

# ЧИСЛЕННАЯ САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗМЫКАНИЯ ГЕРКОНОВ ПРИ РАЗРЫВЕ ТОКА В ЦЕПИ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

---

*В.А. Коротченко, д.т.н., В.И. Соловьев, к.т.н.,  
Э.И. Соколовский, Ж.В. Солотенкова  
390005, Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1*

*ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»*

*Разработана компьютерная модель процесса размыкания магнитоуправляемых контактов при разрыве электрического тока. На примере геркона МКА-14108 в диапазоне 0,1 – 1000 мкс получены временные зависимости координаты приведенной массы контакт-детали, действующей на нее силы, напряжения и автоэлектронного тока. Показано, что электрическая сила при малых (до 0,1 мкм) значениях зазора и напряжении 100 В может приводить к серии повторных замыканий контактов за время около 50 мкс и что энергия, обусловленная автоэлектронным током, может являться причиной эрозии контактов.*

*The computer model of the opening of magnetically operated contacts at electric current breaking has been developed. By the example of the magnetically operated sealed switch МКА-14108, in the range from 0.1 up to 1000  $\mu$ s, time dependences of coordinate of the reduced mass of contact, effective force, voltage and autoelectronic current have been obtained. It was proved that the electric force at the small gap values (till 0.1  $\mu$ m) and voltage of 100 V can lead to the iterative run of closing of contacts during period of 50  $\mu$ s, and that the energy conditioned by autoelectronic current can be the reason of erosion of contacts.*

## Введение

Магнитоуправляемые контакты являются уникальными приборами, в которых расстояние между электродами в процессе их расхождения (или сближения) может быть сколь угодно малым, например, несколько атомных размеров. В результате при разрыве электрического тока возникает очень интересный и сложный комплекс физических процессов.

Когда убывающая во времени магнитная сила становится меньше упругой, начинается расхождение контакт-деталей (КД). Если зазор равен атомному расстоянию, то контакты, очевидно, электрически замкнуты. По мере увеличения зазора (предположительно до нескольких атомных расстояний) контакты размыкаются, разрываемый электрический ток заряжает межэлектродную емкость, и на промежутке появляется напряжение. Из-за малого расстояния возникает очень большая напряженность электрического поля. Появляется ток, обусловленный автоэлектронной эмиссией, который разряжает емкость (или замедляет ее заряд). При большой напряженности поля велико и электрическое притяжение контактов, которое препятствует их расхождению.

«Кто кого победит», в конечном итоге известно, т. к. контакты после выключения электромагнита обычно размыкаются. А динамика «борьбы» представляет большой практический интерес, поскольку приборы «изнашиваются» именно при замыканиях и размыканиях, которые могут сопровождаться нежелательным дребезгом [1, 2].

Изложенное побудило авторов разработать численную модель процесса размыкания магнитоуправляемых контактов при разрыве электрического тока в цепи с активной нагрузкой [3]. В настоящей работе представлен усовершенствованный вариант модели.

## 1. Физико-математическая основа модели

Целью моделирования являлось получение временных зависимостей параметров, характеризующих процесс размыкания контактов. Движение КД определяется уравнением:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} = F_S = F_U - F_M - F_E, \quad (1)$$

где  $m$  – приведенная масса КД;  $x$  – координата массы, отсчитываемая от границы раздела замкнутых КД (в замкнутом состоянии  $x = 0$ );  $t$  – время с начала движения КД;  $v$  – скорость;  $F_S$  – суммарная сила, действующая на массу;  $F_U$ ,  $F_M$  и  $F_E$  – упругая, магнитная и электрическая силы.

При допущении однопрофильности конфигурации КД упругая сила, размыкающая контакты, зависит от координаты в соответствии с формулой [2]:

$$F_U = C(\delta_0/2 - x) = b E_U (h/l)^3 (\delta_0/2 - x)/4, \quad (2)$$

где  $C$  – жесткость КД;  $\delta_0$  – межконтактный зазор в выключенном состоянии геркона;  $E_U$  – модуль упругости материала КД;  $b$ ,  $h$  и  $l$  – ширина, толщина и длина КД внутри геркона.

Магнитная сила  $F_M$  в замкнутом состоянии прибора превышает силу упругости для обеспечения определенного сжатия контактов. После выключения напряжения питания управляющей катушки она уменьшается с течением времени по экспоненциальному закону:

$$F_M = \frac{(I_0 N_w)^2 \exp(-2t/\tau)}{2\mu_0 S_K (2x/\mu_0 S_K + R_m)^2}, \quad (3)$$

где  $I_0$  – ток отпускания геркона;  $N_w$  – число витков электромагнита;  $\tau$  – постоянная времени индуктивности ( $\tau = L_K / R_K$ , где  $L_K$  и  $R_K$  – индуктивность и сопротивление катушки, множитель «2» в показателе экспоненты отражает квадратичную зависимость силы от тока катушки);  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $S_K$  – площадь перекрытия (произведение перекрытия  $a$  на ширину  $b$ );  $R_m$  – сумма магнитных сопротивлений воздушной среды и контакт-деталей:

$$R_m = (I_0 N_w) / \sqrt{\mu_0 S C \delta_0}. \quad (4)$$

Формула (4) отражает равенство упругой и магнитной сил при токе отпускания и замкнутых контактах (для герконов без покрытия контакт-деталей типа МКА-14108). В соотношении (3) в знаменателе, в скобках первое слагаемое – магнитное сопротивление межконтактного зазора. Оно увеличивается с ростом координаты  $x$ , но магнитная сила при этом уменьшается слабо, поскольку при малых (доли микрона) значениях  $x$  сопротивление зазора много меньше сопротивления  $R_m$ .

Электрическая сила  $F_E$  определялась с приближенным учетом шероховатости КД, имеющей важное значение в области малых межэлектродных расстояний. Полагалось, что контакты замыкаются лишь на вершине микровыступа. При расхождении КД электродная система эквивалентна двум параллельно соединенным конденсаторам, в каждом из которых действует своя электрическая сила, пропорциональная площади обкладок и квадрату напряженности электрического поля [9]. Сумма этих сил равна результирующей электрической силе притяжения контактов:

$$F_E = 0,5[\varepsilon_0(S_K - S_H)E_K^2 + \varepsilon_0 S_H E_H^2]; \quad (5)$$

$$E_K = U / (H + 2x), \quad E_H = U / (2x), \quad (6)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м (диэлектрическая постоянная);  $S_K$  – площадь перекрытия КД;  $S_H$  – площадь вершины микровыступа;  $E_K$  и  $E_H$  – значения напряженности электрического поля

в зазоре и на вершине микровыступа;  $U$  – напряжение между электродами;  $H$  – высота микровыступа. Коэффициент 0,5 в соотношении (5) учитывает одновременное перемещение обоих КД.

Аналогично определялись межконтактная ( $C_K$ ) и суммарная ( $C_S$ ) емкости:

$$C_K = \varepsilon_0 \frac{(S_K - S_H)}{H + 2x} + \varepsilon_0 \frac{S_H}{2x}; \quad C_S = C_0 + C_K, \quad (7)$$

где  $C_0$  – паразитная емкость между выводами геркона.

Соотношения (5) – (7) справедливы, когда координата  $x$  превышает некоторое определенное расстояние  $x_0$ , соответствующее реальному электрическому размыканию контактов (предположительно – несколько атомных размеров). В противном случае между контактами не может возникать напряжение, и электрическая сила равна нулю.

Напряжение  $U$ , определяющее электрическую силу в соответствии с формулами (5) и (6), на начальном этапе увеличивается с течением времени в результате заряда емкости  $C_S$  током от источника питания:

$$I_R = (U_0 - U) / R_0, \quad (8)$$

где  $I_R$  и  $U_0$  – ток и напряжение источника питания;  $R_0$  – сопротивление нагрузки. Одновременно емкость разряжается током автоэлектронной эмиссии, который в системе единиц СИ определяется следующими соотношениями [4, 5]:

$$I_E = A E_H^2 S_H \exp\left[-\frac{B \theta(y)}{E_H}\right]; \quad A = 1.54 \cdot 10^{-6} / e\varphi; \quad B = 6.83 \cdot 10^9 \sqrt{(e\varphi)^3};$$

$$y = 3.79 \cdot 10^{-5} \sqrt{E_H} / e\varphi; \quad \theta(y) = 1 - y^{1.7}, \quad (9)$$

где  $I_E$  – ток автоэлектронной эмиссии в области микровыступа;  $y$  и  $\theta(y)$  – аргумент и функция Нордгейма;  $e\varphi$  – работа выхода автоэммиттера (в эВ). Автоэлектронный ток между КД вне области микровыступа не учитывался, поскольку в соответствии с формулами (6)  $E_K \ll E_H$  при малых значениях координаты  $x$ .

Из соотношений (8) и (9) следует сравнительно сложная связь напряжения  $U$  с током источника  $I_R$  и током автоэлектронной эмиссии  $I_E$ : первый заряжает конденсатор  $C_S$ , а второй разряжает его и определяется величиной напряжения. В этих условиях на каждом временном шаге расчета координаты  $x$  напряжение подбиралось с заданной точностью из условия его равенства напряжению, до которого разность токов ( $I_R - I_E$ ) заряжает (или разряжает) суммарную емкость. При этом учитывалось, что напряжение может изменяться не только за счет электрических токов, но и в результате вариаций емкости  $C_K$  при изменении координаты  $x$  в соответствии с формулой (7).

Подстановка значений упругой, магнитной и электрической сил в уравнение (1) позволяет получить зависимость координаты  $x$  (или межконтактного зазора  $\delta = 2x$ ) от времени. Однако следует учитывать, что суммарная сила  $F_S$  в уравнении (1) при больших значениях электрической силы  $F_E$  может изменить знак, и координата  $x$  может стать отрицательной. Физически это означает повторное замыкание электродов. В разработанной модели предполагается упругое отражение КД при столкновении. Дополнительно учитывается, что реальная масса КД распределена по ее длине. В результате после столкновения КД изгибаются при неподвижных концах и расходятся только после полупериода таких упругих колебаний. Поэтому в модель введена задержка расхождения контактов  $\Delta t_0$ , в течение которой координата конца КД и ее скорость равны нулю, а знак скорости изменяется на противоположный только после задержки. Динамика изгиба в модели не рассчитывалась. Приблизительно, с учетом экспериментальных данных полагалось  $\Delta t_0 = 10$  нс.

## 2. Численная реализация модели

С использованием обозначений, принятых в разделе 1, система уравнений (1) – (9) в конечноразностном виде записывается следующим образом:

$$t = 0; \quad x^i = 0; \quad v^i = 0; \quad U^i = 0; \quad E_K^i = 0; \quad E_H^i = 0; \quad I_E^i = 0; \quad W^i = 0,$$

$$F_U^{i+1} = C(\delta_0/2 - x^i); \quad F_M^{i+1} = \frac{(I_0 N_w)^2 \exp(-2t^i/\tau)}{2\mu_0 S_K (2x^i/\mu_0 S_K + R_m)^2};$$

$$E_K^{i+1} = U^i / (H + 2x^i), \quad E_H^{i+1} = U^i / (2x^i);$$

$$F_E^{i+1} = \begin{cases} 0, & x^{i+1} < x_0 \\ \varepsilon_0 (S_K - S_H) (E_K^{i+1})^2 / 2 + \varepsilon_0 S_H (E_H^{i+1})^2 / 2, & x^{i+1} \geq x_0; \end{cases}$$

$$F_S^{i+1} = F_U^{i+1} - F_M^{i+1} - F_E^{i+1};$$

$$v^{i+1} = v^i + (F_S^{i+1} / m) \Delta t; \quad x^{i+1} = x^i + v^{i+1} \Delta t;$$

$$C_K^{i+1} = C_0 + \varepsilon_0 [S_H / (2x^{i+1}) + (S_K - S_H) / (H + 2x^{i+1})]; \quad \Delta C_K^{i+1} = C_K^{i+1} - C_K^i,$$

где  $i$  – номер шага расчета,  $\Delta t$  – шаг по времени;  $W^i$  – энергия, выделяющаяся на аноде за счет автоэмиссионного тока.

Система уравнений, обеспечивающая подбор напряжения  $U^i$ , представляется в виде ( $U^j = U_{00}$  при  $j = 0$ ;  $U_{00} = 0,001$  В;  $\Delta U = 0,001$  В):

$$U^{j+1} = U^j + \Delta U; \quad E_H^{j+1} = U^{j+1} / (2x^i); \quad y^{j+1} = 3,79 \cdot 10^{-5} \sqrt{E_H^{j+1}} / e\varphi;$$

$$\theta_y^{j+1} = 1 - (y^{j+1})^{1.7}; \quad I_E^{j+1} = A_E (E_H^{j+1})^2 S_H \exp(-B_E \theta_y^{j+1} / E_H^{j+1});$$

$$\Delta U_C = \left[ [(U_0 - U^{j+1}) / R - I_E^{j+1}] \Delta t - U^j \Delta C_K^{i+1} \right] / C_K^{i+1}; \quad U_C^{j+1} = U_C^j + \Delta U_C;$$

$$U^i = U^{j+1} \text{ при } 1 < U_C^{j+1} / U^{j+1} < 1,005; \quad W^{i+1} = W^i + U^i I_E^i \Delta t,$$

где  $j$  – номер шага подбора напряжения,  $\Delta U$  – шаг по напряжению (дробится при подборе).

## 3. Результаты моделирования

С помощью разработанной модели исследовалась динамика размыкания контактов геркона типа МКА–14108. В расчеты в соответствии с принятыми обозначениями были заложены следующие значения параметров: приведенная масса КД  $m = 2 \cdot 10^{-6}$  кг; зазор между КД  $\delta_0 = 3 \cdot 10^{-5}$  м; модуль упругости  $E_U = 1,4 \cdot 10^{11}$  Н/м; перекрытие  $a = 0,0005$  м; ширина  $b = 0,001$  м; толщина  $h = 0,0002$  м; длина внутри геркона  $l = 0,005$  м; высота микровыступа  $H = 9 \cdot 10^{-7}$  м; площадь его вершины  $S_H = 2,5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>; ток отпускания геркона  $I_0 = 0,0012$  А; число витков катушки  $N_w = 5000$ ; работа выхода автоэммиттера  $e\varphi = 4,5$  эВ; минимальное расстояние электрического разрыва контактов  $x_0 = 5 \cdot 10^{-10}$  м.

Параметры электрической цепи: напряжение источника  $U_0 = 100$  В; сопротивление нагрузки  $R_0 = 200$  Ом; индуктивность катушки  $L_K = 0,15$  Гн (при разомкнутых контактах);  $e\varphi$

сопротивление  $R_K = 870 \text{ Ом}$ ; паразитная емкость  $C_0 = 50 \text{ пФ}$ . Характерные значения временного диапазона 25 – 1000 мкс, временного шага 20 – 100 нс, погрешность подбора напряжения 0,5 %.

На рис. 1 представлены начальные участки временных зависимостей координаты приведенной массы КД (*a*), суммарной силы (*б*), напряжения между электродами (*в*) и тока автоэлектронной эмиссии (*г*). Координата  $x = 0$  соответствует замкнутым контактам, а начальный момент времени – равенству упругой и магнитной сил (последняя убывает с течением времени).

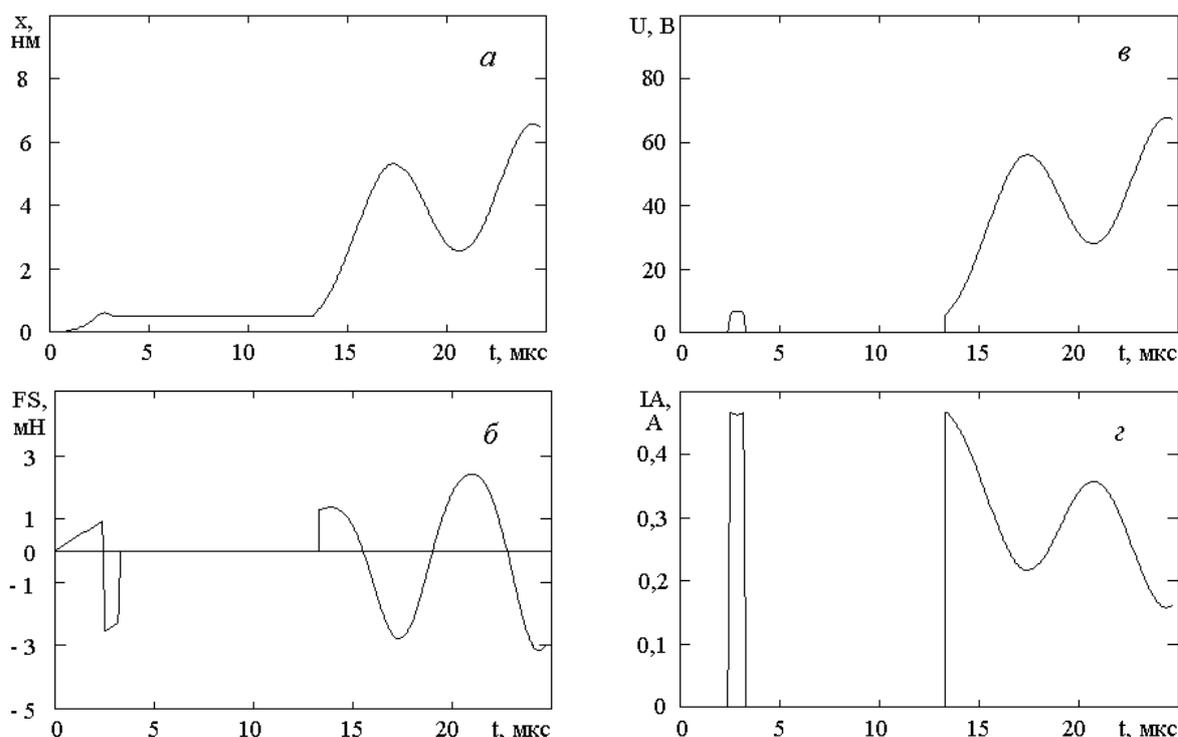


Рис. 1. Начальные участки временных зависимостей координаты КД (*a*), суммарной силы (*б*), межэлектродного напряжения (*в*) и тока автоэлектронной эмиссии (*г*)

Как следует из рисунка, с увеличением времени до 2 мкс значения координаты (рис. 1, *a*) и силы (рис.1, *б*) возрастают. Величина координаты превышает расстояние разрыва контактов  $x_0 = 0,5 \text{ нм}$ , и напряжение между ними увеличивается приблизительно до 7 В (рис.1, *в*). Возникает электрическое поле, напряженность которого очень велика за счет малого межэлектродного расстояния. Электрическое притяжение контактов изменяет знак суммарной силы (рис.1, *б*). Рост координаты замедляется, скорость снижается, изменяет знак, координата уменьшается, и контакты замыкаются (начало горизонтального участка в диапазоне 3 – 13 мкс на уровне  $x_0 = 0,5 \text{ нм}$  на рис. 1, *a*).

После задержки размыкания контактов в течение 10 мкс скорость приведенной массы изменяет знак (в соответствии с допущением упругого отражения), и на отрезке времени 13 – 25 мкс координата КД постепенно увеличивается в процессе колебательного движения с частотой около 125 кГц. Колебания обусловлены изменением знака суммарной силы (рис. 1, *б*) за счет электрического притяжения контактов при больших значениях напряженности электрического поля (при большом напряжении или малом межэлектродном расстоянии). Напряжение между контактами также периодически изменяется в диапазоне 30 – 70 В (рис. 1, *в*). Спады напряжения вызываются подъемами автоэлектронного тока до больших (0,5 А) значений при росте напряженности электрического поля за счет очень малого межэлектродного расстояния и сравнительно большого напряжения. При

уменьшениях напряжения автоэлектронный ток, очевидно, превышает ток заряда емкости от источника питания. Интересно, что максимумы тока автоэлектронной эмиссии (рис. 1, *з*) соответствуют минимумам напряжения (рис. 1, *в*). Заметим, что колебания напряжения при размыкании контактов высоковольтных герконов наблюдались экспериментально [7].

Изменения координаты КД, суммарной силы, межэлектродного напряжения и тока автоэлектронной эмиссии на более длительном (до 100 мкс) временном интервале представлены на рис. 2.

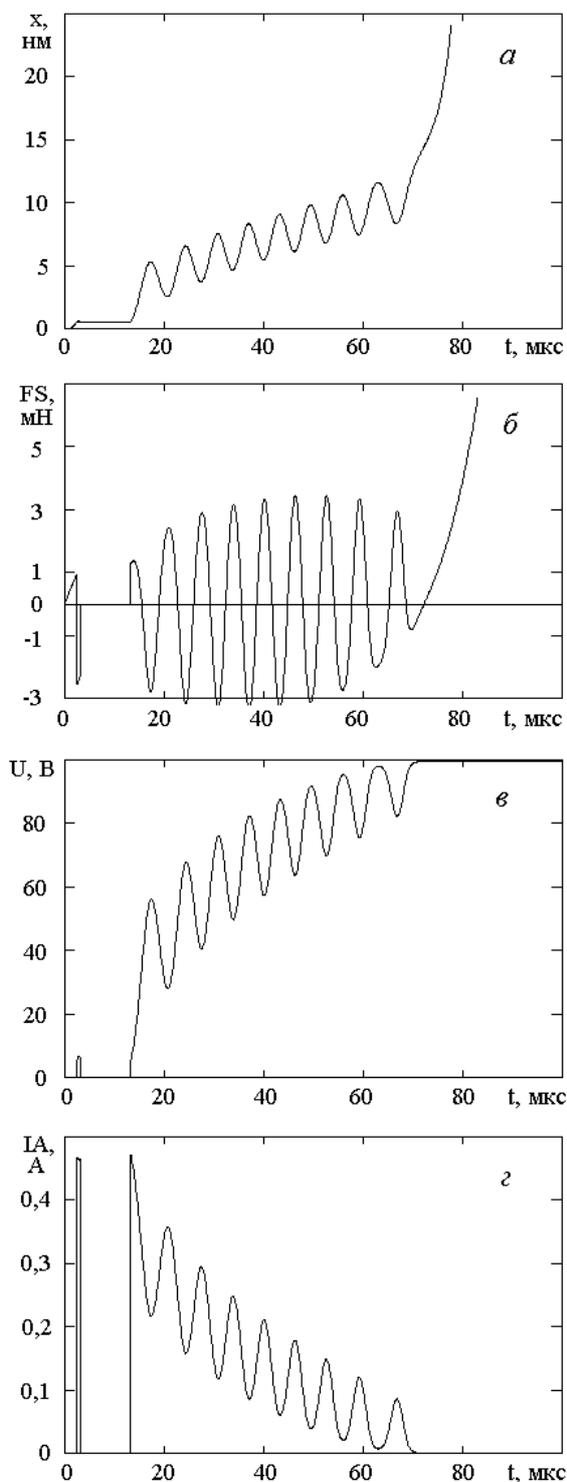


Рис. 2. Зависимости координаты КД (*а*), суммарной силы (*б*), напряжения (*в*) и тока автоэлектронной эмиссии (*г*) от времени.  
 $V_0 = 0$ .  $W = 0,471$  мДж

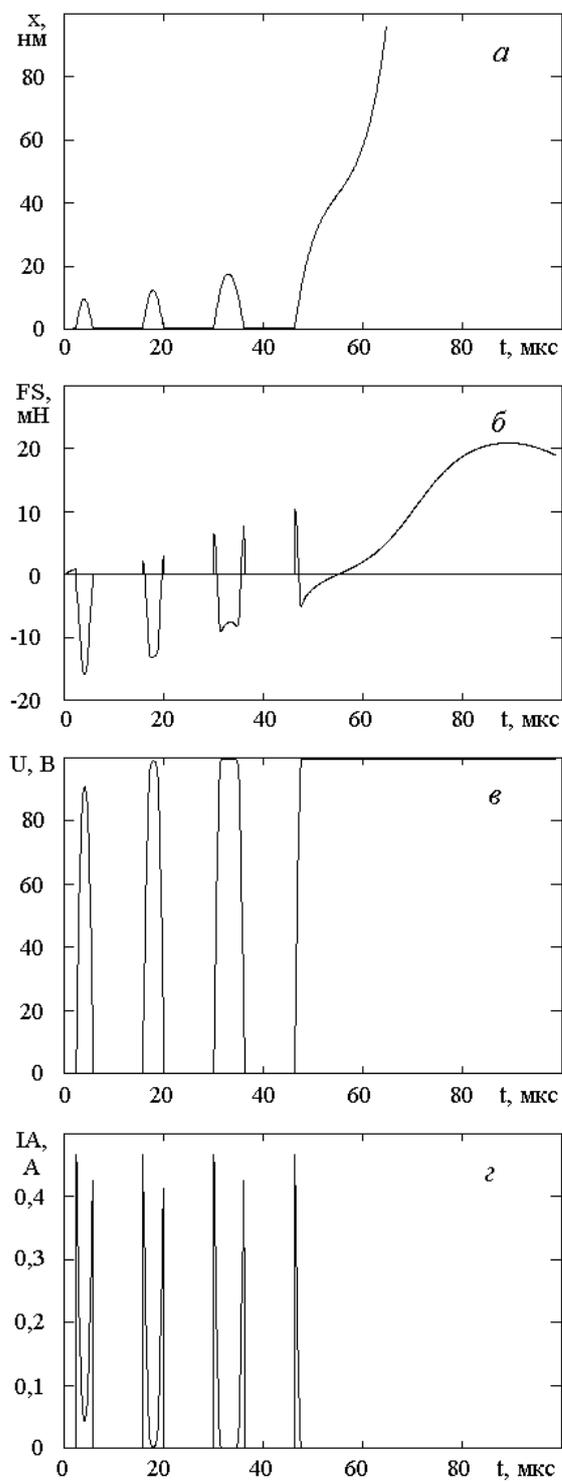


Рис. 3. Зависимости координаты КД (*а*), суммарной силы (*б*), напряжения (*в*) и тока автоэлектронной эмиссии (*г*) от времени.  
 $V_0 = 0,008$  м/с.  $W = 0,0829$  мДж

Из рисунка видно, что колебания КД продолжаются примерно 70 мкс (рис. 2, *a*). При этом контакты не замыкаются ( $x > x_0$ ). Соответственно, периодически в диапазоне  $\pm 3$  мН (примерно 10 % упругой силы) изменяется суммарная сила (рис. 2, *б*). Далее с течением времени колебания прекращаются из-за уменьшения магнитной силы, координата КД и суммарная сила резко увеличиваются (до 25 нм и 7 мН на рис. 2, *a* и *б*). При значении времени около 180 мкс координата достигает максимума и дальше изменяется с периодом 190 мкс (максимум  $\approx 29$  мкм, минимум  $\approx 1$  мкм, на рисунке не показано).

Напряжение между контактами в процессе колебаний сравнительно быстро (70 мкс) возрастает до 100 В (рис. 2, *в*) при сравнительно малом (25 нм) межэлектродном расстоянии и практически нулевом автоэлектронном токе (рис. 2, *г*). Далее колебания прекращаются в результате уменьшения магнитной силы, а также резкого роста координаты и уменьшения электрического притяжения контактов.

Автоэлектронный ток в области большой напряженности поля вблизи вершины микровыступа может вызвать локальное плавление материала КД. Расчет показал, что перед размыканием контактов на аноде выделяется сравнительно большая (0,471 мДж) энергия. Приблизительная оценка показывает, что эта энергия достаточна для нагрева, плавления и испарения количества материала, содержащегося в полусфере с радиусом 15,2 мкм. При расчетах значения теплоемкости, теплоты плавления и теплоты испарения взяты для никеля, входящего в состав материала КД [6]. Реально радиус полусферы испаренного материала должен быть меньше, поскольку в расчете не учитывался отвод энергии из расплавленной зоны в толщу металла. Однако, с другой стороны, после  $10^6$  размыканий радиус должен увеличиться на два порядка. Поэтому можно считать, что полученные данные подтверждают возможность разрушения анода в результате выделения энергии за счет автоэлектронного тока.

При производственных испытаниях по определению ресурса герконов на частотах 50 – 100 Гц к моменту размыкания не полностью затухают колебания КД, возникающие при предшествовавшем замыкании [1]. В связи с этим моделировался процесс размыкания контактов при ненулевой начальной скорости движения массы. Результаты представлены на рис. 3 для  $v_0 = 0,008$  м/с, что составляет около 2 % от максимальной скорости КД при свободных колебаниях.

Наличие начальной скорости существенно увеличивает значения координаты КД. Например, максимум координаты перед первым повторным замыканием возрастает примерно на порядок (с 1 нм до 10 нм, рис. 2, *a* и 3, *a*). Соответственно увеличиваются сила электрического притяжения (примерно с 2 мН до 15 мН, рис. 2, *б* и 3, *б*) и напряжение (с 7 В до 90 В, рис. 2, *в* и 3, *в*). Максимальный уровень автоэлектронного тока остается практически прежним, но ток проявляется в виде коротких импульсов (рис. 3, *г*).

На временном отрезке до полного размыкания контактов увеличивается число повторных замыканий КД (от 1 до 3). В течение временных задержек после замыканий напряжение и автоэлектронный ток равны нулю, что резко уменьшает энергию, выделяющуюся за счет автоэлектронного тока: с 0,47 мДж до 0,083 мДж (радиус полусферы гипотетически испаренного материала уменьшается с 15,2 мкм до 8,5 мкм).

Продолжительность процесса размыкания при наличии начальной скорости заметно уменьшается (с 70 мкс до 50 мкс, рис. 2, *в* и 3, *в*) из-за более быстрого увеличения координаты КД и межконтактного зазора.

#### 4. Экспериментальная часть

Основной целью экспериментов являлась проверка правильности наиболее существенного результата моделирования – установления возможности серии повторных замыканий контактов под действием электрического притяжения. Проверка осуществлялась сопоставлением осциллограмм напряжения на герконе при размыкании его контактов с расчетной временной зависимостью напряжения, представленной на рисунке 3 в. Электрическая схема экспериментального устройства (рис. 4) содержала геркон (МКА-14108), размещенный в стандартной управляющей катушке, источник постоянного напряжения (100 – 200 В), резистор (5,6 кОм) и генератор одиночных прямоугольных импульсов напряжения Г5-63 (10 В, 0,35 мс).

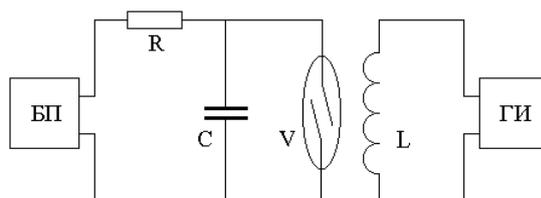


Рис. 4. Схема измерений: БП – блок питания, R – резистор, C – паразитная емкость, V – геркон, L – управляющая катушка, ГИ – генератор импульсов

Изменения напряжения на герконе наблюдались с помощью цифрового двухканального осциллографа АСК-3104. Напряжение на вход осциллографа подавалось через делитель 1:10 ( $C_{ex} = 15$  пФ,  $R_{ex} = 10$  МОм). Результаты эксперимента представлены на рис. 5 (более детально – в работе [8]). Начальный момент времени соответствует переднему фронту управляющего импульса и напряжению 100 – 200 В, нулевой уровень – нижним участкам осциллограмм. Из рис. 5а видно, что контакты замыкаются приблизительно через 100 мкс после подачи импульса напряжения на катушку. Контакты размыкаются примерно через 400 мкс после замыкания, и напряжение на герконе быстро (единицы мкс) увеличивается до напряжения источника питания.

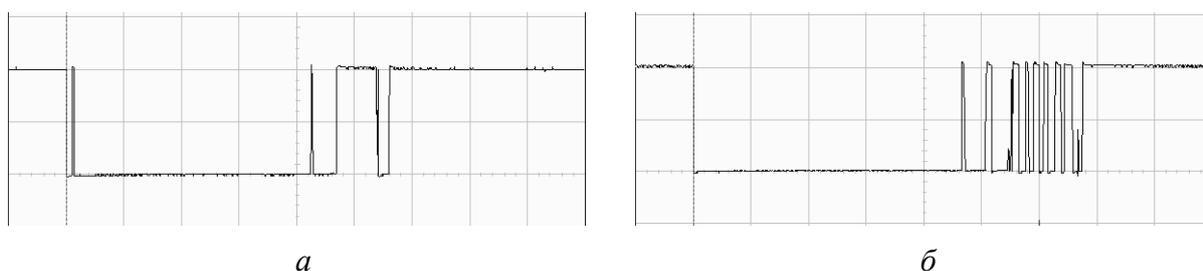


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на герконе для двух значений напряжения источника питания: 100 В (а) и 200 В (б). Цена деления: 50 В (а); 100 В (б); 100 мкс (а, б). Длительность импульса напряжения на катушке 350 мкс (от начала развертки)

Осциллограмма напряжения на рис. 5а соответствует, в основном, результатам расчета (рис. 3, в): на осциллограмме зафиксированы два повторных замыкания, а по расчетным данным – три. Заметные различия расчетных и экспериментальных данных (количество повторных замыканий, периодичность их повторения, общая продолжительность серии замыканий) связаны как с приближенностью разработанной компьютерной модели, так и с существенным разбросом результатов измерений для одного или нескольких образцов

герконов. Вероятной причиной разброса, а также отсутствия определенной закономерности следования бросков напряжения является изменение микрорельефа контактирующих поверхностей после каждого замыкания в результате соударений электродов или за счет выделения электрической мощности при возникновении автоэмиссионного тока.

При повышении коммутируемого напряжения до 200 В число повторных замыканий в несколько раз увеличивается (рис. 5, б), что подтверждает существенную роль электрического притяжения в механизме возникновения дребезга контактов.

## 5. Заключение

Основные результаты выполненной работы:

- Создана компьютерная модель процесса размыкания магнитоуправляемых контактов при разрыве электрического тока в цепи с активной нагрузкой. В основу модели положено уравнение движения приведенной массы контакт-детали, которое решается с учетом зависимости силы электрического притяжения от координаты движения, напряжения на промежутке, тока заряда межконтактной емкости от источника питания и тока ее разряда за счет автоэлектронной эмиссии.

- С помощью модели для геркона МКА-14108 в диапазоне 0,1 – 1000 мкс получены временные зависимости координаты приведенной массы, действующей на массу суммарной силы (упругой, магнитной и электрической), напряжения между электродами и тока автоэлектронной эмиссии. Показано, что в процессе выключения геркона электрическая сила при нулевой начальной скорости массы приводит к возникновению колебаний указанных параметров с частотой примерно 125 кГц и с изменением координаты в пределах 1 – 10 нм в течение 70 мкс. При наличии нулевой скорости возникает серия повторных замыканий контактов с соответствующими бросками напряжения и тока.

- Произведена оценка энергии, выделяющейся под действием тока автоэлектронной эмиссии в процессе размыкания контактов. Установлено, что энергия сравнительно велика (около 0,5 мДж при  $V_0 = 0$  и 0,1 мДж при  $V_0 = 0,008$  м/с) и достаточна для испарения полусферы материала анода с радиусом 15,2 или 8,5 мкм, что подтверждает возможность эрозии контактов за счет автоэмиссионного тока.

- Достоверность результатов моделирования подтверждена экспериментальными осциллограммами напряжения между контактами геркона.

С помощью разработанной модели планируется исследовать динамику размыкания магнитоуправляемых контактов в зависимости от значений напряжения, разрываемого тока, емкости между контактами, микрорельефа контактирующих поверхностей, начальной скорости, работы выхода электронов и других параметров процесса.

## Литература

1. Шоффа В.Н., Медзински Б. Влияние режимов и способов управления на динамические характеристики и ресурс герконов // Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе, 1 – 3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань: Изд. ООО «Полиграф», 2009. – С. 16-23.
2. Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 408 с.
3. Коротченко В.А., Соловьев В.И., Солотенкова Ж.В. Динамика размыкания магнитоуправляемых контактов при разрыве электрического тока // «Вестник РГРТУ». – Рязань: РГРТУ, 2011, № 2 (выпуск 36). – С. 61-67.
4. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. – М.: Физматгиз, 1958. – 272 с.

5. Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. – М: Атомиздат, 1972. – 304 с.
6. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. Том 1. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 632 с.
7. Чижиков А.Е., Ильичев С.Б., Шлыков А.В. Особенности процессов при размыкании высоковольтных магнитоуправляемых контактов // Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе, 1 – 3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань: Изд. «Полиграф», 2009. – С. 61-64.
8. Соловьев В.И., Коротченко В.А., Солотенкова Ж.В. Исследование условий возникновения повторных замыканий герконов при разрыве тока // «Вестник РГРТУ». Рязань: РГРТУ, 2011, № 3 (выпуск 37). – С. 61-67.
9. Von C. Huber und K.L. Rau. Prellerscheinungen an Schutzgaskontakten. FREQUENZ, Bd 20/1966, Nr. 3.