

## ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.387.322

**В.А. Коротченко, В.И Соловьев, Ж.В. Путилина**

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЫКЛЮЧЕНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕРКОНОВ

*Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования электромагнитных, электрических и механических процессов, происходящих при выключении высоковольтных (до 5 кВ) герконов МКА-40142. В зависимости от времени после выключения питания управляющей катушки приведены основные параметры процессов: сопротивления элементов магнитной цепи, ток катушки, координата движения материальной точки на конце контакт-детали, магнитная, упругая и электрическая силы, действующие на точку, напряжение между контактами и автоэлектронный ток между ними. Показано, что полному размыканию контактов может предшествовать сравнительно длительное (около 1 мс) состояние, в котором межконтактный зазор очень мал (до 0,2 мкм при периодических изменениях с частотой 25 кГц – 50 кГц), что способно приводить к локальному разрушению молибденового покрытия положительного электрода в результате разогрева током автоэлектронной эмиссии.*

**Ключевые слова:** вакуумные высоковольтные герконы, электромагнит, движение материальной точки, электрическое притяжение, колебания контакт-деталей, автоэлектронная эмиссия.

**Введение.** Высоковольтные вакуумные герконы с управляющей катушкой применяются в дорогостоящей аппаратуре специального назначения, и поэтому к их надежности предъявляются повышенные требования [1]. В то же время наличие высокого напряжения увеличивает риск ускоренной эрозии контактных покрытий. Электрическое притяжение контактов при разрыве тока способно замедлять их расхождение, а ток автоэлектронной эмиссии в условиях повышенного напряжения может привести к локальному разогреву и разрушению защитных покрытий контакт-деталей (КД). Эти процессы детально исследовались с помощью компьютерной модели и экспериментально в применении к малогабаритным газонаполненным герконам с коммутируемым напряжением до 100 В и межконтактным зазором 30 мкм [2, 3].

В высоковольтных герконах МКА-40142 допустимое напряжение, зазор и многие другие параметры значительно (в несколько раз) больше. Поэтому представляет интерес исследование комплекса электромагнитных, механических и электронных процессов, происходящих в высоковольтных герконах при их выключении с разрывом электрического тока.

**Цель работы** – получение расчетных и экспериментальных данных, характеризующих размыкание высоковольтных герконов при разрыве электрического тока.

#### **Компьютерная модель процессов**

##### Электромагнитные явления

Ток управляющей катушки после выключения напряжения уменьшается с течением времени в соответствии с соотношением [3]:

$$\frac{dI_k}{dt} = -I_k \frac{R_k R_{ms}}{N_w^2} + \frac{I_k}{R_{ms}} \frac{dR_{ms}}{dt}, \quad (1)$$

где  $I_k$ ,  $R_k$  и  $N_w$  – ток катушки, её сопротивление и число витков;  $R_{ms}$  – суммарное магнитное сопротивление;  $t$  – время.

Магнитная цепь содержит следующие сопротивления: контакт-деталей внутри катушки ( $R_d$ ), области зазора между контактами ( $R_b$ ), воздушной среды снаружи и внутри катушки ( $R_{v1}$  и  $R_{v2}$ ). Приближенно полагается, что сопротивление КД вне геркона входит в  $R_{v1}$ .

Сопротивление  $R_d$  нелинейно зависит от тока катушки в соответствии с кривой намагничивания пермаллоя [8]. Поэтому для каждой ве-

личины тока значение  $R_d$  определяется численным решением системы уравнений Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_m - \Phi R_{v1} - \Phi_d R_d - \Phi_b R_b &= 0; \\ \Phi - \Phi_{v2} - \Phi_d &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_m$  – магнитное напряжение источника (МДС =  $I_k \cdot N_w$ );  $\Phi$  – магнитный поток от источника;  $\Phi_d$ ;  $\Phi_b$ ;  $\Phi_{v2}$  – потоки через соответствующие сопротивления.

Процедура решения детально изложена ранее [2, 3]. В рамках настоящей работы в неё внесён ряд уточнений. Они касаются определения магнитных сопротивлений межконтактного зазора  $R_b$  и воздушной среды вне катушки  $R_{v1}$ .

При расчете сопротивления учтён краевой магнитный поток по воздуху вокруг зазора. Его влияние повышается с увеличением зазора, что ослабляет магнитную силу в соответствии с эмпирическим соотношением [4]:

$$F_m = \frac{\Phi_d^2}{2\mu_0 S_k [1 + k(\delta/a)]}, \quad (3)$$

где  $F_m$  – сила;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;  $S_k$ ,  $\delta$  и  $a$  – площадь, зазор и перекрытие контактов;  $k$  – коэффициент, увеличивающийся с ростом отношения толщины контакт-деталей  $h$  к их ширине  $b$  в соответствии с формулой:  $k = 6,66 + 44,4(h/b)$ .

Соотношение (3) получено обработкой обширных экспериментальных значений магнитного потока и силы. Ослабление силы в соотношении (3) определяет множитель в квадратных скобках. Квадратный корень из множителя отражает степень уменьшения магнитного потока через зазор. С учетом этого приближенно положено, что краевой эффект соответственно уменьшает магнитное сопротивление  $R_b$ :

$$R_b = \frac{\delta}{\mu_0 S_k \sqrt{1 + k(\delta/a)}}. \quad (4)$$

Соотношение (4) адекватно отражает физическую ситуацию: с ростом зазора сопротивление увеличивается, но скорость роста замедляется, поскольку параллельно сопротивлению зазора включено сопротивление, связанное с краевым магнитным потоком, которое слабо изменится при увеличении зазора. Замедление скорости связано также с увеличением площади магнитного потока за счет «выпучивания» поля.

Магнитное сопротивление воздуха снаружи катушки ранее [3] определялось по экспериментальному значению тока отпуская. Прибли-

женно полагалось, что магнитное сопротивление КД в этих условиях пренебрежимо мало. В уточненном варианте модели сопротивление воздуха определяется его пошаговым изменением в ходе численного решения системы уравнений (2) для тока отпуская при равенстве магнитной и упругой сил.

Сопротивление воздуха внутри катушки рассчитывалось по соотношению:

$$R_{v2} = \frac{4l_k}{\mu_0 \pi D_k^2}, \quad (5)$$

где  $l_k$  и  $D_k$  – длина и внутренний диаметр катушки, скорректированный на толщину обмотки.

С учетом указанных уточнений система уравнений (2) численно решалась путем пошагового изменения напряженности магнитного поля в контакт-деталях. Индукция и поток в КД определялись по аппроксимации кривой намагничивания [8]. Дифференциал  $dR_{ms}$ , необходимый для расчета тока катушки по соотношению (1), принимался равным шаговой разности величин суммарного сопротивления магнитной цепи.

#### Электрические процессы

Зависимость напряжения между контактами от времени определялась в условиях, когда межконтактная емкость заряжается током от источника питания, уменьшенным на величину тока автоэлектронной эмиссии, который зависит от напряжения и зазора между электродами. При большом автоэлектронном токе возможен разряд емкости. Зависимость находится численным решением уравнения Кирхгофа:

$$U_0 - (C_s \frac{dU}{dt} + U \frac{dC_s}{dt} + I_E) R_0 - U = 0, \quad (6)$$

где  $U_0$  – напряжение источника питания;  $C_s$  и  $U$  – емкость и напряжение между КД;  $I_E$  – автоэлектронный ток;  $R_0$  – сопротивление в цепи геркона. Первые два члена в скобках определяют ток через емкость с учетом её вариаций при изменениях межконтактного зазора.

Величины  $C_s$  и  $I_E$  рассчитывались по соотношениям, представленным в [3]. Уравнение (6) решалось численно на каждом временном шаге расчета изменений межконтактного зазора. Дифференциалы  $dU$  и  $dC_s$  заменялись пошаговыми (по времени) разностями напряжения и емкости. Суммированием значений произведения  $(U \cdot I_E \cdot \Delta t)$  определялась энергия электронной бомбардировки ( $\Delta t$  – временной шаг).

Сила электрического притяжения параллельных контактирующих поверхностей определяется соотношением [6]:

$$F_e = \varepsilon_0 S_k E^2 / 2, \quad (7)$$

где  $F_e$  – сила,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная;  $S_k$  – площадь поверхностей;  $E = U / \delta$  – напряженность поля.

В области малых значений межконтактного зазора соотношение (7) корректировалось с учетом возможного технологического перекося КД, когда они касаются не всей поверхностью, а лишь её продольными краями. При этом противоположные края расположены на некотором расстоянии  $k_\delta \delta_0$ , где  $\delta_0$  и  $k_\delta$  – зазор между КД выключенного геркона и коэффициент, характеризующий степень перекося ( $k_\delta = 0,01$  при перекося 1%). Формула для расчета силы получена интегрированием соотношения (7) по координате, поперечной КД, с учетом изменений напряженности по поверхности зоны перекрытия:

$$F_e = \frac{\varepsilon_0 S_k E^2}{2(1 + k_\delta \delta_0 / \delta)}. \quad (8)$$

Для дополнительной коррекции силы с учетом реальной шероховатости поверхности полагалось, что КД контактируют на краю не по всей поверхности элементарного слоя, а лишь на плоской вершине микровыступа с высотой порядка 1 мкм и поперечным размером несколько микрометров (характерные размеры шероховатостей взяты из [7]). При таких условиях зазор почти во всей области перекрытия КД превышает высоту микровыступа. Этим исключаются аномально большие значения силы при малых (порядка 0,01 мкм) расстояниях между КД в месте прекращения электрического контакта.

Соотношение (7), определяющее электрическую силу, корректировалось и при больших (более 5 мкм) значениях зазора, поскольку в этих условиях следует ожидать, что сила должна ослабляться за счет «выпучивания» электрического поля. Коррекция сделана с учетом подобия математических соотношений, описывающих электрическое и магнитное поля [6]:

$$F_e = \frac{\varepsilon_0 S_k E^2}{2 [1 + k(\delta/a)]}. \quad (9)$$

В формуле (9) множитель в квадратных скобках взят из соотношения (3) для расчета магнитной силы.

#### Механическое движение КД

Движение определяется уравнением Ньютона для материальной точки на конце КД под действием алгебраической суммы упругой, магнитной и электрической сил [2, 3]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_r - F_m - F_e = F_s, \quad (10)$$

где  $m$  – приведенная масса КД;  $x$  – координата точки, отсчитываемая от границы раздела замкнутых КД;  $F_r$ ,  $F_m$ ,  $F_e$  и  $F_s$  – упругая, магнитная, электрическая и суммарная силы.

Упругая сила, размыкающая контакты, уменьшается с ростом координаты [1]:

$$F_r = C(\delta_0 / 2 - x), \quad (11)$$

где  $F_r$  – сила упругости КД,  $C$  – её жесткость;

В ходе численного решения уравнения (10) время отсчитывается от момента выключения напряжения на катушке, когда контакты замкнуты, магнитная сила значительно больше упругой и суммарная сила отрицательна. При пошаговом увеличении времени рассчитывается спад тока катушки по соотношению (1), а координата точки полагается неизменной (близкой к нулю). На каждом шаге численно решаются уравнения Кирхгофа (2) для магнитной цепи и определяются её параметры.

Когда магнитная сила становится меньше упругой, рассчитывается координата точки (с небольшой начальной скоростью, связанной с упругой деформацией сжатых КД). Одновременно на каждом шаге численным решением уравнения Кирхгофа для электрической цепи (6) определяются напряжение между контактами и электрическая сила, которая замедляет рост координаты и может уменьшить её вплоть до появления отрицательного значения. Физически это соответствует повторному замыканию контактов. В модели полагается, что после замыкания материальная точка отражается с небольшой потерей скорости.

После размыкания контактов зазор  $\delta = 2x$ . Это соотношение использовалось при расчете автоэлектронного тока, поскольку он практически полностью определялся эмиссией электронов с вершины микровыступа. В случае расчета электрической силы зазор определялся по формуле:  $\delta = 2x + h_k$ , а для магнитной силы полагалось, что  $\delta = 2x + 2\Delta + h_k$ , где  $h_k$  – высота контактирующего микровыступа;  $\Delta$  – толщина немагнитного молибденового покрытия КД.

#### **Результаты моделирования**

##### Исходные данные

В расчеты для геркона МКА-40142 заложены следующие значения параметров. Приведенная масса КД  $m = 3 \cdot 10^{-5}$  кг; зазор в выключенном герконе  $\delta_0 = 0,00025$  м; перекрытие

$a = 0,00075$  м, толщина покрытия  $\Delta = 10$  мкм [5]. Размеры КД: ширина  $b = 0,0026$  м; толщина  $h = 0,0004$  м; длина внутри геркона  $l = 0,014$  м. Модуль упругости —  $1,35 \cdot 10^{11}$  Н/м.

При расчете жесткости КД учитывалось [1], что она имеет два участка прямоугольной формы. На первом участке (вблизи зоны перекрытия)  $b_1 = 0,00165$  м;  $h_1 = 0,00065$  м;  $l_1 = 0,0034$  м, а на втором —  $b_2 = 0,0026$  м;  $h_2 = 0,0004$  м;  $l_2 = 0,0106$  м. Площадь перекрытия рассчитывалась по формуле  $S_k = a b_1$ . Магнитная сила вычислялась по соотношению (3) при  $b = b_1$  и  $h = h_1$ .

Для замкнутых контактов координата  $x$  по определению равна нулю. В расчете по физическим соображениям полагалось, что замыканию соответствует  $x_0 = 5 \cdot 10^{-10}$  м. Эта величина близка к нулю и равна нескольким расстояниям между атомами в твердом теле. Начальная скорость движения материальной точки  $v_0 = 0,0005$  м/с. Коэффициент, характеризующий уменьшение скорости после повторного замыкания КД и отражения точки,  $k_v = 0,8$ .

Высота контактирующего микровыступа  $h_k = (0,5 - 2)$  мкм; площадь его плоской вершины  $S_h = 10^{-11}$  м<sup>2</sup>. Работа выхода микровыступа  $e\varphi = 4,15$  эВ (для Мо). Перекос КД —  $(1 - 5)$  %.

Параметры катушки: внутренний диаметр —  $0,007$  м, наружный —  $0,024$  м, эффективный  $D_k = 0,015$  м; длина  $l_k = 0,02$  м, число витков  $N_w = 5000$ . Напряжение питания  $U_{0k} = 8$  В. Сопротивление цепи разряда катушки  $R_k = 315$  Ом. Ток отпускания  $I_0 = 0,01$  А.

Параметры коммутируемой электрической цепи: напряжение источника  $U_0 = 4500$  В; сопротивление нагрузки  $R_0 = 2,5$  МОм (соответствует паспортному значению максимальной коммутируемой мощности 10 Вт); межконтактная емкость  $C_s = 7$  пФ (с учетом делителя напряжения).

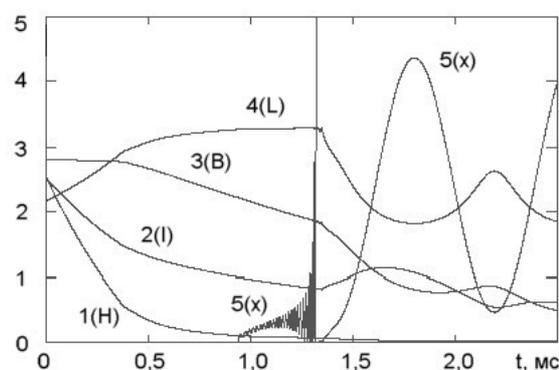
Кривая намагничивания пермаллоя 50Н взята для частоты 1 кГц из ГОСТ 10160-75 [8]. До напряженности магнитного поля 600 А/м кривая аппроксимировалась двумя полиномами четвертой степени, а далее — линейной зависимостью.

#### Магнитные процессы

Динамику магнитных процессов при разрыве электрического тока высоковольтным герконом МКА-40142 в указанных выше условиях

характеризуют графики, представленные на рисунках 1 и 2. На первом из них в зависимости от времени после выключения напряжения питания управляющей катушки даны кривые изменения напряженности магнитного поля и индукции в КД, тока катушки и её индуктивности. Для «привязки» кривых к размыканию контактов приведена временная зависимость координаты  $x$ , характеризующей движение материальной точки (межконтактный зазор  $\delta \approx 2x$ ).

Из рисунка 1 следует, что ток катушки (кривая 2) после выключения питания уменьшается до величины тока отпускания через  $0,94$  мс, что приблизительно коррелирует с паспортным значением («не более 2 мс») и в 2 раза больше, чем в случае геркона МКА-14103 [3].



**Рисунок 1** – Зависимости напряженности магнитного поля (1), тока катушки (2), магнитной индукции (3), индуктивности (4) и координаты точки на конце КД (5) от времени. Цена делений: 1 – 1 кА/м; 2 – 10 мА; 3 – 0,5 Тл; 4 – 0,2 Гн; 5 – 0,05 мкм при  $t < 1,325$  мс и 50 мкм при  $t > 1,325$  мс

На отрезке времени от  $0,94$  мс до  $1,3$  мс ток катушки продолжает монотонно уменьшаться, поскольку координата  $x$  на нём увеличивается незначительно (до  $0,25$  мкм – кривая 5). В интервале от  $1,3$  мс до  $2,5$  мс координата резко возрастает (более  $200$  мкм) и периодически изменяется, что отражает колебания КД вблизи равновесного уровня  $125$  мкм (половина зазора выключенного геркона). Рост координаты вызывает заметное (около 30 %) увеличение тока катушки за счет уменьшения её индуктивности от  $0,65$  Гн до  $0,35$  Гн (кривая 4). Дальнейшее уменьшение координаты аналогичным образом уменьшает ток. В результате периодические изменения координаты вызывают соответствующие изменения тока (кривая 2), индуктивности (кривая 4) и индукции магнитного поля в КД (кривая 3).

Колебания тока катушки сопровождаются его общим уменьшением, что приводит к падению напряженности магнитного поля от  $2500$  А/м до  $200$  А/м (кривая 1) и индукции от

1,4 Тл до 0,25 Тл (кривая 3). Падение завершается полным разрядом индуктивности катушки и переходом герконового реле в выключенное состояние.

Заметим, что в диапазоне времени до 0,4 мс КД работают в состоянии магнитного насыщения при аномально большой напряженности поля. Необходимость такого режима связана с большим (80 А – 180 А) технологическим разбросом МДС срабатывания исследуемых герконов. Большой ток катушки производитель рекомендует, чтобы обеспечить надежное замыкание всех образцов приборов.

Временные зависимости сопротивлений магнитной цепи представлены на рисунке 2.

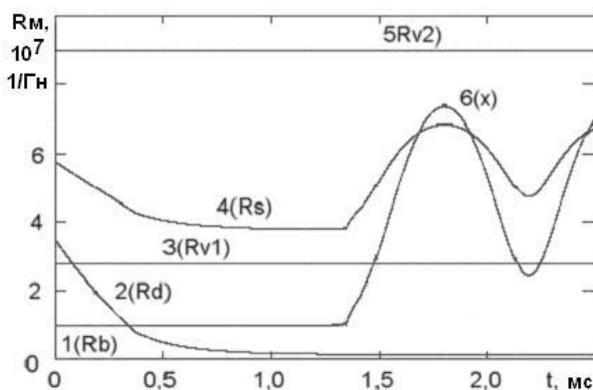


Рисунок 2 – Зависимости магнитного сопротивления зазора (1), КД (2), воздушной среды снаружи катушки (3), всей цепи (4), внутри катушки (5) и координаты точки (6 – 50 мкм/дел.) от времени

В начальный момент суммарное сопротивление (кривая 4) велико ( $\sim 6 \cdot 10^7 \text{ Гн}^{-1}$ ) и определяется, в основном, сопротивлениями КД (2) и воздушной среды снаружи катушки (3). К моменту размыкания контактов (0,94 мс) сопротивление КД уменьшается более чем на порядок, но суммарное сопротивление уменьшается слабо (около 30 %), поскольку наружное сопротивление достаточно велико ( $\sim 3 \cdot 10^7 \text{ Гн}^{-1}$  – прямая 3). После значительного (более 200 мкм) увеличения координаты  $x$  (кривая 6) резко повышаются магнитное сопротивление зазора (в 7 раз, до  $\sim 7 \cdot 10^7 \text{ Гн}^{-1}$ , кривая 1) и суммарное сопротивление (в  $\sim 2$  раза), которое даже оказывается меньше сопротивления зазора в результате шунтирующего действия сопротивления воздушной среды внутри катушки ( $\sim 9 \cdot 10^7 \text{ Гн}^{-1}$ , прямая 5).

#### Динамика сил

В начальный момент контакты замкнуты магнитной силой (около 0,4 Н – кривая 1 на рисунке 3), которая почти в 2 раза превышает упругую силу (кривая 3), так что суммарная сила, сжимающая КД, равна  $\sim 0,2 \text{ Н}$  (кривая 2).

На отрезке времени до  $\sim 0,5 \text{ мс}$  магнитная и суммарная силы уменьшаются слабо, несмотря на существенный (почти в 2 раза – кривая 3 на

рисунке 2) спад тока катушки, поскольку в состоянии магнитного насыщения пермаллоя индукция слабо изменяется при уменьшении напряженности поля. К моменту размыкания КД (около 0,9 мс на рисунке 3) магнитная сила становится равной упругой. Суммарная сила проходит через ноль и изменяет знак.

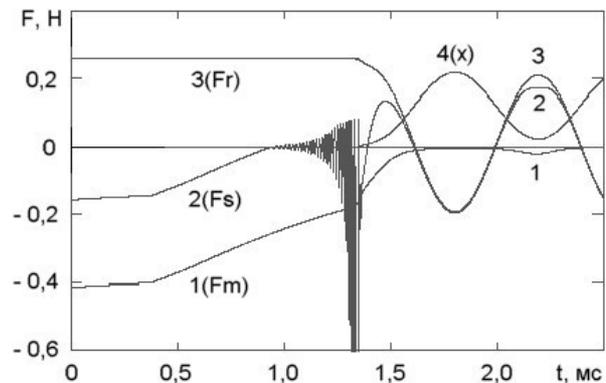


Рисунок 3 – Зависимости магнитной (1), суммарной (2), упругой (3) сил и координаты точки на конце КД (4 – 200 мкм/дел.) от времени

С началом расхождения КД между ними появляется напряжение и возникает электрическая сила, что приводит к периодическому изменению знака суммарной силы и колебаниям КД, в ходе которых координата точки достаточно долго (до  $\sim 1,3 \text{ мс}$ ) удерживается в диапазоне малых (до 0,25 мкм – см. далее рисунки 4 и 5) значений. Как следствие, упругая сила почти не уменьшается, тогда как спад магнитной силы продолжается. За счет этого увеличивается амплитуда колебаний КД и периодических изменений знака суммарной силы.

В небольшом интервале вблизи 1,3 мс электрическая и суммарная силы достигают весьма высоких (до минус 3 Н) значений (на рисунке 3 не показано). Происходят повторные замыкания контактов с обнулением напряжения и электрической силы.

С течением времени после 1,3 мс координата точки существенно (более 0,25 мкм – кривая 4 на рисунке 3) увеличивается и электрическая сила становится пренебрежимо малой. Суммарная сила определяется разностью упругой и магнитной сил, уменьшающихся с течением времени. После приблизительно 1,7 мс магнитная сила приближается к нулю, и суммарная сила повторяет, в основном, колебания упругой в противофазе с колебаниями координаты (кривая 4) вблизи равновесного уровня 125 мкм.

В диапазоне времени (2 – 2,3) мс значение координаты проходит через минимум, что ведет к небольшому росту индукции в КД (кривая 3 на рисунке 1) и магнитной силы (кривая 1 на рисунке 3). В результате суммарная сила становится

ся заметно (~ 20 %) меньше упругой. Уменьшение связано и с ростом электрической силы, поскольку значение координаты сравнительно мало (~ 25 мкм), а напряжение велико (4,5 кВ).

#### Параметры коммутируемой цепи

Зависимость напряжения между КД от времени представлена на рисунке 4 (кривая 1) совместно с графиками тока катушки (кривая 2) и координаты точки (кривая 3) для сравнительно малых значений высоты микровыступа (0,5 мкм) и перекоса КД (1 %). Из рисунка следует, что через ~ 1, 4 мс после выключения питания катушки напряжение повышается до 4,5 кВ, что можно считать завершением процесса выключения геркона. Интересно, что координата при этом возрастает всего до 10 мкм.

Расхождение контактов начинается, когда время превышает 0,94 мс, о чем свидетельствует небольшое (порядка 100 В) увеличение напряжения. Рост координаты на рисунке не наблюдается из-за её малости. Такое состояние продолжается сравнительно долго (около 0,3 мс), причем напряжение слабо увеличивается и периодически изменяется с нарастающей амплитудой. Обнаруженный эффект имеет важное практическое значение, поскольку он определяет выделение энергии в приборе.

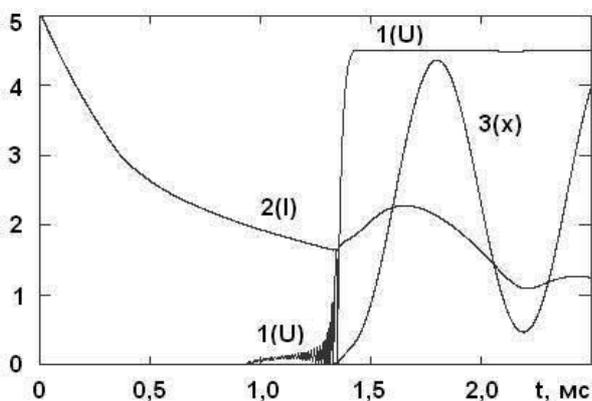


Рисунок 4 – Зависимости напряжения на герконе (1), тока катушки (2) и координаты (3) от времени при  $h_k = 0,5$  мкм. Цена делений: 1 кВ; 5 мА; 50 мкм

Перед резким ростом координаты происходят повторные замыкания контактов. В модели полагается, что после соударения материальные точки КД упруго (частично) отражаются. Это ведет к увеличению начальной скорости точек после отражения, что помогает им преодолевать сильное электрическое притяжение КД при малых (до 0,1 мкм) значениях координаты.

Для более детального рассмотрения процессов на рисунке 5 (кривая 2) представлен фрагмент зависимости напряжения от времени в интервале (920 – 1020) мкс, соответствующем началу расхождения контактов.

На рисунке также даны графики координаты точки (1), тока автоэлектронной эмиссии (3) и тока от высоковольтного источника через сопротивление нагрузки (4).

Объясним ход кривых. Когда значение времени превышает 940 мкс, магнитная сила становится меньше упругой, координата увеличивается и контакты размыкаются. Ток от источника заряжает ёмкость между электродами и напряжение на ней увеличивается.

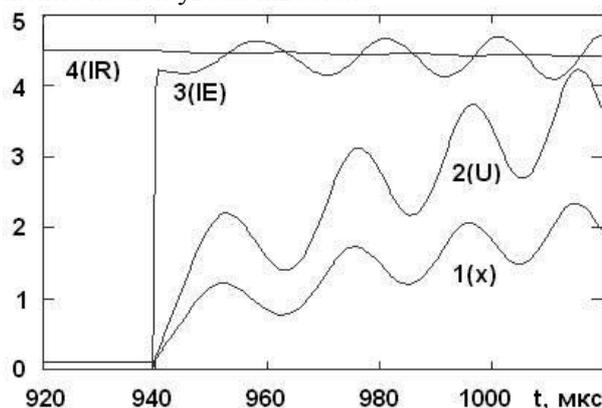


Рисунок 5 – Зависимости координаты точки (1), напряжения на герконе (2), автоэлектронного тока (3) и тока источника питания (4) от времени. Цена делений: 5 нм; 20 В; 0,4 мА

Расстояние между плоской вершиной микровыступа и противоположным электродом мало, напряженность электрического поля велика, что вызывает эмиссию электронов. Автоэлектронный ток быстро возрастает до величины, близкой к току источника питания (кривые 3 и 4). Далее заряд ёмкости обеспечивается разностью токов, причем напряжение увеличивается практически пропорционально росту координаты точки (кривые 1 и 2), поскольку для слабо изменяющегося автоэлектронного тока необходима почти неизменная напряженность электрического поля.

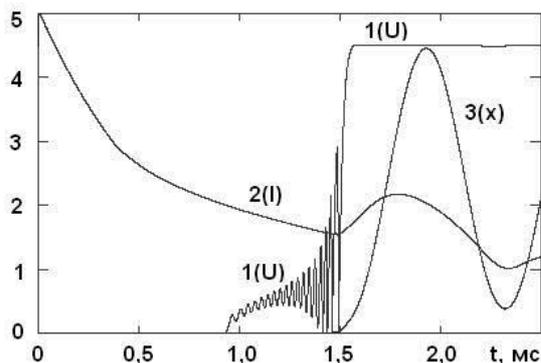
С появлением напряжения возникает электрическая сила, которая имеет две составляющие: в области микровыступа и на остальной части перекрытия контактов. Из формулы (7) следует, что составляющие пропорциональны значениям квадрата напряженности поля в области и её площади. Напряженность во второй области меньше, чем в первой (~  $4 \cdot 10^7$  В/м и  $8 \cdot 10^9$  В/м соответственно), поскольку межэлектродное расстояние в ней много больше (0,5 мкм и ~ 0,01 мкм). Однако площадь второй области больше на 5 порядков. Поэтому вторая составляющая силы в несколько раз больше первой.

На рассматриваемом отрезке времени напряженность поля во второй области практически не зависит от изменений координаты точки, потому что межэлектродное расстояние в ней

определяется высотой микровыступа, превышающей значения координаты на 1 – 2 порядка. В результате электрическая сила увеличивается с ростом напряжения. Она замедляет движение точки, а затем вынуждает её перемещаться в обратном направлении. Соответственно уменьшаются напряжение и электрическое притяжение контактов, что постепенно приводит к восстановлению прямого направления движения. Так возникают колебания КД, проявляющиеся на рисунке 5 в виде периодических изменений кривых с частотой около 50 кГц.

Постепенный рост координаты и напряжения в ходе периодических изменений на рисунках 4 и 5 определяется уменьшением магнитной силы и соответствующим увеличением роли упругой силы, размыкающей контакты. Одновременно увеличивается амплитуда колебаний координаты, что приводит к повторным замыканиям КД (рисунок 4). Небольшой спад тока источника (кривая 4) связан с разрядом емкости на выходе высоковольтного выпрямителя.

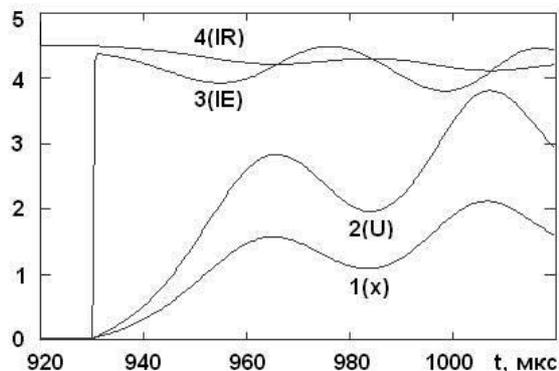
В исследуемом случае за счет автоэлектронного тока на положительном электроде в области микровыступа выделяется энергия 77 мкДж, что достаточно для испарения материала, содержащегося в полусфере со сравнительно большим (до 10 мкм) радиусом. Возможно испарение материала микровыступа, если он является анодом. Моделирование показало, что энергия значительно возрастает при увеличении высоты микровыступа и перекоса КД. Результаты моделирования этого случая представлены на рисунках 6 и 7 для высоты 2 мкм и перекоса 5 %.



**Рисунок 6 – Зависимости напряжения на герконе (1), тока катушки (2) и координаты (3) от времени. Цена делений: 1 кВ; 5 мА; 50 мкм. Высота острия – 2 мкм, перекося КД – 5 %, энергия – 878 мкДж**

Основное отличие процессов в новых условиях заключается в резком (почти в 5 раз) увеличении напряжения и координаты точки на временном отрезке (0,93 – 1,5) мс. Это объясняется тем, что при больших значениях высоты микровыступа и перекоса КД почти на всей площади их перекрытия ослабляется напряженность поля и

электрическая сила нарастает до уровня, достаточного для уменьшения координаты, при соответственно повышенном напряжении, спустя более длительное время (рисунок 7).



**Рисунок 7 – Зависимости координаты точки (1), напряжения на герконе (2), автоэлектронного тока (3) и тока источника питания (4) от времени. Цена делений: 20 нм; 100 В; 0,4 мА. Высота выступа – 2 мкм, перекося КД – 5 %**

Частота колебаний уменьшается приблизительно в 2 раза (до ~ 25 кГц). Отношение напряжения к координате, определяющее напряженность электрического поля между вершиной микровыступа и противоположным электродом, остается почти неизменным, поскольку автоэлектронный ток сохраняется на прежнем уровне. Некоторое увеличение амплитуды его колебаний объясняется тем, что для заряда и разряда емкости при большом изменении напряжения требуется более сильный ток.

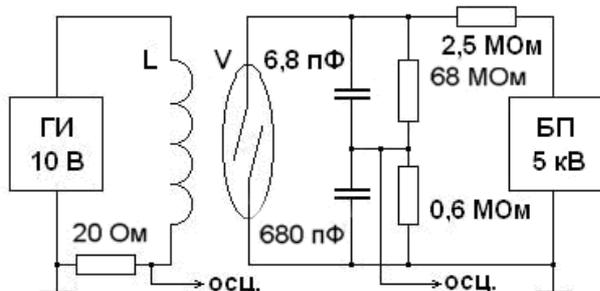
Резкое увеличение среднего уровня напряжения, относительно которого происходят колебания, и заметный рост их продолжительности (~ 0,3 мс на рисунке 4 и ~ 0,5 мс на рисунке 6) значительно (на порядок, до ~ 0,9 мДж) увеличивают энергию, выделяющуюся на аноде за счет автоэлектронного тока. При малой площади разогреваемой поверхности (~  $10^{-11}$  м<sup>2</sup>) это может привести к потере работоспособности геркона [9]. Заметим, что при замыкании контактов выделяющаяся энергия значительно меньше, потому что автоэлектронный ток проявляется в виде редких коротких импульсов.

#### Экспериментальная часть

В ходе экспериментов исследовалась динамика изменений напряжения на герконе МКА-40142 и тока управляющей катушки. Электрическая схема экспериментального устройства представлена на рисунке 8.

Геркон V, размещенный в стандартной катушке L (5000 витков, 315 Ом), соединялся с источником постоянного напряжения БП через сопротивление 2,5 МОм. На катушку от генератора импульсов ГИ (Г5-63) подавались одиночные

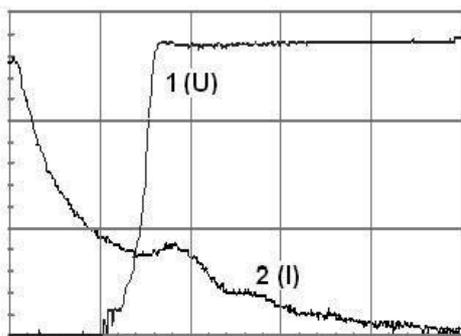
прямоугольные импульсы напряжения до 10 В с длительностью 4 мс. Изменения напряжения на герконе и тока катушки наблюдались с помощью цифрового двухканального осциллографа АСК-3104 (полоса пропускания 100 МГц). Напряжение на вход осциллографа подавалось через резисторно-емкостный делитель, изображенный на схеме. Коэффициент деления, измеренный с учетом входной цепи осциллографа (1 МОм, 50 пФ), составил  $163 \pm 3$ . Для измерения тока в цепь катушки включался резистор 20 Ом.



**Рисунок 8 – Схема измерений: ГИ – генератор одиночных импульсов; L – катушка; V – геркон; БП – источник коммутируемого напряжения**

После подачи импульса напряжения ток катушки за время (1,3 – 1,8 мс) увеличивался до (19 – 22) мА, контакты замыкались, напряжение на герконе уменьшалось от 5 кВ до нулевой величины. К моменту окончания импульса (4 мс) ток катушки устанавливался на уровне 25 мА. Через 1 мс после этого он уменьшался до тока отпускания (около 10 мА). Контакты размыкались, и напряжение повышалось. Начальный уровень 5 кВ немного (на 0,5 кВ) не достигался из-за разряда выходной емкости блока питания (0,015 мкФ) за 3 мс током геркона 2 мА.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 9 в виде фрагментов осциллограмм для процесса размыкания контактов. Начало развертки соответствует заднему фронту импульса напряжения на катушке.



**Рисунок 9 – Осциллограммы напряжения на герконе (1) и тока катушки (2). Цена делений: 1,7 кВ, 10 мА, 1 мс. Образец № 1**

Как следует из рисунка, через 1 мс от момента выключения питания катушки напряжение на герконе начинает увеличиваться, что свидетельствует о появлении зазора между контактами. Ток катушки к этому времени уменьшается до 9 мА и далее (до 1,5 мс) продолжает монотонно снижаться, несмотря на то, что с увеличением зазора обычно наблюдается небольшой рост тока, связанный с уменьшением индуктивности катушки. Отсутствие роста подтверждает наличие электрического притяжения КД, которое удерживает их на очень малом расстоянии, недостаточном для уменьшения индуктивности.

В интервале (1 – 1,2) мс напряжение устанавливается (с колебаниями) на уровне около 400 В, что также подтверждает наличие электрического притяжения. Ток между разомкнутыми контактами остается близким к рабочему значению 2 мА за счет автоэлектронной эмиссии, что следует из уравнения (6). Далее (до 1,5 мс) напряжение растёт сравнительно медленно в результате торможения КД электрической силой.

На отрезке (1,5 – 1,8) мс наблюдается характерный рост тока катушки, обусловленный существенным увеличением межконтактного зазора. Напряжение повышается до напряжения источника питания (4,5 кВ), что свидетельствует о прекращении тока и завершении процесса выключения геркона.

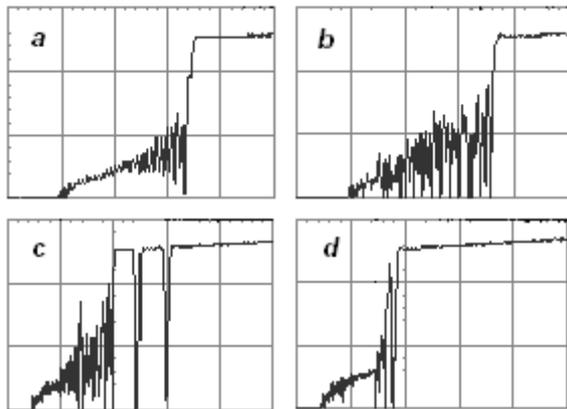
В интервале (2,4 – 2,6) мс наблюдается замедление спада тока катушки, что подтверждает значительное уменьшение зазора в результате колебаний КД.

Сопоставление теоретических и экспериментальных кривых на рисунках 4, 5 и 9 хорошо подтверждает достоверность результатов моделирования и их физической интерпретации.

Разрушающий эффект, связанный с интенсивным локальным испарением материала покрытия КД под действием автоэлектронного тока, очевидно, усиливается с увеличением продолжительности колебаний КД. Возможность такого увеличения подтверждается осциллограммами напряжения на одном из образцов геркона МКА-40142 при нескольких включениях, представленными на рисунке 10.

Осциллограммы получены по изложенной методике путем подачи импульса напряжения на управляющую катушку и записи осциллограммы, отражающей процессы замыкания и размыкания контактов. Эксперимент повторялся 4 раза с паузой несколько минут. На рисунке 10 представлены фрагменты осциллограмм, характеризующие изменения напряжения при размыкании. Начало развертки соответствует заднему фронту импульса напряжения на катушке. На

двух последних осциллограммах расширен временной диапазон (2 мс/деление).



**Рисунок 10 – Осциллограммы напряжения на герконе при нескольких включениях (образец № 2).  
Цена делений: 1,7 кВ, 1 мс (a, b), 2 мс (c, d)**

На рисунке 10, *a* видно, что для образца № 2 интервал времени между началом роста напряжения и его увеличением до напряжения источника питания значительно (почти в 5 раз) больше в сравнении с образцом № 1 (рисунок 9). Отчетливо видны колебания напряжения с частотой  $\sim 10$  кГц (период колебаний с течением времени немного увеличивается). Колебания с нарастающей амплитудой происходят около уровня, существенно (до 1,5 кВ) повышающегося за время от 1 мс до 2,3 мс. Ток между разомкнутыми контактами на этом сравнительно большом интервале достаточно велик (от 2 мА до  $\sim 1,4$  мА с колебаниями) и обеспечивается автоэлектронной эмиссией.

Ток катушки (на рисунке не показан) монотонно уменьшался от 9 мА до 2 мА за 3,3 мс, после чего слабо проявлялся его характерный рост, связанный с увеличением межконтактного зазора. Для образца № 1 эффект наблюдался при токе  $\sim 8$  мА в момент времени  $\sim 1,5$  мс.

Рисунок 10, *b* показывает, что длительность переходного процесса (от 1 мс до 2,5 мс) практически не изменилась. Несколько увеличился средний уровень напряжения, на который наложены колебания. Однако заметно снизилась регулярность колебаний и значительно возросла их амплитуда, что привело к возникновению серии повторных замыканий контактов (около 20 раз).

На рисунке 10, *c* время, за которое напряжение возросло до напряжения источника, увеличилось с 3,5 мс до 4 мс (изменен масштаб осциллограммы). Число повторных замыканий за это время уменьшилось до 4, но обнаружился новый эффект: контакты вновь замкнулись в момент времени 5 мс. Причиной эффекта, вероятно, является уменьшение межконтактного зазора за

счет колебаний КД после размыкания (кривая 3 на рис. 4). Аналогичный эффект проявился и при 6 мс, что приблизительно соответствует периоду колебаний в модели ( $\sim 0,8$  мс на рисунке 1).

На осциллограмме 10, *d* заметно упала амплитуда колебаний напряжения (в сравнении с предыдущим случаем) и уменьшилось число повторных замыканий КД. Несколько уменьшилась длительность переходного процесса.

Одной из основных причин значительных различий осциллограмм напряжения при нескольких включениях образца № 2 предположительно является существенное изменение высоты и формы контактирующих микровыступов, связанное с их плавлением и испарением материала. Такие процессы вполне возможны, поскольку электронная бомбардировка продолжается сравнительно долго и при большой локальной плотности мощности.

Причина существенных различий осциллограмм для образцов № 1 и № 2 пока не выявлена. Сравнение геометрии приборов с помощью оптического микроскопа явных отличий не обнаружило (кроме небольшого, около 5 %, перекоса КД образца № 2). Широкое варьирование параметров модели не позволило получить большую (2,5 мс на рисунке 10) длительность начальных колебаний напряжения. Можно предположить, что в образце № 2 тепловые процессы изменяют высоту контактирующего микровыступа (или группы микровыступов) непосредственно в процессе расхождения контактов.

Практическая значимость осциллограмм на рисунке 10 заключается в том, что они подтверждают возможность появления образцов высоковольтных герконов МКА-40142, склонных к потере работоспособности из-за тепловых локальных разрушений контактных покрытий.

Колебания напряжения при размыкании герконов МКА-40142 с периодом десятки микросекунд экспериментально наблюдались ранее [10] при напряжении 2 кВ и токе 5 мА. Зарегистрированная длительность спада тока составила (0,25 – 0,3) мс, что близко к величине 0,5 мс, полученной в наших экспериментах (рисунок 9). Установлено, что при снижении коммутируемого напряжения до 100 В длительность спада резко (до 10 мкс) уменьшается. Это подтверждает наличие электрического притяжения КД в процессе их расхождения при высоком напряжении.

**Заключение.** В работе усовершенствована математическая модель процесса размыкания высоковольтных (до 5 кВ) герконов МКА-40142, с помощью которой установлен ряд закономерностей.

- Ток катушки уменьшается от 25 мА до тока отпускания (10 мА) через  $\sim 1$  мс. Напряженность и индукция магнитного поля в КД снижаются от 2500 А/м и 1,4 Тл до 200 А/м и 0,25 Тл (через 2,5 мс). Индуктивность катушки изменяется в пределах (0,35 – 0,65) Гн, магнитное сопротивление КД –  $(3,5 - 0,1) \cdot 10^7$  Гн<sup>-1</sup>, зазора –  $(1 - 7,3) \cdot 10^7$  Гн<sup>-1</sup>, воздушной среды снаружи катушки  $\sim 3 \cdot 10^7$  Гн<sup>-1</sup>, суммарное магнитное сопротивление –  $(4 - 7) \cdot 10^7$  Гн<sup>-1</sup>.

- На начальном этапе расхождения контактов (до 1,2 мс) суммарная сила, действующая на материальную точку, изменяет знак с частотой  $\sim 50$  кГц при амплитуде колебаний до 0,05 Н и значениях упругой и магнитной сил около 0,3 Н. На отрезке времени (1,2 – 1,3) мс за счет электрического притяжения контактов резко (до минус 3 Н) увеличиваются отрицательные значения суммарной силы. В диапазоне (1,4 – 2,5) мс суммарная сила периодически изменяется с частотой около 1 кГц и амплитудой 0,2 Н в противофазе с колебаниями материальной точки около равновесного уровня 125 мкм.

- Координата материальной точки на начальном этапе в течение  $\sim 0,3$  мс увеличивается до 0,05 мкм с колебаниями, амплитуда которых возрастает до появления замыканий, заканчивающихся через  $\sim 0,2$  мс резким ростом координаты (до  $\sim 10$  мкм) и напряжения (до 4,5 кВ).

- Синхронно с колебаниями точки изменяется напряжение на герконе (до  $\sim 500$  В), так что напряженность электрического поля в области микровыступа остается почти постоянной. Она обеспечивает равенство токов автоэлектронной эмиссии и источника питания. Напряженность на остальной части перекрытия контактов изменяется пропорционально напряжению, поскольку в ней межэлектродное расстояние (0,5 мкм – высота микровыступа) практически неизменно. В результате электрическое притяжение пульсирует, что является причиной колебаний точки.

- Рост высоты микровыступа (до 2 мкм) приводит к резкому (в  $\sim 5$  раз) увеличению напряжения и координаты точки на начальном этапе расхождения контактов из-за ослабления электрического притяжения. Частота колебаний координаты и напряжения уменьшается в 2 раза (до  $\sim 25$  кГц). За счет роста напряжения и длительности этапа (на 0,2 мс) значительно (на порядок, до  $\sim 0,9$  мДж) увеличивается энергия электронной бомбардировки анода, что может привести к разрушению контактного покрытия.

Достоверность результатов моделирования подтверждена экспериментальными осцилло-

граммами напряжения и тока катушки. Для одного из образцов геркона обнаружен аномально длительный (2,5 мс) начальный участок с колебаниями напряжения с частотой 10 кГц. Осциллограммы напряжения при нескольких включениях геркона свидетельствуют о возможном существенном изменении микрорельефа контактов при каждой коммутации.

### Библиографический список

1. *Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н.* Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе: монография / под ред. д.т.н., профессора В.Н. Шоффы. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 408 с.
2. *Коротченко В.А., Соловьев В.И., Солотенкова Ж.В.* Динамика размыкания магнитоуправляемых контактов при разрыве электрического тока // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 36. С. 61 – 67.
3. *Коротченко В.А., Соловьев В.И., Солотенкова Ж.В.* Динамика магнитных процессов в герконе с управляющей катушкой при разрыве электрического тока // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 41. С. 86 – 93.
4. *Peek R.L.* Magnetization and pull characteristics of mating magnetic reeds // Communication and Electronics. 1961. № 56. P. 372 – 380.
5. *Ананьин В.В.* Новые контактные покрытия на базе молибдена и вольфрама (напыление) // Сборник трудов 1-й международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». 11– 14 октября 2005 г. – Рязань: Поверенный, 2006. – С. 102.
6. *Штрауф Е.А.* Курс физики, т. 2. Электричество и магнетизм. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 552 с.
7. *Арушанов К.А., Зельцер И.А., Ермаков В.М., Трунин Е.Б.* Высоковольтный вакуумный геркон // Сборник трудов 3-й международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». 27-30 сентября 2011 г. – Рязань: ОАО «РЗМКП», 2011. – С. 97 – 112.
8. ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнитомягкие. Технические условия.
9. *Соколовский Э.И., Коротченко В. А., Солотенкова Ж.В.* Динамика тепловых процессов в миниатюрных герконах при разрыве электрического тока // Успехи современной радиоэлектроники. Международный научно-технический журнал. – М.: ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2014. – № 6. – С. 74 – 79.
10. *Чижииков А.Е., Ильичев С.Б., Шлыков А.В.* Особенности процессов при размыкании высоковольтных магнитоуправляемых контактов // Сборник трудов 2-й международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». 1 – 3 октября 2008 г. – Рязань: Изд. «Полиграф», 2009. – С. 61 – 64.