

# Повышение ресурса герконов за счёт оптимизации воздействующей магнитодвижущей силы

## Часть 1

Николай Лемешко (nlem83@mail.ru),  
Павел Струнин (Pavel.Strunin@rohde-schwarz.com)

В статье предложен способ повышения рабочего ресурса герконов, который основан на уменьшении количества отскоков контактов в каждом цикле срабатывания.

В первой части статьи излагается механистическая модель, которая позволяет рассчитывать время первого касания контактов и скорость их соударения для произвольных форм тока в связанной с герконом катушке.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительное внимание уделяется повышению надёжности функционирования электронных устройств, которая определяется используемой компонентной базой и режимами её эксплуатации. Практика показала, что такие показатели надёжности [1], как вероятность безотказной работы и средняя наработка на отказ, существенно снижаются при приближении компонентов к предельно допустимым режимам эксплуатации. В связи с этим выбор режима работы компонентов является важным условием обеспечения надёжности технических средств.

Одними из самых надёжных компонентов электрических схем являются герконы и реле на их основе, среди которых встречаются образцы с предельным количеством коммутаций свыше 100 млн. Как известно, коммутация в герконах осуществляется за счёт того, что контактная пара становится частью магнитной цепи, в результате чего между контактами действует сила тяги, подобная возникающей в зазоре между электромагнитом и якорем. В справочной документации для

герконов указывают интервалы для двух параметров: магнитодвижущей силы (м.д.с.) срабатывания и отпускания. Однако этой информации недостаточно для оптимизации работы герконов и повышения их надёжности.

В работе [2] отмечается, что процесс перехода контактной пары геркона в замкнутое состояние сопровождается в среднем шестью отскоками контактов. Время дребезга может составлять до 10 мс в зависимости от силы первоначального их соударения. Если геркон работает под значительной токовой нагрузкой активного характера, особенно индуктивного, то каждый отскок будет сопровождаться искрением, которое приводит к эрозии контактов, их истончению, повышению переходного сопротивления и последующему излому [3]. Ещё одной проблемой является чрезмерная механическая нагрузка на области крепления контактов в корпусе геркона, которая приводит к ускорению старения материала и в перспективе – к появлению трещин и разрушению корпуса.

Анализ работы геркона показывает, что чрезмерное увеличение м.д.с. должно приводить к снижению времени первого соударения контактов при одновременном увеличении его скорости и, соответственно, количества отскоков, что приводит к значительному снижению ресурса работы геркона. Целью настоящей работы является выработка подходов к увеличению ресурса работы герконов, в первую очередь – в составе реле, и устройств на их основе, а также к сопутствующему снижению энергии, требующейся для срабатывания геркона.

### МОДЕЛЬ СБЛИЖЕНИЯ КОНТАКТОВ ГЕРКОНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Из законов механики следует, что отскок контактов в герконе происходит в результате обмена импульсами движения, который возникает из-за ненулевых скоростей контактов в момент их первого соприкосновения [4]. Для оптимизации управления м.д.с. следует более тщательно рассмотреть процесс сближения контактов в герконе, модель которого может быть построена на основе известных законов механики.

Рассмотрим пару контактов в составе геркона (см. рис. 1), имеющих постоянные жёсткости  $c_1$  и  $c_2$  в направлении силы тяги внешнего магнитного поля. Будем считать, что контакты движутся от своих крайних положений к точке соприкосновения вдоль прямой (на иллюстрации показана пунктиром), параллельной оси  $X$ , причём при отсутствии магнитного поля положение контактов 1 и 2 соответствуют координатам  $x_{1,0}=0$  и  $x_{2,0}=A$ . Помещение геркона в магнитное поле приводит к тому, что система из двух контактов становится частью магнитной цепи, и между ними возникает некоторая сила тяги  $F_M$ , которая стремится сблизить контакты и является функцией расстояния между ними, т.е.  $F_M = F_M(x_2(t) - x_1(t))$ . С другой стороны, при отклонении контактов 1 и 2 от положения равновесия возникают силы противодействия, обусловленные их деформацией и равные  $c_1 x_1(t)$  и  $c_2(A - x_2(t))$  соответственно. Задавая механическую инерционность контактов массами  $m_1$  и  $m_2$ , получим следующие выражения для зависимостей их ускорений от времени:

$$\begin{aligned} a_1(t) &= \frac{F_M(x_2(t) - x_1(t)) - c_1 x_1(t)}{m_1}, \\ a_2(t) &= \frac{c_2(A - x_2(t)) - F_M(x_2(t) - x_1(t))}{m_2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Далее необходимо определить зависимость силы тяги  $F_M$ , возникающую между контактами геркона. Для этого следует проанализировать структуру магнитной цепи, в которой создаётся данная сила. Известно, что для электромагнита с одним зазором малых

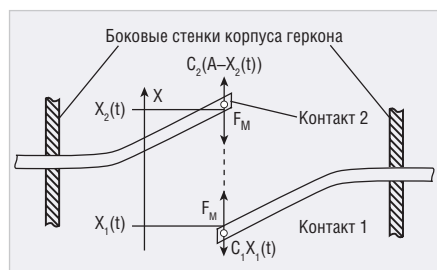


Рис. 1. Модель сближения контактов в герконе при воздействии магнитного поля

размеров  $\delta$  сила тяги, не зависящая от его размеров, определяется формулой Максвелла и составляет  $F = \frac{1}{2} \times \frac{\Phi}{\mu_0 \times S}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\Phi$  – магнитный поток;  $S$  – площадь сечения магнитного потока [5].

Однако эта формула не подходит для случая геркона, поскольку вне зависимости от конструкции катушки, создающей магнитное поле, замкнутые силовые линии магнитного поля проходят большую часть вне ферромагнитных элементов, образующих магнитопровод, и по этой причине аналогия с классическим электромагнитом не может быть использована.

Для определённости будем считать, что геркон расположен внутри катушки с совпадением осей их симметрии. Контактную пару можно рассматривать как фрагмент магнитопровода малого сечения, в котором имеется один зазор, соизмеримый с размерами сечения магнитного потока. Это случай, соответствующий магнитному приводу со значительным расстоянием перемещения сердечника, и он детально рассмотрен в теории проектирования реле [6], где показано, что зависимость силы тяги магнита от расстояния между якорем и сердечником определяется уравнением  $F_M = \frac{(M(t))^2 \times \mu_0 \times S}{2 \times \delta^2}$ , где  $M(t)$  – магнитодвижущая сила в магнитной цепи, изменяющаяся во времени.

Контакты геркона обычно выполнены из ферромагнетика с относительной магнитной проницаемостью  $\mu \gg 1$ . Известно, что магнитное сопротивление  $R_M \sim 1/(\mu \times S_M)$ , где  $S_M$  – площадь сечения участка магнитной цепи. В случае размещения геркона внутри катушки магнитный поток протекает двумя путями: через магнитопровод, образованный контактами, и вне его, причём для материала контактов значение  $\mu$  составляет порядка 1000...10000. С учётом столь большого значения  $\mu$  сопротивления двух названных участков магнитной цепи будут одинаковыми, если диаметр катушки будет превосходить диаметр сечения контактов геркона в  $\sqrt{\mu}$  раз. Для оценки распределения магнитного потока в контактах геркона и в остальном сечении катушки целесообразно обратиться к типовым условиям использования массово выпускаемых герконов.

В качестве примера рассмотрим геркон МКА-14103 [7], который имеет диаметр контактов 0,55 мм при рекомендуемом диаметре катушки 8,1 мм. Если считать, что для материала контактов  $\mu=1000$ , то магнитное сопротивление контактной пары оказывается в 4,6 раза меньше, чем в остальном сечении катуш-

ки. Это означает, что 82,1% магнитного потока проходят через контакты геркона. Таким образом, если катушка весьма плотно охватывает геркон, то большая часть магнитного потока проходит через его контактную пару. В связи с этим в дальнейших расчётах будем полагать, что  $M(t) = k \times N \times i(t)$ , где  $k=0,8$  – коэффициент использования м.д.с;  $N$  – количество витков в катушке;  $i(t)$  – зависимость тока в катушке от времени. Исходя из этого, формула для силы тяги приобретает вид:

$$F_M \times (x_2(t) - x_1(t)) = \frac{(k \times N \times i(t))^2 \times \mu_0 \times S}{2 \times (x_2(t) - x_1(t))^2}$$

однако она требует некоторой корректировки.

Согласно экспериментальным исследованиям, с уменьшением расстояния между якорем и сердечником сила тяги увеличивается по квадратичному закону, но при их контакте имеет конечное значение. Как отмечается в [6], для практических расчётов можно полагать, что их сближение ограничено расстоянием  $\delta_{\min} = 0,1$  мм. Исходя из этого, уравнения (1) могут быть записаны в виде:

$$a_1(t) = \frac{(k \times N \times i(t))^2 \times \mu_0 \times S}{2m_1 \times (|x_2(t) - x_1(t)| + \delta_{\min})^2} - \frac{c_1 \times x_1(t)}{m_1} = G_1;$$

$$a_2(t) = \frac{c_2 \times (A - x_2(t))}{m_2} - \frac{(k \times N \times i(t))^2 \times \mu_0 \times S}{2m_2 \times (|x_2(t) - x_1(t)| + \delta_{\min})^2} = G_2.$$

Построенная модель имеет ограничения по области адекватности, поскольку описывает сближение контактов геркона только до первого касания, если таковое вообще происходит для заданной функции  $i(t)$ . Для дальнейшего анализа интерес представляют скорости движения контактов  $v_1(t)$  и  $v_2(t)$ , а также координаты  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ . Отсюда модель приобретает форму системы дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = v_1(t); \quad \frac{dv_1(t)}{dt} = G_1;$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = v_2(t); \quad \frac{dv_2(t)}{dt} = G_2.$$

Для формулирования качественных и количественных выводов, являющихся основой для оптимизации формы тока в катушке, необходимо проанализировать результаты моделирования процесса сближения контактов.

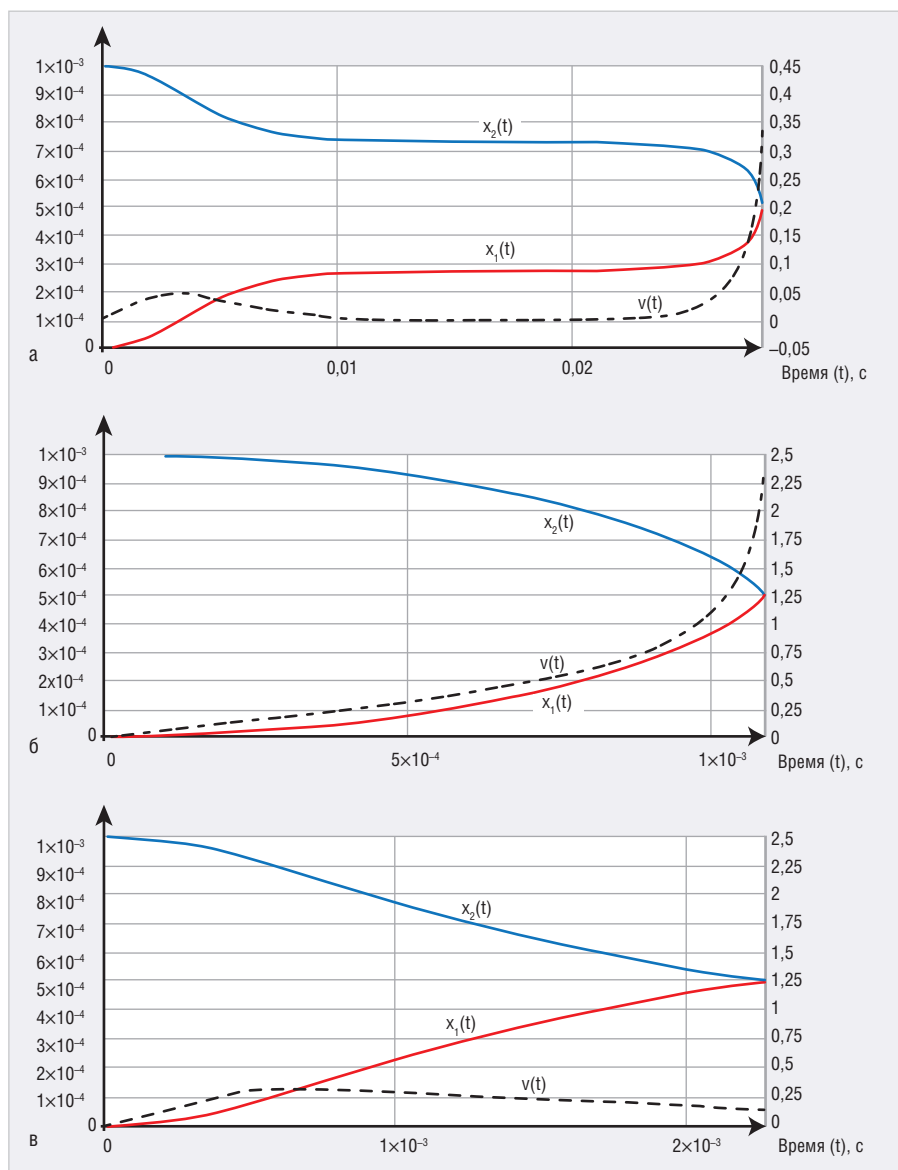
### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СБЛИЖЕНИЯ КОНТАКТОВ В ГЕРКОНЕ

Реле на основе герконов характеризуются сравнительно невысокой индуктивностью катушки из-за отсутствия ферро-

магнитного сердечника. Поэтому можно считать, что инерционность коммутации при внезапном появлении постоянного тока  $I$  в катушке в первую очередь обусловлена механическими процессами. В качестве рассчитываемых по модели характеристик введём время первого касания контактов  $t_{\text{нк}}$ , а также энергетическую характеристику  $\mathcal{E}_{\text{нк}} = I^2 \times t_{\text{нк}}$ . Как правило, контакты в герконе изоглавливаются из одинаковых материалов, имеют симметричное расположение, одинаковые размеры и сходные точки закрепления, что даёт возможность охарактеризовать их одинаковой массой. Исходя из этого, можно ожидать численного равенства скоростей  $v_1(t)$  и  $v_2(t)$ . Поэтому вместо них в дальнейшем будет использоваться единая функция  $v(t)$ . Введём параметр  $v_{\text{нк}} = v(t_{\text{нк}})$ , характеризующий скорость движения каждого из контактов геркона в момент их первого касания. Основной целью моделирования является получение зависимостей показателей  $t_{\text{нк}}$ ,  $v_{\text{нк}}$  и  $\mathcal{E}_{\text{нк}}$  от значения тока  $I$ .

Уравнения (2) включают в себя ряд параметров, значения которых должны быть оценены на основе анализа типовой конструкции геркона, например МКА-14103 [7]. Герконы этой марки имеют симметричные контакты и массу не более 0,14 г. Для моделирования примем  $m_1 = m_2 = 0,03$  г. Несмотря на малую площадь сечения контактов (около 0,26 мм<sup>2</sup>), они имеют весьма значительную жёсткость для обеспечения упругих деформаций и снижения контактного сопротивления, которая поддерживается специальным профилем их сечения, а также малым плечом приложения нагрузок. Для моделирования примем  $c_1 = c_2 = 10$  Н/м. Площадь  $S$ , через которую протекает магнитный поток, можно приближённо определить соответствующей области возможного электрического контакта. Эта область имеет размеры 0,5 × 2 мм, т.е.  $S = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. Расстояние между контактами при отсутствии магнитного поля примем равным 1 мм.

Далее необходимо определить количество витков  $N$ . В информационном листе [7] даны рекомендации по параметрам катушки для изготовления реле на основе геркона, согласно которым рекомендуется использовать 5000 витков обмоточного провода диаметром 0,063 мм, что соответствует активному сопротивлению катушки около 870 Ом и напряжению питания около 5 В. Однако следовать этой рекомендации и при моделировании, и в экспериментальной части работы нецелесообразно, т.к. уве-



**Рис. 2.** Зависимости  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $v(t)$ , полученные путём моделирования: а) при  $I \approx I_{min}$ , б) при  $I \gg I_{min}$ , в) при  $I = 4$  А и обнулении тока через 50 мс

личение количества витков приводит к возрастанию индуктивности пропорционально  $N^2$ , и, следовательно, снижается скорость нарастания тока в катушке при внезапном её подключении к источнику электропитания. Ввиду этого установим, что  $N = 40$ , что в типовом случае соответствует значению тока срабатывания 0,2...2 А (м.д.с. от 5 до 80 А) при его протекании в катушке с размещённым внутри герконом.

Из физики смыкания контактов в герконе следует, что система «геркон – катушка» характеризуется минимальным током  $I_{min}$ , при котором геркон ещё срабатывает. Для выбранных параметров модели значение  $I_{min}$  составляет около 803,035 мА. Замыкание контактов геркона при  $I \approx I_{min}$  будет происходить силой магнитной тяги, минимально достаточной для его осуществления.

На рисунке 2 показаны графики, характеризующие процесс сближения контактов при  $I \approx I_{min}$  и  $I \gg I_{min}$ , причём значения  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  отсчитываются по левой оси ординат, а значения  $v(t)$  – по правой шкале. В первом случае зависимости  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  характеризуются наличием интервала времени, в котором контакты почти неподвижны, из-за чего время первого касания контактов увеличивается примерно до 28 мс. Если значение  $I_{min}$  определено с очень высокой точностью и выполняется строгое равенство  $I = I_{min}$ , то, согласно модели, контакты могут оставаться в промежуточном положении длительное время, и значение  $t_{mk}$  не удастся определить однозначно. Для реальных герконов в аналогичной ситуации завершение коммутации будет определяться случайными факторами, например внешним механическим воздействием или флуктуаци-

ей тока в обмотке катушки. На момент соприкосновения каждый из контактов имеет скорость  $v_{mk}$  около 0,38 м/с, что с учётом процессов дополнительной механической деформации с высокой вероятностью исключает возникновение отскоков. Если  $I = I_{min}$ , то теоретически соприкосновение контактов происходит при нулевой скорости, но время первого касания не определено.

На рисунке 26 показаны аналогичные графики для  $I = 4$  А. В этом случае  $t_{mk} = 1,09$  мс, т.е. первое касание контактов происходит более чем на порядок быстрее. Но при этом  $v(t_{mk}) = 2,45$  м/с. Учитывая удвоение скорости при встречном соударении, при таком режиме работы контактной пары геркона будут наблюдаться многочисленные отскоки и повторные соударения. Несмотря на существенное снижение времени первого соприкосновения контактов, вопрос о времени завершения срабатывания остаётся открытым, поскольку длительность дребезга контактов может существенно превышать значение  $t_{mk}$  для фиксированного тока в обмотке катушки. Однако представленная модель не позволяет оценивать время окончательного перехода контактной пары геркона в проводящее состояние из-за ограниченной области адекватности.

Далее рассмотрим зависимости  $t_{mk}(I)$ ,  $v_{mk}(I)$ ,  $\mathcal{E}_{mk}(I)$ , полученные по результатам моделирования геркона с теми же параметрами. Первая из них представлена на рисунке 3. При увеличении тока  $I$ , начиная со значения  $I_{min}$ , время первого соударения контактов резко уменьшается, но в дальнейшем эта тенденция заметно ослабевает. При изменении тока от 2 до 4 А значение  $t_{mk}$  снижается с 2,25 до 1,09 мс. При  $I = 0,9$  А значение этого параметра составляет около 6,8 мс. На рисунке 4 показан график функции  $v_{mk}(I)$ , являющий собой почти линейную зависимость, причём значение скорости увеличивается с 0,4 до 2,45 м/с при изменении тока от 0,827 до 4 А. Далее, на рисунке 5, показан график функции  $\mathcal{E}_{mk}(I)$ , имеющий минимум в интервале от 0,87 до 1,1 А со значением около  $5,5 \text{ А}^2 \cdot \text{мс}$ .

На основе графиков, приведённых на рисунках 3 – 5, можно сделать следующие выводы.

1. При  $I \approx I_{min}$  переход контактной пары геркона в стабильно замкнутое состояние характеризуется большой длительностью и высокими затратами энергии на достижение первого касания контактов.
2. Поскольку минимизация значения  $v_{mk}$  всё же не является гарантией ра-

боты контактной пары без отскока, но значительно увеличивает её вероятность, то по результатам моделирования можно рекомендовать режим срабатывания геркона, обеспечиваемый при  $I = (1,1 \dots 1,2)I_{min}$ .

Результаты, полученные в ходе моделирования, требуют постановки двух важных для практики вопросов. Первый: необходимо ли поддерживать ток в катушке в течение всего сближения контактов. Ответить на него позволяют графики, приведённые на рисунке 2в. Они построены для следующей зависимости тока от времени:

$$i(t) = \begin{cases} 4 \text{ А}, & 0 \leq t < 0,5 \text{ мс}; \\ 0, & t < 0 \text{ и } t \geq 0,5 \text{ мс}. \end{cases} \quad (4)$$

При гипотетическом мгновенном исчезновении тока в катушке при  $t = 0,5$  мс контакты всё равно сомкнутся (см. рис. 2в), т.к. они имеют запас по кинетической энергии, достаточный для преодоления собственной упругости. При этом  $t_{mk} = 2,27$  мс,  $v_{mk} = 0,12$  м/с,  $\mathcal{E}_{mk} = 0,0182 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ . Если считать, что после соприкосновения контактов ток в обмотке остаётся выше минимально необходимого для их удержания в соприкосновении, то процесс срабатывания геркона будет вполне успешным. Такое решение позволяет снизить скорость соударения контактов, но имеет и существенный недостаток. Если геркон подвергается механическому воздействию в форме вибрации или ударов, то после снижения тока возможно нарушение взаимного сближения контактов, в результате чего срабатывание геркона не наступит вообще. Поэтому такой подход к управлению герконом нельзя считать универсальным.

Второй вопрос состоит в целесообразности использования согласованного управления, т.е. таких форм тока  $i(t)$ , которые обеспечивают сравнительно небольшое значение  $t_{mk}$  при минимизации скорости первого соударения. Проведённые расчёты показали, что режим с  $v_{mk} \rightarrow 0$  вполне осуществим путём постепенного снижения тока в катушке, но его применение требует значительно усложнения схемы управления током и индивидуального режима управления для каждого образца геркона.

В отличие от рассмотренной модели, результаты экспериментов с герконами отражают наиболее значимые явления в их срабатывании и, конечно же, не утрачивают адекватности после первого касания контактов. В то же время усложнение модели (3) не несёт в себе практической ценности, поскольку оценка параметров соударения и отскока кон-

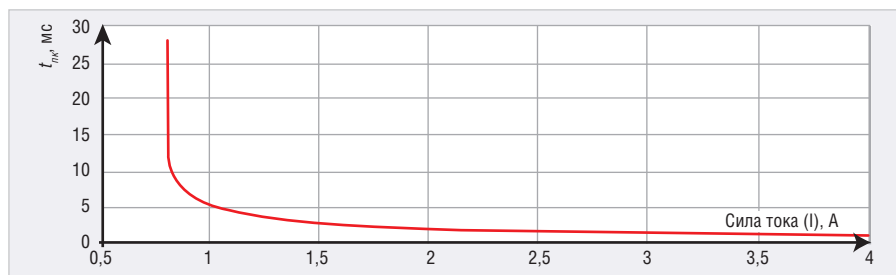


Рис. 3. График зависимости  $t_{mk}(I)$

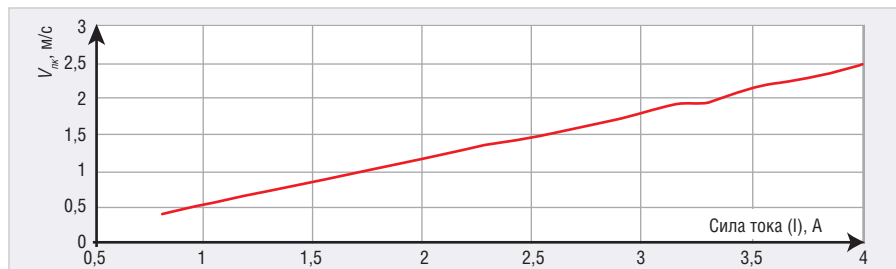


Рис. 4. График зависимости  $v_{mk}(I)$

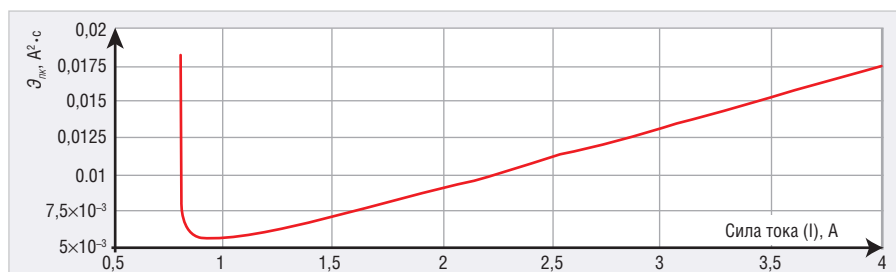


Рис. 5. График зависимости  $\mathcal{E}_{mk}(I)$

тактов потребует знания механических свойств материалов контактов и корпуса, а это крайне затруднит выбор исходных данных для использования модели. Ввиду этого рассмотренные показатели достижения первого касания контактов целесообразно определять экспериментально, а в дополнение к ним ввести время завершения коммутации  $t_{зк}$ , длительность механической релаксации  $t_p = t_{зк} - t_{mk}$ , количество отскоков  $K$ , которые также являются функциями тока в катушке и зависят от его формы.

Систему «геркон – катушка» с фиксированной конструкцией следует охарактеризовать измеренными значениями токов срабатывания  $I_c > I_{min}$  и отпускания  $I_o$ , при которых ещё не допускаются нарушения при срабатывании и отпуске. Значение  $I_c$  будет зависеть от скорости изменения тока, что связано с уровнем накопленной механической энергии встречного движения контактов. Тогда рекомендуемый режим срабатывания будет обеспечен при токе  $I_3 = (1,1 \dots 1,2)I_c$ .

Эта первичная рекомендация, как будет показано во второй части статьи, подлежит уточнению по результатам измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчёту надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Советское радио, 1975. 472 с.
2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
3. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961. 464 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики, 11-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 560 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 9 изд. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
6. Цопов Г.И., Сергеев Г.А., Овсянников В.Н. Проектирование и расчёт электромагнитного устройства низкого напряжения. Учебно-методическое пособие. Самара: Самарский ГТУ, 2013. 53 с.
7. Контакт магнитоуправляемый герметизированный МКА-14103. Информационный лист. Ред. от 29.04.2015. Интернет-ресурс [www.chipdip.ru](http://www.chipdip.ru) (дата обращения 30.10.19).
8. Техническое описание к герконам марки КЭМ. Интернет-ресурс [www.chipdip.ru](http://www.chipdip.ru) (дата обращения 20.11.19).

