

УДК 621.318.8

Ю.В. Черкасова, А.С. Иваников

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗВИТИЯ ПРОБОЯ В ВАКУУМНЫХ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТАХ

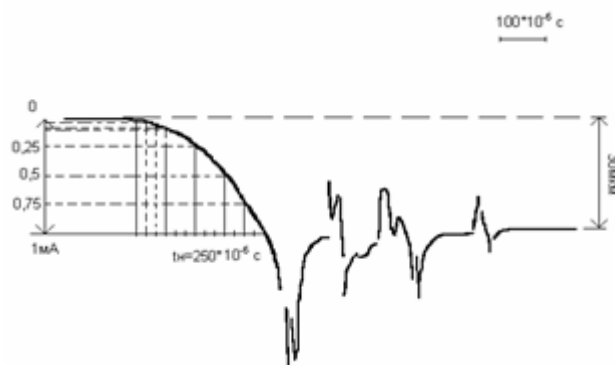
*Рассмотрены результаты исследования механизма развития пробоя в вакуумных магнитоуправляемых контактах. Разработана компьютерная модель формирования электрического пробоя. Приведены результаты моделирования (зависимость напряженности электрического поля и тока автоэлектронной эмиссии от времени).*

**Введение.** Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) широко и успешно используются в качестве элементов коммутационной техники. Они состоят из двух и более намагничиваемых контакт-деталей, которые запаяны внутри герметично закрытого стеклянного баллона. Под действием внешнего магнитного поля пружинящие силы контакт-деталей преодолеваются магнитной силой притяжения, и геркон замыкается. Стеклянная капсула заполнена защитным газом, благодаря чему поверхность контактов не окисляется.

Основной задачей работы является оценка роли предпробойных токов в развитии электрических пробоев при коммутации электрических цепей маломощными высоковольтными коммутаторами. Несмотря на то, что герконы уже 40 лет широко и успешно используются в качестве элементов коммутирующей техники, тема остается актуальной. Это связано с тем, что потребность в герконах постоянно растет, поэтому непрерывное совершенствование изделий и технологий их изготовления является при современном высоком мировом уровне конкуренции одним из основных условий успешной производственной деятельности.

**Теоретические и экспериментальные исследования механизма развития пробоя.** Все теоретические расчеты и экспериментальные исследования проводились для вакуумных высоковольтных магнитоуправляемых контактов (МК) типа МКА-52142 (на современном этапе выпускается его аналог МКА-40141). Такой коммутатор используется для коммутации электрических цепей напряжений от 10 кВ до 20 кВ при токе до 1 мА. Основными особенностями работы такого прибора являются наличие большого ограничительного резистора  $R_{огр} \approx 1 \cdot 10^7$  Ом (10 МОм) и высокая скорость перемещения электродов (контакт-деталей).

На рисунке 1 приведена типовая осциллограмма тока через контакт в момент замыкания при рабочем напряжении  $U_0 = 10$  кВ, токе коммутации  $I_0 = I_k = 1$  мА и  $R_{огр} = 10$  МОм.



**Рисунок 1 – Осциллограмма тока через контакт в момент замыкания  $U_0 = 10$  кВ и  $R_{огр} = 1 \cdot 10^7$  Ом**

Видно, что еще до физического контактирования в межэлектродном зазоре протекает электрический ток. При анализе было сделано предположение, что данный ток обусловлен двумя составляющими: емкостным током вследствие изменяющейся во времени динамической емкости электродов при их перемещении и автоэлектронной эмиссией с микровыступов на катоде, являющейся инициатором электрического пробоя [1]. Расчет тока автоэлектронной эмиссии проводился с использованием уравнения Фаулера-Нордгейма [3, 4, 5].

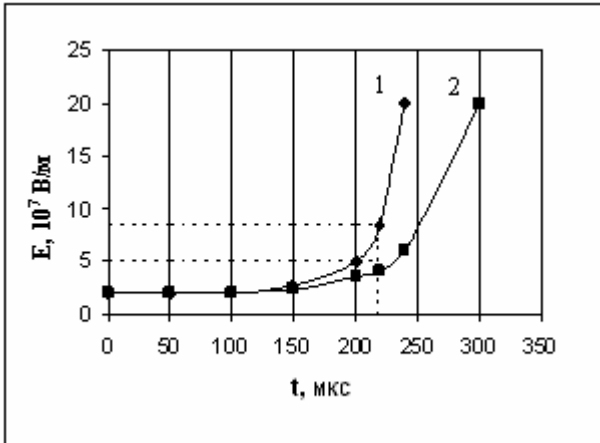
Предварительно была рассчитана напряженность электрического поля:

$$E = \frac{U_0}{d_0 - \frac{at^2}{2}}. \quad (1)$$

Величина ускорения движения контактов принималась постоянной  $a = (1,1 \div 1,5) \cdot 10^4$  м/с<sup>2</sup> с условием, что  $F_{рез} = \text{const}$  в пределах ошибки

10–15% [2]. Время движения контакт-деталей электродов определялось экспериментально по времени нарастания предпробойного тока и для исходного межэлектродного расстояния  $d_0 = 0,5$  мм составило 275–300 мкс.

Результаты расчета приведены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Изменение напряженности поля:**  
 1–  $a = 1,5 \cdot 10^4$  м/с<sup>2</sup>, межэлектродное расстояние  $d_1 = 0,2 \cdot 10^{-3}$  м; 2–  $a = 1,1 \cdot 10^4$  м/с<sup>2</sup>,  $d_2 = 0,14 \cdot 10^{-3}$  м

Напряженность электрического поля, при которой возможна автоэлектронная эмиссия, составляет  $(5 \div 8) \cdot 10^7$  В/м, и такое состояние наступает в момент времени  $t = (200 \div 220) \cdot 10^{-6}$  с, что соответствует межэлектродным расстояниям  $d = (0,2 \div 0,14) \cdot 10^{-3}$  м. Очевидно, что изменение тока до данного времени определяется емкостным током и сопровождается перераспределением заряда между паразитной  $C_1$  и динамической  $C_2$  емкостями при неизменном напряжении на электродах [1].

В принципе, данные утверждения подтверждаются расчетом заряда, переданного динамической емкости, проведенного на основе анализа осциллограммы предпробойного тока, изменение которого во времени определяется зависимостью вида  $I = kt^2$  при  $k = 0,25 \cdot 10^5$  А/с<sup>2</sup> в диапазоне времени  $t = (0 \div 200) \cdot 10^{-6}$  с. В принципе убыль заряда  $C_1$  сопровождается дозарядом этой же емкости, и до величины тока  $I \leq I_0 = 1$  мА возможно динамическое равновесие: ток через контакты равен току дозаряда, и напряжение на приборе остается постоянным. При токе  $I \geq I_0$  внешний источник отключается, и все процессы будут определяться значением паразитной емкости, играющей роль дополнительного источника напряжения.

Теоретическое определение величины и характера изменения плотности автоэлектронного тока проводилось на основе решения уравнения Фаулера-Нордгейма:

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{t^2(y)\varphi} \exp \left[ -\frac{6,85 \cdot 10^9 \varphi^{3/2}}{E} \Theta(y) \right], \quad (2)$$

$$\Theta(y) = 0,95 - 1,03y^2, \quad (3)$$

$$y = 3,62 \cdot 10^{-4} E^{1/2} \varphi^{-1}, \quad (4)$$

где  $t^2(y) \approx 1,1$ ;

$\Theta(y)$  – функция Нордгейма;

$\varphi$  – работа выхода электронов для вольфрама ( $\varphi = 4,5$  эВ);

$E$  – напряженность электрического поля ( $E = \beta E_0$ );

$E_0$  – напряженность электрического поля в условиях монокристаллической поверхности;

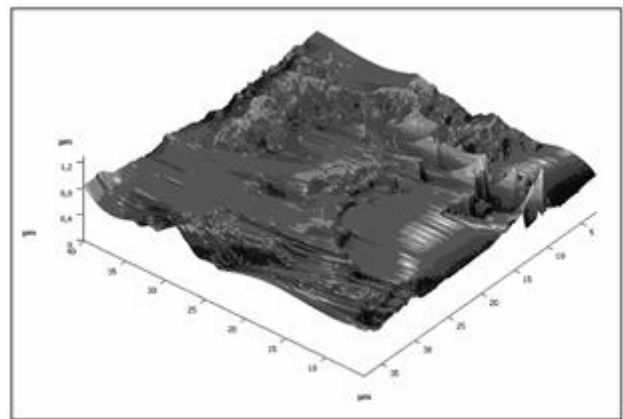
$\beta$  – коэффициент усиления, определяемый геометрической формой эмиттера.

Ток автоэлектронной эмиссии определяется:

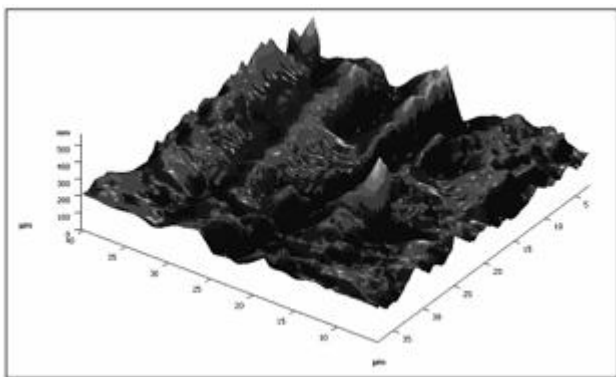
$$I_{АЭЭ} = jS, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь эмитирующего участка контактирующей поверхности.

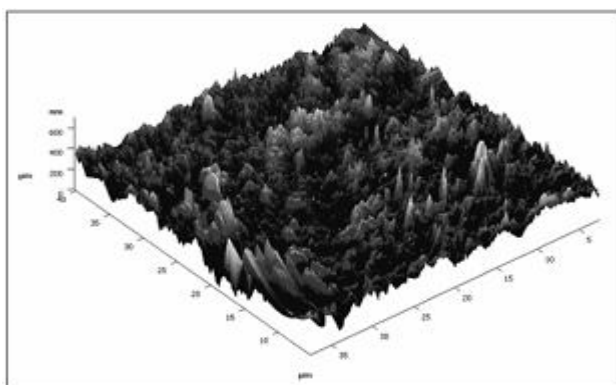
На рисунках 3, 4 и 5 приведен общий вид поверхности контактного покрытия, полученный с помощью атомно-силового микроскопа. Материал покрытия W- вольфрам нанесен различными методами, используемыми при производстве вакуумных высоковольтных МК: кристаллизованное осаждение из газовой фазы  $WF_2$  и осаждение с помощью дугового разряда в парах W- катода.



**Рисунок 3 – Общий вид поверхности контактного покрытия, полученный с помощью атомно-силового микроскопа. Приштамповка**



**Рисунок 4 – Общий вид поверхности контактного покрытия, полученный с помощью атомно-силового микроскопа. Осаждение из дугового разряда**



**Рисунок 5 – Общий вид поверхности контактного покрытия, полученный с помощью атомно-силового микроскопа. Осаждение из дугового разряда (современный)**

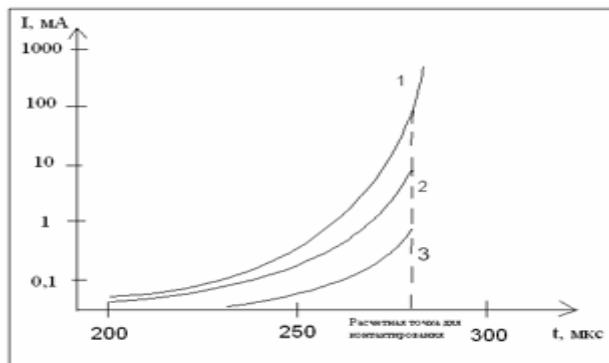
Полученные результаты позволили оценить площадь эмиттера  $S = \pi r^2$  и коэффициент усиления  $\beta$ . Для таких покрытий наиболее вероятная форма эмиттера либо в форме эллипсоида, либо в виде конуса с закругленной вершиной.

В этом случае  $\beta = \frac{ah}{r} + 1$ ,  $a \approx 1$ ,  $r$  – радиус закругления вершины [3].

При этом  $\beta$  изменяется от 2 (для газофазного и дугового осаждения) до 10 (для плазменного метода),  $r$  от  $0,5 \cdot 10^{-6}$  м до  $2 \cdot 10^{-6}$  м соответственно.

Автоэлектронный ток рассчитывается в диапазоне времени 200÷300 мкс, то есть от момента появления до момента контактирования для 2-х крайних значений  $\beta = 2$  и  $\beta = 10$  и  $r = (0,5 \div 2) \cdot 10^{-6}$  м.

Расчет проведен численными методами с шагом по времени 10 мкс. Результаты приведены на рисунке 6.



**Рисунок 6 – Расчетная зависимость тока автоэлектронной эмиссии  $I_{AЭЭ}$ , мА для различных  $\beta$  и  $r$ : 1)  $\beta = 10$ ,  $r = 0,5 \cdot 10^{-6}$  м; 2)  $\beta = 2$ ,  $r = 0,5 \cdot 10^{-6}$  м; 3)  $\beta = 2$ ,  $r = 2 \cdot 10^{-6}$  м**

Следует отметить, что даже в случае  $\beta = 10$  и  $r = 0,5$  мкм (практически в момент контактирования), т.е. при  $t = t_{\text{замыкания}}$  плотность тока равна

$$j = \frac{I}{S} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{\pi r^2} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,25 \cdot 10^{-12}} = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ A/m}^2 = 1,3 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2 \quad (7)$$

что меньше практического значения  $j = 5 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$  [3], ведущего к плавлению эмитирующего выступа.

Результаты расчета показали, что критическая плотность тока, приводящая к разогреву острия – микровыступа на катоде,  $j \geq 5 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$  достигает в момент времени, когда межэлектродный зазор достигает значений 7÷8 мкм, и за оставшееся время эмиттер не успевает не только взорваться, но и разогреться. Поэтому основным механизмом является автоэлектронная эмиссия. Это предположение подтверждается тем, что возможная критическая плотность тока достигается при межэлектродных расстояниях  $(5 \div 7) \cdot 10^{-6}$  м, т. е. практически в момент физического контактирования при очень высоких скоростях перемещения. При этом эмитирующий выступ принятой формы не успевает разогреться, да и величина напряжения и соответственно напряженность электрического поля меньше рассчитанной.

Экспериментальная проверка гипотезы об анодном механизме развития электрического пробоя (локальный разогрев поверхности анода узким пучком автоэлектронов до плавления) в системах с подвижными электродами, в частности в вакуумных МК, представляет значительную трудность. При физическом контактировании разрушается сам эмитирующий выступ, а расплавленная от воздействия автоэлектронной эмиссии микрозона на аноде накладывается на холодный катод с переносом материала контактного покрытия в жидкой фазе. Поэтому харак-

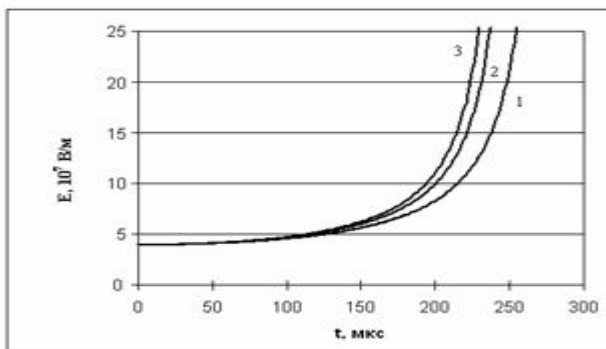
терный для анодного механизма эрозионный след в виде кратера на аноде при единичном контактировании практически не просматривается, и о роли того или иного механизма приходится судить по косвенным результатам.

**Результаты компьютерного моделирования.** В настоящей работе на основе физических процессов, характерных для высоковольтных магнитоуправляемых контактов, была сделана попытка создания компьютерной модели механизма развития электрического пробоя, которая бы существенно расширила оценки влияния различных факторов: скорости перемещения электродов, состояния поверхности электродов, геометрических размеров, величины динамической и паразитных емкостей – на процесс развития разряда.

В основу модели положен физический механизм, использованный выше при анализе формирования электрического пробоя: автоэлектронная эмиссия с бомбардировкой узким по сечению электронным лучом анода с последующим разогревом микроучастка поверхности до температуры плавления и развитие электрического пробоя в парах материала анода.

В результате моделирования для начальной стадии развития пробоя определены динамика распределения напряженности электрического поля и зависимость тока автоэлектронной эмиссии от времени.

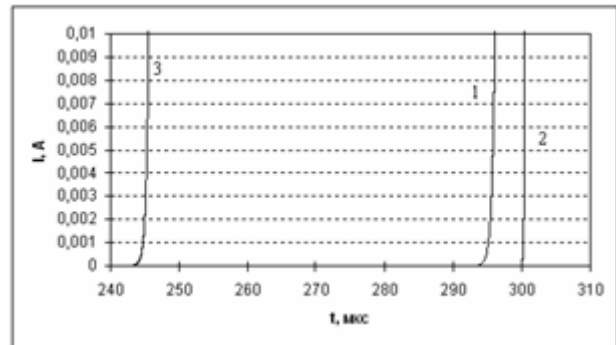
На рисунке 7 показана зависимость напряженности электрического поля от времени при различных значениях ускорения контактов.



**Рисунок 7 – Зависимость напряженности от времени для различного ускорения движения контактов:** 1)  $a = 1,3 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$ ; 2)  $a = 1,5 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$ ; 3)  $a = 1,6 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$

Для данного характера изменения напряженности электрического поля были просчитаны

автоэлектронные токи, предшествующие замыканию контактов при различных коэффициентах усиления поля, и значения высоты и радиуса закругления микровыступов, полученные из результатов исследований на атомно-силовом микроскопе. Зависимость автоэлектронного тока от времени приведена на рисунке 8.



**Рисунок 8 – Зависимость тока автоэлектронной эмиссии от времени для различных коэффициентов усиления:**

- 1)  $\beta = 10$  ( $r = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $h = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $a = 1,1 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$ )
- 2)  $\beta = 2$  ( $r = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $h = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $a = 1,1 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$ )
- 3)  $\beta = 10$  ( $r = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $h = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $a = 1,6 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$ )

**Заключение.** Сравнение результатов моделирования и экспериментальных расчетов показало, что они имеют по порядку величин хорошее соответствие. Это свидетельствует о том, что данная компьютерная модель может служить основой проведения комплекса теоретических исследований физических процессов в системах с подвижными электродами и анализа факторов, определяющих их протекание.

#### Библиографический список

1. Латам Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения: пер. с англ; под ред. Г.С. Белкина. – М.: Энергоатомиздат., 1985. – 192 с.
2. Ушаков И.А., Зуб В.Н. Герконы (принцип действия, конструкция, расчет): учеб. пособие/ под ред. И.А. Ушакова; РРТИ. – Рязань, 1977. – 76 с.
3. Рабкин Л.Н., Евгенова И.Н. Магнитоуправляемые герметизированные контакты: конструкции, свойства, применение. – М.: Связь, 1976. – 104 с.
4. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроники. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
5. Шунне Г.Н. Вопросы электронных и ионных эмиссий (виды эмиссий): учеб. пособие/ РГРТА. – Рязань, 2006. – 84 с.