

Повышение ресурса герконов за счёт оптимизации воздействующей магнитодвижущей силы

Часть 2

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 была представлена механистическая модель, которая позволяет рассчитывать время первого касания контактов и скорость их соударения для произвольных форм тока в связанной с герконом катушке.

Во второй части показана эффективность предложенного режима в части отсутствия отскоков, которая была подтверждена в ходе экспериментального исследования, проведённого с привлечением измерительного оборудования компании Rohde & Schwarz. Предложена схема для формирования тока в катушке геркона и способ расчёта номиналов её элементов.

Пример экспериментальной оценки характеристик срабатывания геркона с использованием средств измерений компании Rohde & Schwarz

Объект исследований, оборудование и измерительная оснастка

Для проведения измерений был выбран геркон КЭМ-2 группы Б с м.д.с. срабатывания от 21 до 42 А [8]. Для формирования воздействующего магнитного поля была изготовлена катушка, включающая 40 витков обмоточного провода диаметром 0,8 мм и имеющая активное сопро-

тивление около 0,1 Ом. Длина намотки составляла около 40 мм, измененное значение индуктивности – 15,5 мкГн.

На рисунке ба представлена схема измерительной установки. Для питания катушки использовался усилитель мощности в составе генератора АНР-1041 с выходным сопротивлением около 2,5 Ом. На его вход подавалось выходное напряжение генератора R&S HMF2550, предназначенного для формирования сигналов стандартных и произвольных форм. Катушка подключалась к источнику сигналов через балластное сопротивление R с номиналом 4,7 Ом. Учитывая другие составляющие

активного сопротивления, собственная постоянная времени цепи питания катушки равнялась 2,12 мкс. Это значительно меньше времени срабатывания геркона после начала действия магнитного поля, которое согласно документации составляет порядка 1 мс.

Цепь геркона с последовательно включённым сопротивлением R_f номиналом 10 кОм питалась напряжением 5 В, подаваемым с программируемого источника постоянного тока R&S HMP2030. Для реализации автоматических измерений амплитудно-временных характеристик сигналов использовался осциллограф R&S RTO2044 с полосой 4 ГГц и четырьмя каналами. На первый из них подавался сигнал с балластного сопротивления в цепи геркона, на второй – с аналогичного элемента в цепи катушки. Подключение к контрольным точкам измерительной схемы выполнялось при помощи пассивных пробников R&S RT-ZP10 с полосой до 500 МГц, которыми обычно комплектуются осциллографы серии R&S RTO.

Результаты измерений

Для инициирования срабатывания и размыкания контактной пары геркона использовался сигнал в виде последовательности импульсов длительностью 50 мс и частотой 2 Гц, синхронизация

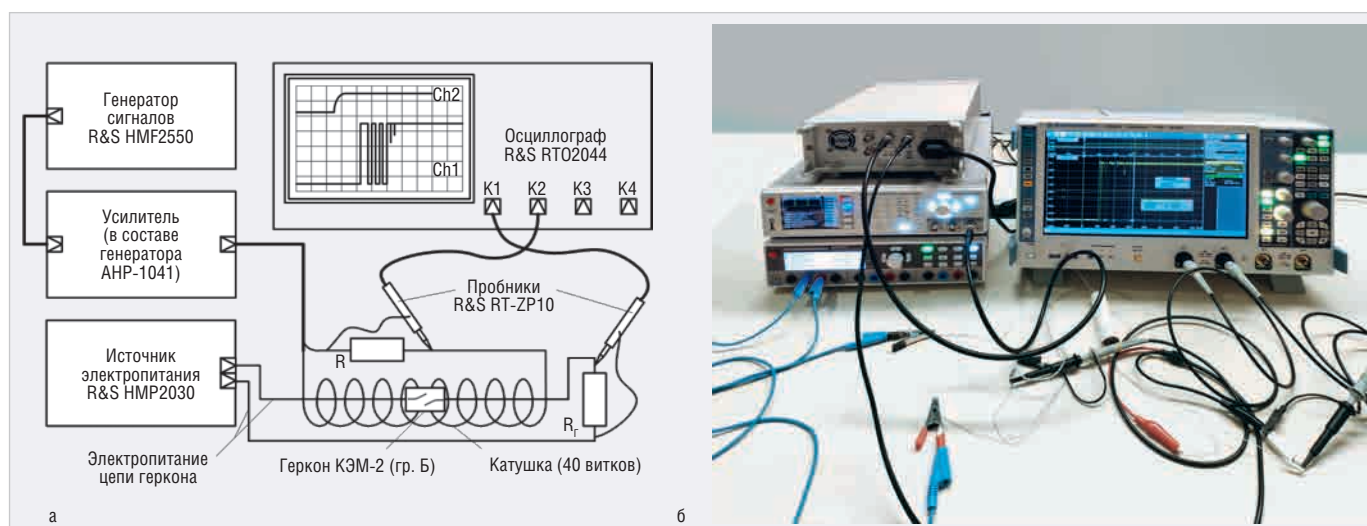


Рис. 6. Схема (а) и фотография (б) измерительной установки

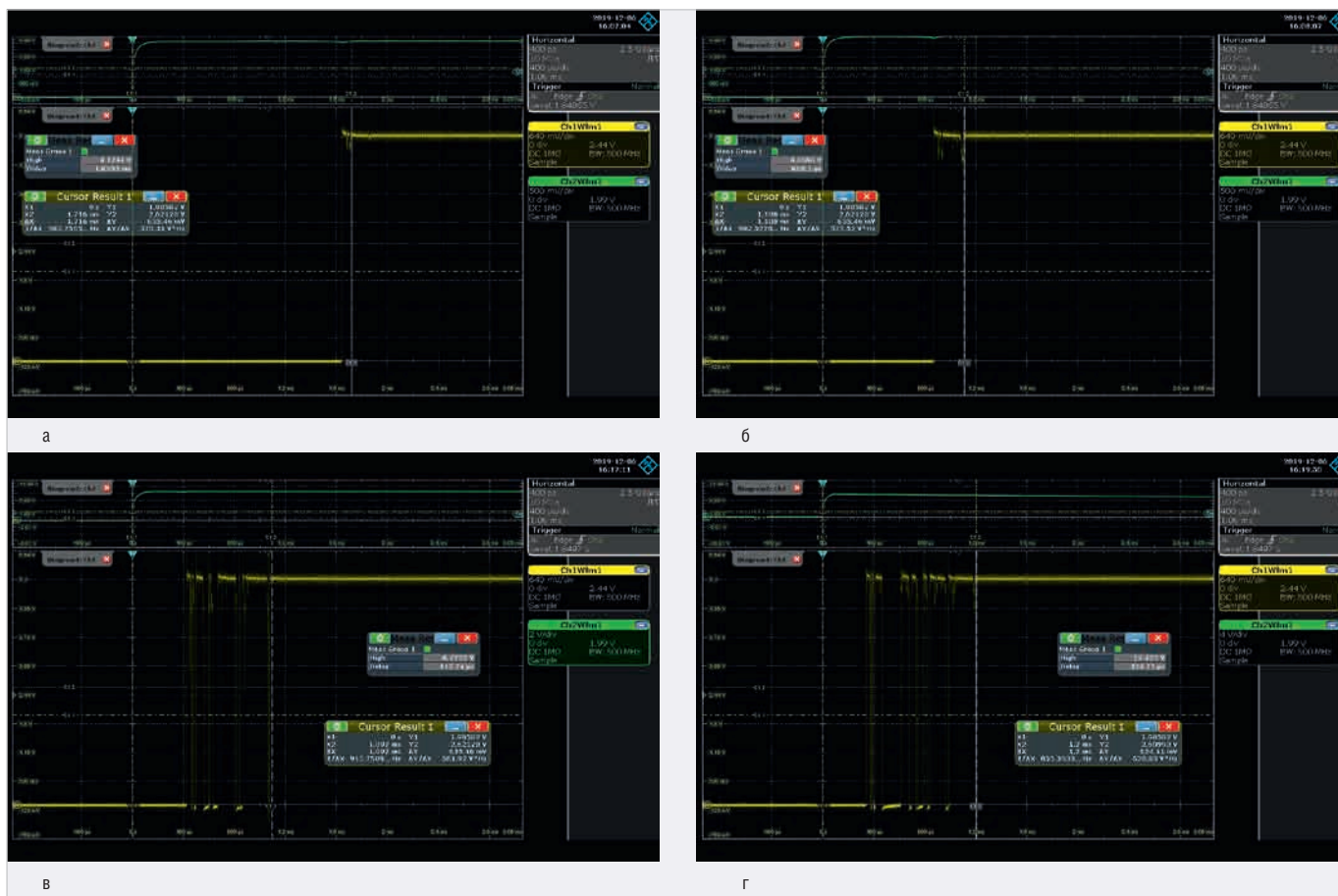


Рис. 7. Осциллограммы сигналов на сопротивлении R и нагрузке геркона при значениях I_k , равных: 0,877 А (а), 0,949 А (б), 1,80 А (в), 2,65 А (г)

осуществлялась по фронту в канале 2. В ходе выполнения измерений определялись значения $t_{нк}$, $t_{зк}$, t_p , K при разных амплитудах импульсов тока в катушке I_k и строго постоянном расположении контактной пары геркона в геометрическом центре катушки. Установлено, что геркон срабатывает при значении импульсного напряжения U_i на резисторе R не менее 4,12 В, следовательно, значение I_c составляет 0,877 А. Размыкание контактов происходит при токе 0,468 А. Таким образом, м.д.с. срабатывания и отпускания составляют 35 и 19 А, что соответствует технической документации [8].

На рисунке 7 представлены примеры осциллограмм, полученных для значений $U_i = 4,12; 4,46; 8,47$ и $12,4$ В, т. е. для значений $I_k = 0,877; 0,949; 1,80; 2,65$ А, последние три из которых соответствуют токам $1,08 \times I_c, 2,05 \times I_c, 3,02 \times I_c$. Измерения значений $t_{нк}$ выполнялись в автоматическом режиме, значений $t_{зк}$ – с использованием курсоров. Как видно из представленных рисунков, после первого соударения контактов в герконе напряжение на нагрузке может иметь провалы и прерывания. Провалы напряжения обусловлены кратковременным повышением

переходного сопротивления контактов при их трении в ходе деформации без размыкания, а прерывания – полным размыканием из-за отскока, вызванного соударением, причём, как отмечалось выше, определяющее влияние на ресурс герконов оказывают именно отскоки. Срабатывание геркона можно считать завершённым только после того, как напряжение на его нагрузке выходит на неизменное в дальнейшем значение. Экспериментально установлено, что для исследуемого геркона провалы появляются при $I_k = 1,027$ А ($1,17 \times I_c$), и при дальнейшем увеличении этого значения ситуация с отскоками усугубляется. Количество отскоков K , регистрируемое по прерываниям напряжения на нагрузке геркона, изменяется от 1 до 7 в интервале увеличения I_k от 1,1 до 1,8 А. При $I_k > 1,8$ А значение K составляет не менее 8, а длительность прерываний существенно возрастает.

Анализируя форму сигнала в канале 2, можно видеть, что начальный момент формирования импульса характеризуется экспоненциальным переходным процессом с постоянной времени около 50 мкс, что существенно больше ана-

логичного параметра для цепи питания катушки. Это явление определяется ограничением по времени нарастания переходной характеристики усилителя мощности и не влияет на трактовку результатов измерений, т. к. длительность переходного процесса всё равно оказывается много меньше $t_{нк}$.

На рисунке 8 представлены зависимости $t_{нк}(I_k), t_{зк}(I_k), t_p(I_k)$, а также зависимости энергетических характеристик $\mathcal{E}_{нк}(I_k) = I_k^2 \times t_{нк}(I_k)$ и $\mathcal{E}_{зк}(I_k) = I_k^2 \times t_{зк}(I_k)$. Формы кривых $t_{нк}(I_k)$ и $\mathcal{E}_{нк}(I_k)$ совпадают с результатами моделирования (см. рис. 3 и 5) [9]. Таким образом, предложенную выше модель сближения контактов в герконе можно считать получившей экспериментальное подтверждение.

Результаты, полученные в ходе измерений, в целом подтвердили состоятельность и практическую ценность построенной модели сближения контактов. Они также позволяют уточнить значение оптимального тока в катушке. Согласно экспериментальным данным, рекомендуемый режим срабатывания геркона будет обеспечен при токе $I_3 = (1,10 \dots 1,15) \times I_c$. Для герконов других типов требуется набор статистики по параметрам срабатывания, однако на текущий момент приведён-

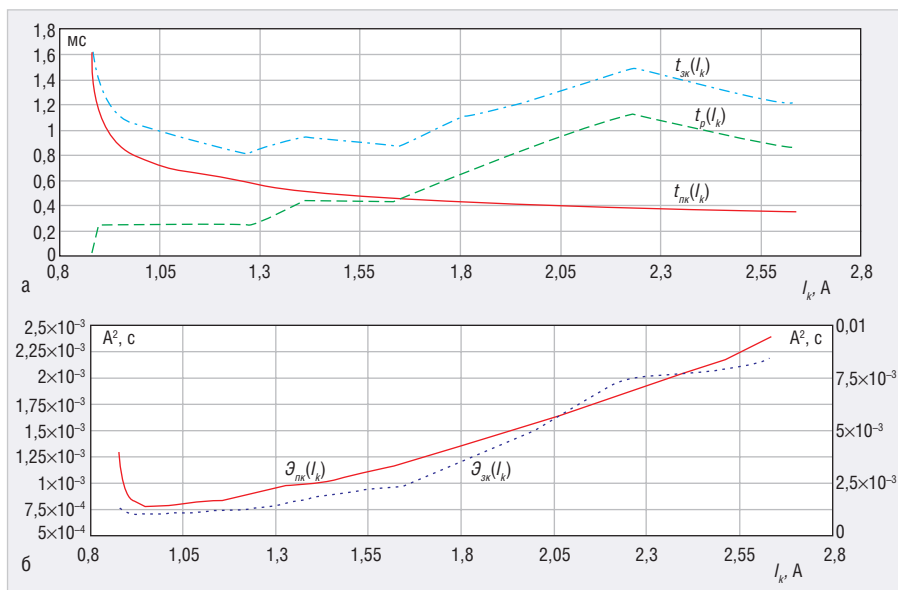


Рис. 8. Зависимости, полученные по результатам измерений: а) $t_{mk}(I_k), t_{zk}(I_k), t_p(I_k)$; б) $Q_{mk}(I_k), Q_{zk}(I_k)$

ную рекомендацию можно считать универсальной и пригодной для герконов любого типа.

На основе построенных графиков [9], в соответствии с изложенным в теоретической части работы подходом, определим значение I_3 и особенности режима срабатывания для исследуемого образца геркона. Ему будет соответствовать ток $I_3 = 1,1 \times I_c = 0,97 \text{ A}$, $t_{mk} = 0,8 \text{ мс}$, $t_{zk} = 1 \text{ мс}$, $Q_{zk} = 1,22 \text{ A}^2 \cdot \text{мс}$.

Представленный пример демонстрирует общий подход к экспериментальному определению оптимального тока срабатывания геркона по критерию минимизации отскоков контактов и энергетических затрат на единичное срабатывание.

Оптимизация управления м.д.с. при коммутации контактной пары в герконе

Очевидно, что после завершения смыкания контактов геркона нет необходимости поддерживать м.д.с., т. е. ток в катушке, на уровне, необходимом для срабатывания, т. к. это не даёт решительно никаких преимуществ, но требует затрат энергии и повышает общее тепловыделение в аппаратуре. Сокращение энергопотребления может быть достигнуто, если после замыкания контактов ток катушки будет с некото-

рым запасом превышать значение I_o , гарантирующим сохранение их сцепления за счёт магнитных сил, в т. ч. при воздействии вибрации и ударов. В нормальных условиях применения этот запас можно оценить на уровне 20...25%, что согласно (2) [9] соответствует полуторакратной избыточности силы взаимного притяжения контактов. Таким образом, ток удержания целесообразно выбирать на уровне $I_y = (1,2...1,25) \times I_o$.

Оптимизация управления м.д.с. должна быть реализована так, чтобы достигался выигрыш по энергетике. При этом не должны проявляться какие-либо негативные эффекты, нивелирующие достоинства управления м.д.с. Ясно, что изменение значения тока в катушке с I_3 на I_y через время t_{zk} может быть осуществлено по схеме, содержащей как минимум таймер и твердотельный переключатель, но такое решение ведёт к снижению надёжности и стоит намного больше, чем катушка и геркон. Для разрешения данного противоречия следует учесть, что в ходе сближения контактов ток может меняться во времени, как это, например, показано на рисунке 2в, когда он был отключён ещё до их первого касания. С учётом этого для управления м.д.с. может быть использована сравнительно простая

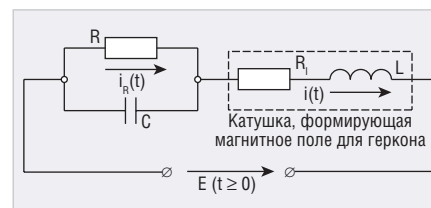


Рис. 9. Простая схема для управления м.д.с. катушки геркона

схема, представленная на рисунке 9. В этой схеме использован необходимый минимум элементов, причём резистор R , задаёт активное сопротивление катушки геркона с индуктивностью L .

Используя операторный метод расчёта переходных процессов [5], можно показать, что при внезапном приложении напряжения E к такой цепи ток в катушке будет определяться уравнением вида (5). Можно считать, что рассматриваемая цепь характеризуется двумя постоянными времени – индуктивной τ_L и ёмкостной τ_C . Условие $i(t) > I_3$ должно выполняться в течение времени, исчисляемого единицами и десятками миллисекунд, что должно быть обеспечено значительной ёмкостью конденсатора C , причём $\tau_C = C \times R \times R_l / (R + R_l)$. С другой стороны, значение L при отсутствии в катушке магнитопровода оказывается малым, порядка $10^{-5}...10^{-4}$ Гн, и поэтому при характерных значениях параметров цепи $\tau_C \gg \tau_L$. Это позволяет перейти к существенно более простому, но приближённому уравнению вида:

$$i(t) = I_y + (I_n - I_y) \exp(-t / \tau_C), \quad (6)$$

где $I_n = E/R_l$ – пиковое значение тока в катушке без учёта инерционности его нарастания; $I_y = E/(R + R_l)$.

На основе уравнения (6) могут быть оценены номиналы элементов в схеме на рисунке 9. Если в процессе срабатывания геркона условие $I_3 = (1,1...1,2) \times I_c$ выполняется, то, как это было показано в эксперименте, после достижения времени t_{mk} контакты претерпевают отскоки и повторные соударения. Однако за счёт пониженной скорости первого соударения этот процесс длится не более $0,4 \times t_{mk}$, т. е. $t_{zk} \approx 1,4 \times t_{mk}$. В ходе таких соударений на контакты действуют силы вза-

$$i(t) = E \times \left(\frac{1}{R + R_l} + \left(\frac{2}{D \times L \times C \times R - \sqrt{D} \times (C \times R \times R_l + L)} + \frac{1}{L \times \sqrt{D}} \right) \exp(-at) - \left(\frac{2}{D \times L \times C \times R + \sqrt{D} \times (C \times R \times R_l + L)} + \frac{1}{L \times \sqrt{D}} \right) \exp(-b \times t) \right),$$

где $D = \left(\frac{C \times R \times R_l + L}{L \times C \times R} \right)^2 - 4 \frac{R + R_l}{L \times C \times R}$; $a = \frac{1}{2} \times \frac{C \times R \times R_l + L}{L \times C \times R} - \frac{1}{2} \times \sqrt{D}$; $b = \frac{1}{2} \times \frac{C \times R \times R_l + L}{L \times C \times R} + \frac{1}{2} \times \sqrt{D}$. (5)

имного магнитного притяжения, а сами контакты не расходятся на значительное расстояние. В связи с этим логично потребовать выполнения условия $i(t) \geq I_3$ при $0 \leq t \leq t_{нк}$. Однако это условие оказывается избыточным и приводит к увеличению скорости первого соударения и, соответственно, количества отскоков, поскольку контакты, как следует из формулы (6), в начальный момент времени подвергаются действию силы импульсного характера, предающей им избыточную скорость.

Если считать, что соответствующие друг другу значения $t_{нк}$ и $I_3 = (1, 1 \dots 1, 2) \times I_c$ были определены на основе эксперимента, то следует потребовать выполнения условия:

$$\int_0^{t_{нк}} (i(t))^2 dt = I_3^2 \times t_{нк},$$

откуда с учётом (6) получаем формулу (7).

Результаты моделирования показывают, что в типовом случае $t_{нк} \sim 5$, и без значимого ущерба для точности можно, подставляя выражения для I_n и I_y , получить следующую оценку значения τ_c (см. формулу (8)).

Значение R_l определяется собственными свойствами катушки, создающей магнитное поле для геркона, значение E обычно определено свойствами источника электропитания. Подставляя выбранное значение R в формулу, можно получить необходимое значение ёмкости C (см. формулу (9)).

Номиналы C и R в схеме на рисунке 9 следует выбирать из стандартных рядов таким образом, чтобы значение постоянной времени было не менее рассчитанного по формуле (8). Если вернуться к гипотетическому геркону, для которого выше проводилось моделирование, то исходными данными для расчёта параметров цепи будут значения $I_c = 0,803$ А, $I_3 = 0,9$ А, $t_{нк} = 6,88$ мс, $R_l = 1$ Ом (поскольку при малом количестве витков обмоточный провод не будет иметь значительного сопротивления), $E = 2,4$ В, $I_3/I_y = 2$. Согласно результатам расчётов, $R = 4,33$ Ом, $\tau_c = 1,143$ мс, $C = 1409$ мкФ. Переходя к стандартным значениям, следует принять $R = 4,3$ Ом, $C = 1500$ мкФ, тогда $\tau_c = 1,137$ мс.

Оценка энергетической эффективности управления м.д.с. в устройствах на основе герконов

Исследуя управление м.д.с., нельзя обойти стороной и вопрос повышения энергетической эффективности, кото-

$$I_y^2 \times t_{нк} + 2 \times \tau_c \times I_n \times (I_n - I_y) \times (1 - \exp(-t_{нк}/\tau_c)) + 0,5 \times \tau_c \times (I_n - I_y)^2 (1 - \exp(-2 \times t_{нк}/\tau_c)) = I_3^2 \times t_{нк} \quad (7)$$

$$\tau_c = R_l^2 \times \frac{I_3^2 \times t_{нк} \times (R + R_l)^2 - E^2}{E^2 \times R \times (2 \times R_l + 0,5 \times R)} \quad (8)$$

$$C = R_l \times \frac{I_3^2 \times t_{нк} \times (R + R_l)^2 - E^2}{E^2 \times R^2 \times (2 \times R_l + 0,5 \times R)} \times (R + R_l) \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{R_l \times I_3^2 \times t}{R_l \times \int_0^t (i(t))^2 dt + R \times \int_0^t (i_R(t))^2 dt} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{R_l \times W^2}{(R_l + R) + (0,5 \times \tau_c \times R \times (1 - \exp(-2t/\tau_c)))/(t \times R)} \quad (11)$$

рую можно охарактеризовать параметром α , равным отношению тепловых энергий, за равное время рассеянных в катушке с сопротивлением R_l и в схеме на рисунке 9 (см. формулу (10)), где ток через сопротивление R , согласно упрощённому уравнению (6), составляет:

$$i_R(t) = \frac{E}{R + R_l} \times (1 - \exp(-t/\tau_c)).$$

Введём параметр $W = I_3/I_y$. Опуская элементарные, но громоздкие преобразования, можно привести уравнение (10) к виду (11).

Полагая, что время пребывания контактов геркона в замкнутом состоянии значительно превышает длительность его включения, рассмотрим предел $\alpha_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} (\alpha)$. В этом случае предельная оценка выигрыша по энергетике составит $\alpha_0 = W^2 \times R_l / (R + R_l)$. Для герконов типовой конструкции обычно $W = 1, 2 \dots 5$, и, например, при $R = R_l$ повышение энергетической эффективности за счёт снижения тока в катушке может составить около одного порядка.

Заключение

Таким образом, измерения, результаты которых были представлены выше, подтвердили состоятельность модели сближения контактов геркона до первого соударения, и эта модель может быть использована для оценочного сопоставления режимов срабатывания. При этом должны учитываться ограничения по области её адекватности.

Разумный подход к управлению формированием магнитного поля позволяет создать оптимальные условия для работы контактных пар в составе герконов, что способствует повышению ресурса по количеству срабатываний в 2...3 и более раз. Для достижения такого результата

в соответствии с продемонстрированным выше подходом необходимо провести несложные исследования с помощью средств с реализованной функцией автоматических измерений. Выбор оптимального тока в катушке также соответствует повышению энергетической эффективности узлов на основе герконов.

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.chipdir.ru (дата обращения 30.10.19).
8. Техническое описание к герконам марки КЭМ. Интернет-ресурс www.chipdir.ru (дата обращения 20.11.19).
9. Лемешко Н., Струнин П. Повышение ресурса герконов за счёт оптимизации воздействующей магнитодвижущей силы. Часть 1. Современная электроника. 2020. № 2.

