  $\delta_a$  или  $\delta_b$ , коэффициент эффективности перекрытия площадей элементов контактной пары определяется просто:

$$\eta_{\text{п}} = \delta_a / a \quad (6.1)$$

или

$$\eta_{\text{п}} = \delta_b / b. \quad (6.2)$$

При векторном смещении элементов эффективность контакта определяется по формуле

$$\eta_{\text{п}} = \delta_a \delta_b / ab. \quad (6.3)$$

Система координат  $(x, y)$  сечения контактного пространства квадратных элементов выключателя совмещена с плоскостью контактного расслоения совмещаемых поверхностей элементов контактной пары.

Эти соотношения можно использовать для нахождения численных оценок функции изменения плотности тока в зависимости от величины смещения осей симметрии элементов контакта. В таблице приведены числовые значения данных расчета эффективности передачи как роста плотности распределения тока в круглой  $\eta_0$  и квадратной формы  $\eta_k$  элементах контакта при одинаковом смещении их центров симметрии. Приведённые в таблице данные позволяют путём сравнения также оценить различие в зависимости влияния формы (круга и квадрата) элементов контакта на закономерность  $\Delta\eta_{\text{к}0}$  – разности в изменении плотности тока при одном и том же смещении осей симметрии этих элементов.

Расчётные значения изменения плотности тока в «трубке тока» элементов круглой и квадратной форм контакта от величины относительного смещения осей симметрии элементов контактной пары

$\delta$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\eta_0$	2,0	1,58	1,35	1,18	1,07	1,0
$\eta_k$	2,0	1,67	1,42	1,25	1,11	1,0
$\Delta\eta_{\text{к}0}$	0	0,09	0,07	0,07	0,04	0

Для сравнительного анализа степени влияния нарушения осевой симметрии областей совмещения элементов (разной меры смещения контактных элементов) контактной пары вакуумного выключателя на изменение плотности распределения тока, передаваемого через контактное пространство элементов контактной пары, могут быть использованы разные подходы. В первом приближении, для упрощения процедуры получения численных оценок, можно применить подход, действующий при большой жёсткости конструкции с динамикой осевого перемещения подвижного элемента контактной пары. Для конструкции, приведённой на рис. 1, справедливо действующее на практике предположение о достаточно малой величине рассогласования центров симметрии плоскостей контакта двух элементов как сечения динамически разделяемой контактной пары выключателя. Тогда при малом



значении рассогласования центров совмещаемых сечений контакта радиусом  $r$  круглой формы поверхности элементов контактной пары будет справедливо следующее разложение тригонометрической функции синуса:

$$\sin \alpha \cong \alpha = \delta / r . \quad (7)$$

Для подобного разложения предположение о малости параметра действует в диапазоне смещений осей симметрии элементов, равных:

$$\delta \approx 0,1 r . \quad (8)$$

Снижение эффективного размера сечения контакта в области пространства динамического расслоения поверхностей элементов контактной пары выключателя с круглой формой контактных поверхностей элементов пары определяется простым алгебраическим соотношением:

$$S_{\Pi|r_1=r_2=r} \cong r^2 \left( \frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha \right) . \quad (9)$$

Относительная погрешность применения этого соотношения для оценки влияния ассиметрии совмещения центров двух (подвижного А элемента с неподвижным Б) элементов контактной пары вакуумного выключателя достаточно точна. При точном  $\delta = 0$  совмещении осей симметрии круглой формы элементов контакта погрешность оценки изменения площади взаимного покрытия элементами контактной пары не превышает 3,2 % ( $\Delta S = S_{\Pi} / S_0 = 3,04r^2 / \pi r^2$ ). При полном 100%-ном расхождении  $\delta/r = 1$  осей симметрии круглой формы элементов относительная погрешность оценки площади взаимного перекрытия поверхностей элементов контактной пары тождественна нулю.

Одним из самых тяжёлых для выключателей тока режимов функционирования является режим разрыва линии тока (в пространстве «трубки тока»), протекающего через элементы контактной пары при коротком замыкании в электрической сети. Результаты сравнительного анализа с данными практических испытаний – нормированными импульсами тока длительностью  $2 \cdot 10^{-3}$  с и  $(1,25 \dots 2,5) \cdot 10^{-3}$  с подтверждают наличие достаточного запаса 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 закономерности:

$$\eta I_0 = \text{const},$$

где  $\eta$  – коэффициент эффективности относительного перекрытия поверхностей элементов контакта, который отражает степень использования максимально возможной площади контактного перекрытия элементов контактной пары. Даже беглый взгляд на это соотношение показывает, что выход из строя выключателей будет происходить при протекании тока значительно меньшего номинального значения. Причём и в этом случае перегрузка по плотности тока контактного сечения элементов контактной пары выключателя будет расти пропорционально росту плотности тока переключения при разрыве линии – «трубки тока».

Тепловые и электродинамические нагрузки электрической дуги отключения нарушают параллельность плоских контактных поверхностей элементов пары (см. рис. 2), и при повторных включениях эффективная площадь контакта резко уменьшается (на порядок и более). Это резко увеличивает удельную плотность тока в «трубке тока» контактной области. При этом возросшая величина удельной плотности тока в контактной области может заметно превысить предельное значение, установленное производителем. Резкий рост удельной плотности тока значительно увеличивает электроэрозионный износ контактных поверхностей, что приводит к аварийным ситуациям, вплоть до сваривания элементов контактной пары. Кроме того, эффект точечного приваривания приводит к замедлению процесса контактного разрыва выключателем линий электрической сети и, следовательно, к росту перенапряжений в линиях электропередач.

Тепловое воздействие дуги, образующейся в пространстве контактного промежутка, на контактную поверхность элементов контактной пары и наличие некоторого временного тренда в реализации бифуркационной процедуры «контакт–разрыв» «трубки» тока электрической линии – это две требующие особого внимания причины, которые только на первый взгляд кажутся незначительными и кратковременными. Однако из-за геометрической несоосности, рассмотренной в данной статье, они оказывают существенное влияние на создание аварийных ситуаций в вакуумном выключателе. Критичность влияния

геометрического факта асимметрии осей элементов контакта обусловлена достаточно сильным физико-механическим действием нескольких явлений на контактную поверхность элементов пары. Вызванная термодинамическими и электродинамическими явлениями, хотя и кратковременными, пластическая деформация поверхностей элементов контакта выводит вакуумный выключатель из строя, разрушая (см. рис. 2) плоскостную форму его поверхностей – контактного разрыва «трубки» тока – линии проводника. Отведение тепла из зоны контакта облегчает условия работы токоведущих элементов, позволяет повысить токовую нагрузку на токопроводы без увеличения их активного сечения. Эта мера ведёт также к стабилизации живучести и росту надёжности вакуумных выключателей в эксплуатации [11–15].

**Прогнозирование состояния элементов контакта** вакуумного выключателя. Под прогнозом в общепринятом смысле этого термина понимается формулирование научных предположений или формирование математических закономерностей и аналитических выводов о будущем состоянии или изменениях того или иного процесса (события, явления) на основании анализа уже имеющихся или получаемых данных о состоянии этого процесса в прошлом или настоящем. Процедура прогноза отличается от других математических и аналитических оценок, получаемых на достоверно установленных закономерностях изменения исследуемых процессов. Прогноз, являющийся одним из разделов отрасли точных наук, составляется только тогда, когда можно прогноз сформулировать.

Знания о характеристиках динамического процесса включения/отключения линий тока и закономерности изменения внутреннего состояния контактных элементов вакуумного выключателя весьма ограничены [1–15]. Ограниченность знаний о текущем состоянии контактных элементов объясняется имеющимися сложностью и трудностью прямого наблюдения состояния подвижных элементов выключателя, а также отсутствием методик и средств наблюдения для оперативного контроля реального состояния динамически подвижных элементов контакта в процессе эксплуатации вакуумного выключателя. Наиболее реален путь решения проблемы прогноза состояния внутренних элементов выключателя – метод дистанционного теплового контроля с привлечением современных компьютерных средств для моделирования и прогнозирования состояния элементов выключателя [12].

Реализация теплового контроля и прогнозирования состояния внутренних элементов выключателя облегчается несколькими обстоятельствами. Во-первых, для ряда характеристик можно получить аналитические зависимости, которые позволяют вычислить их будущие значения по спрогнозированным закономерностям. Во-вторых, в высокоточной электронике и вакуумной технике накоплен богатый аналитический и экспериментальный опыт с возможностями прогнозирования. Этот опыт, с учётом основ фундаментальной теории подобия, позволяет заключить, что предсказание состояния элементов контакта вакуумного выключателя должно осуществляться по тем же принципам, что и в вакуумной плазменной технике, поскольку оно производится для одного и того же типа среды. Под предсказуемостью обычно понимается возможность прогнозирования состояния некоторого процесса или объекта наблюдения на некоторый временной интервал при априорном наличии в выбранный начальный момент числовых характеристик, описывающих состояние объекта прогнозирования.

Понятно, что для применения известных методов прогноза априори необходимо наличие определённой информации, требующей соответствующего анализа. Такой анализ должен базироваться на ряде основополагающих принципов, репрезентативности, сопоставления, многомерности, соблюдения правил логики, физического подобия, временной последовательности.

Основываясь на положениях известных работ [1–5], можно утверждать, что численный прогноз поведения физических процессов, а случайных процессов тем более, никогда не может быть идеально точным из-за погрешностей в определении начальных состояния и внешних источников ошибок, связанных с влиянием внешних факторов, приводящих к несоответствию динамики численных моделей и условий реальной эксплуатации. Кроме того, имеется ещё и внутренний фактор, например геометрический (конструкционный). Этот фактор обуславливает появление нелинейности и неустойчивости динамики протекания базового процесса, физически приводящих к разрушению исходного состояния поверхности элементов контакта в выключателе.

На основании широко известных походов можно сформулировать требования к точности прогноза состояния контактных элементов выключателя в достаточно простом аналитическом виде. Во-первых, при установлении подобного рода требований важно учесть достигнутую точность средствами измерения  $\delta x_0(P;t)$  и изменение её во времени

$\delta x_d(P;t)$  с заданным обеспечением вероятности  $P$  этого значения точно-сти. Тогда, если предположить, что точность формирования прогноза равна  $\delta x_p(P;t)$ , можно определить общую погрешность результата предсказания в каждом конкретном случае по формуле:

$$[\delta x_{\Sigma}(P;t)]^2 \leq [\delta x_0^2(P;t) + \delta x_d^2(P;t) + \delta x_p^2(P;t)]^2,$$

где  $\delta x_d(P;t)$  – изменение значения параметра  $x(t)$  во времени, включая погрешность его измерения.

Практическая ценность изложенного выше исследования: разработа-тана и апробирована методика количественной оценки степени влияния геометрии смещения осей симметрии элементов контактной пары на изменение распределения плотности тока в сечении расслоения «трубки» тока динамического контактного пространства выключателя.

**Выводы.** Исследованием, проведённым в настоящей работе, выявлено, что наибольшее влияние на ухудшение качества поверхности контактных элементов пространства динамического канала коммутации и передачи электрического тока оказывает геометрический фактор взаимной несоосности осей симметрии контактной пары элементов, ведущий к снижению надёжности функционирования вакуумных выключателей в процессе эксплуатации. Несосоосность осей симметрии контактной пары элементов определяет рассогласование пространственного положения поверхностей пары контактных элементов выключателя. Смещение осей симметрии элементов контактной пары приводит к пространственному сжатию площади реального контакта в сечении расслоения «трубки» тока динамического контактного пространства выключателя при разрыве/соединении электрических линий. Уменьшение («стягивание») площади реального контакта элементов приводит к квадратичному росту плотности распределения тока в сечении расслоения «трубки» тока области динамического разрыва «трубки» тока между элементами расходящегося или сходящегося движения контактных поверхностей элементов пары. Смещение осей симметрии элементов контактной пары обуславливает возникновение асимметричного действия физически мощных сил механической деформации геометрии поверхности элементов контакта, возрастанию электроэрозионной, тепловой и электродинамической деформации контактных плоскостей (вплоть до их расплавления) и трудно прогнозируемого изменения пространственного положения контактных поверхностей элементов контактной пары выключателя.

### Библиографический список

1. Agarwal M.S., Holms R. Arcing voltage of the metal vapour vacuum arc // *Journal Physics D: Applied Physics*. – 1984. – Vol. 17(4). – P. 757–767.
2. Miller H.G. A review of anode phenomena in vacuum arcs // *Contributions to Plasma Physics*. – 1989. – Vol. 29(3). – P. 223–249.
3. Klajn A. Switching vacuum arc in a pulsed transverse magnetic field // *IEEE Transactions on Plasma Sciences*. – 1999. – Vol. PS-27. – № 4. – P. 977–983.
4. Alferov D.F., Ivanov V.P., Sidorov V.A. High-current vacuum switching devices for power energy storages // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1999. – Vol. 35(1). – P. 323–327.
5. High-current vacuum arc a strong axial magnetic field / A.M. Chaly, A.A. Logatchev, K.K. Zabello, S.M. Shkol'nik // *IEEE Transactions on Plasma Sciences*. – 2007. – Vol. 35. – Iss. 4. – P. 939–945.
6. Vacuum circuit breaker switching transients during switching of an LMF transformer / D.D. Shipp, T.J. Dionise, V. Lorch, V.G. MacFarlane // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2012. – Vol. 48(1). – P. 37–44.
7. *Vacuum Electronics: Components and Devices* / Eds. J.A. Eichmeier, M. Thumm. – Berlin: Springer Verlag, 2008. – 540 p.
8. Picot P. Vacuum switching // *Cahier Technique Schneider Electric*. – 2000. – № 198. – 36 p.
9. IEEE Std C37.20.2-1999. IEEE Standard for Metal-Clad Switchgear.
10. URL: <http://emtvk.ru/en/products/vacuum-switching-devices/>
11. URL: <http://www.tavrida.ru/Product/CommutationDevice/VacuumSwitch1000A>.
12. Слободян С.М. Индикативный подход оценки состояния вакуумного выключателя // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2013. – № 2. – С. 274–276.
13. Деева В.С., Слободян С.М. Модель коагуляции контакта вакуумного выключателя // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. – 2013. – Т. 135(4). – С. 39–42.
14. Слободян С.М. Драйвинг контакта элементов вакуумного выключателя // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2014. – № 1. – С. 21–23.
15. Слободян С.М. Коагуляция контакта вакуумного выключателя // *Энергетик*. – 2014. – № 6. – С. 13–15.

16. Identification of space contact for a dynamics medium / V.S. Deeva, M.S. Slobodyan, G.A. Elgina, S.M. Slobodyan, V.B. Lapshin // Informatics, Networking and Intelligent Computing: Proceedings of the 2014 International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing (INIC 2014): Chapter 52 / Ed. by Jiaying Zhang. – Shenzhen, CRC Press, 2015. – P. 257–261.

17. Study of a nonequilibrium plasma model of surface discharge and the influencing factors / W. Sima, C. Liu, M. Yang, H. Xu, Q. Shao // IEEE Transactions on Plasma Sciences. – 2017. – Vol. 45(6). – P. 906–912.

### References

1. Agarwal M.S., Holms R. Arcing voltage of the metal vapour vacuum arc. *Journal Physics D: Applied Physics*, 1984, vol. 17(4), pp. 757-767.

2. Miller H.G. A review of anode phenomena in vacuum arcs. *Contributions to Plasma Physics*, 1989, vol. 29(3), pp. 223-249.

3. Klajn A. Switching vacuum arc in a pulsed transverse magnetic field. *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, 1999, vol. PS-27, no. 4, pp. 977-983.

4. Alferov D.F., Ivanov V.P., Sidorov V.A. High-current vacuum switching devices for power energy storages. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, vol. 35(1), pp. 323-327.

5. Chaly A.M., Logatchev A.A., Zabello K.K., Shkol'nik S.M. High-current vacuum arc a strong axial magnetic field. *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, 2007, vol. 35, iss. 4, pp. 939-945.

6. Shipp D.D., Dionise T.J., Lorch V., MacFarlane V.G. Vacuum circuit breaker switching transients during switching of an LMF transformer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, vol. 48(1), pp. 37-44.

7. Vacuum Electronics: Components and Devices. Eds. J.A. Eichmeier, M. Thumm. Berlin: Springer Verlag, 2008. 540 p.

8. Picot P. Vacuum switching. *Cahier Technique Schneider Electric*, 2000, no. 198. 36 p.

9. IEEE Std C37.20.2-1999. IEEE Standard for Metal-Clad Switchgear.

10. URL: <http://emtvk.ru/en/products/vacuum-switching-devices/>

11. URL: <http://www.tavrida.ru/Product/CommutationDevice/VacuumSwitch1000A>.

12. Slobodian S.M. Indikativnyi podkhod otsenki sostoianiia vakuumnogo vykliuchatel'ia [Estimation of the vacuum switch contact indicator method]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2013, no. 2, pp. 274-276.

13. Deeva V.S., Slobodian C.M. Model' koaguliatsii kontakta vakuumnogo vykliuchatel'ia [Model of the vacuum switch contact coagulation]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*, 2013, vol. 135(4), pp. 39-42.

14. Slobodian S.M. Draiving kontakta elementov vakuumnogo vykliuchatel'ia [Estimating of the vacuum switch contact pair axis removing]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2014, no. 1, pp. 21-23.

15. Slobodian S.M. Koaguliatsiia kontakta vakuumnogo vykliuchatel'ia [Coagulation of the vacuum switch contact]. *Energetik*, 2014, no. 6, pp. 13-15.

16. Deeva V.S., Slobodyan M.S., Elgina G.A., Slobodyan S.M., Lapshin V.B. Identification of space contact for a dynamics medium. *Informatics, Networking and Intelligent Computing: Proceedings of the 2014 International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing (INIC 2014)*; Chapter 52. Ed. by Jiaying Zhang. Shenzhen: CRC Press, 2015, pp. 257-261.

17. Sima W., Liu C., Yang M., Xu H., Shao Q. Study of a nonequilibrium plasma model of surface discharge and the influencing factors. *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, 2017, vol. 45(6), pp. 906-912.

### Сведения об авторах

**Слободян Степан Михайлович** (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор Омского государственного технического университета (644050, Омск, пр. Мира, 11, e-mail: sms\_46@ngs.ru).

**Деева Вера Степановна** (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета (644050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: veradee@mail.ru).

### About the authors

**Slobodyan Stepan Mikhailovich** (Omsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor Omsk State Technic University (644050, Omsk, Mira ave., 11, e-mail: sms\_46@ngs.ru).

**Deeva Vera Stepanovna** (Tomsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenina ave., 30, e-mail: veradee@mail.ru).

Получено 31.07.2017