

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ ЗАМЫКАЮЩИХ ГЕРКОНОВ

*В.Н. Шоффа, д.т.н., Б.Д. Лебедев, магистр
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14
Московский энергетический институт (Технический университет)*

Представлены методика и алгоритм, положенные в основу новой программы Gersim II (среда Delphi) для автоматизированного проектирования симметричных язычковых замыкающих герконов, позволяющей разрабатывать эти приборы либо на наибольшую чувствительность, либо на наибольшую силу контактного нажатия.

Methods and algorithm taken as a basis of a new Program Gersim II (Delphi medium) for the automatized designing of symmetric normally open reed switches, which allows to develop these devices either for the maximal sensitivity or for the maximal contact force, have been considered.

1. Введение

Несмотря на простоту конструкции, проектирование герконов связано с достаточно сложными и длительными расчетами. На кафедре электрических и электронных аппаратов МЭИ был разработан ряд программ (Gerkon [1], Gerkon 2 [2] и Gersim [3]) для автоматизированного проектирования симметричных замыкающих герконов. Эти программы ориентированы на проектирование герконов с длиной баллона, определяемой рядом 10, 15, 20, 27, 36 и 50 мм, что было сделано согласно ГОСТу [4], действующему во время разработки этих программ и отмененному к настоящему времени. Проектирование осуществлялось с решением задачи получения наибольшей чувствительности по срабатыванию.

С момента отмены указанного ГОСТа появилась возможность удовлетворить потребность заказчиков по расширению ряда длин баллона герконов как внутри, так и вне указанного диапазона. Так, например, появилась потребность в разработке субминиатюрных герконов с длиной баллона 7, 6 и даже 5 мм.

Все это, а также новые задачи, связанные с разработкой миниатюрных и субминиатюрных герконов, явились основанием для внесения коррекций в методику, алгоритм, базу данных и программу проектирования.

Так, например, в новой программе по желанию оператора реализуется возможность проектирования герконов либо на наибольшую чувствительность, либо на наибольшую силу контактного нажатия. Последнее наиболее актуально для миниатюрных и сверхминиатюрных приборов.

Вместо ряда значений длин герконов, регламентируемого отмененным ГОСТом, в базу данных введен новый (более широкий) ряд длин, используемых Рязанским заводом металлокерамических приборов и зарубежными производителями.

В связи с тем, что была поставлена задача проектирования миниатюрных и субминиатюрных герконов, в базу данных были добавлены еще несколько меньших значений диаметров ферромагнитной проволоки, используемой для изготовления этих приборов.

Еще одним из недостатков существующих программ являлось немедленное прекращение расчетов с потерей предыдущих расчетных данных при ошибках ввода (например, при опечатке). В новой программе этот недостаток устранен, и появилась возможность редактирования данных на разных этапах проектирования.

2. Основные виды проектируемых герконов, их функциональные параметры и схема магнитной цепи при управлении обмоткой

Наиболее распространенные конструкции симметричных замыкающих герконов и их основные размеры показаны на рис. 1. Детали геркона, реализующие функции контактов и участков электрической и магнитной цепей, называются контактными сердечниками (КС).

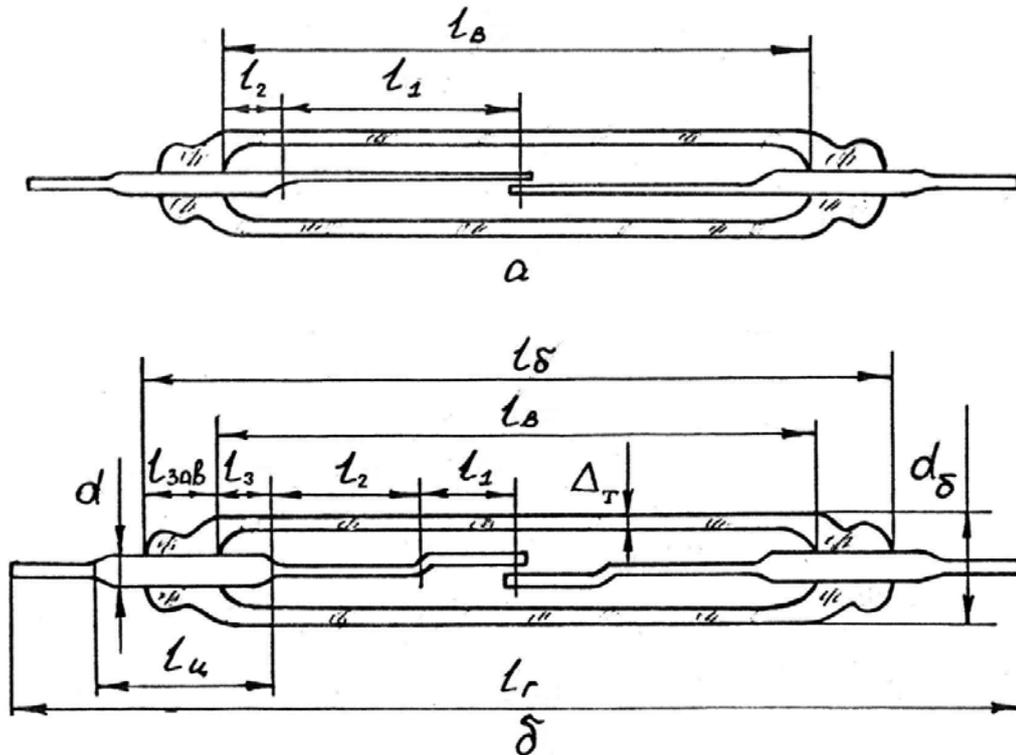


Рис. 1. Основные размеры геркона:
а) внутренняя часть КС с двумя участками; б) внутренняя часть КС с тремя участками

На рис. 2 указаны размеры КС в зоне их перекрытия в разомкнутом и замкнутом состояниях. На этом рисунке: b - ширина КС; h - толщина КС; a - перекрытие КС; δ_p - раствор КС; δ_H - начальный зазор; δ_K - конечный зазор; Δ_K - толщина контактного покрытия.

При отсутствии магнитного поля перекрывающиеся концы КС отдалены друг от друга в области перекрытия на начальный немагнитный рабочий зазор δ_H .

При воздействии магнитного поля, создаваемого обмоткой управления, между КС возникает электромагнитная сила $P_Э$, которая, преодолевая механическую противодействующую силу упругости P_{MX} КС, приближает перекрывающиеся концы друг к другу. При определенном значении поля КС замыкаются.

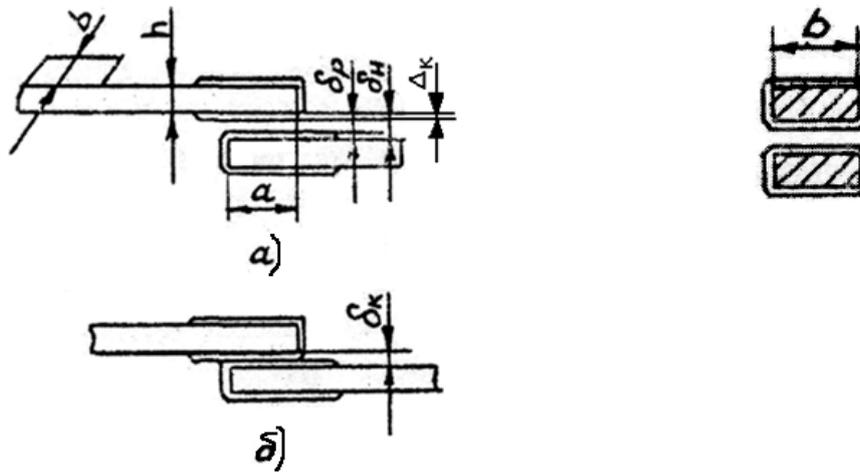


Рис. 2. Размеры контактных сердечников в зоне их перекрытия в разомкнутом (а) и замкнутом состояниях (б)

На рис. 3 приведены механическая противодействующая и тяговые характеристики, соответствующие четырем значениям МДС: МДС отпускания (F_0), МДС срабатывания (F_C), рабочей МДС (F_p) и одному промежуточному значению (F_1) между F_C и F_0 .

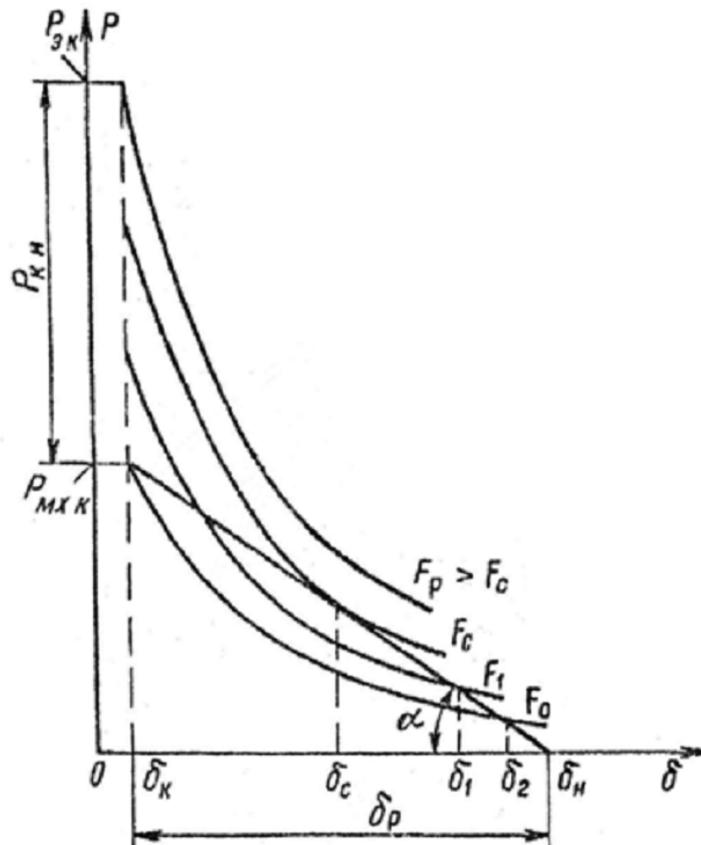


Рис. 3. Тяговые и механическая противодействующая характеристики герконового реле

При увеличении МДС обмотки от нуля, например, до значения F_1 , расстояние между КС уменьшается от значения δ_H до δ_1 . Контактные сердечники при этом находятся в устойчивом состоянии, в котором действующая на них электромагнитная сила равна их противодействующей силе.

При дальнейшем медленном увеличении МДС КС постепенно сближаются до зазора срабатывания δ_C , соответствующего МДС срабатывания реле. Значение δ_C определяется точкой касания противодействующей характеристики с тяговой характеристикой при F_C .

При достижении F_C КС быстро переходят к своему замкнутому состоянию при конечном зазоре δ_K , определяемом суммой двух контактных покрытий ($2 \cdot \Delta_K$) и неплотностью прилегания КС (Δ_H):

$$\delta_K = 2 \cdot \Delta_K + \Delta_H, \quad (1)$$

значение начального зазора:

$$\delta_H = \delta_K + \delta_P. \quad (2)$$

При уменьшении МДС до значения F_O КС размыкаются. Отношение МДС отпущения к МДС срабатывания представляет собой коэффициент возврата реле

$$K_B = \frac{F_O}{F_C}. \quad (3)$$

В замкнутом положении при МДС больше F_O между КС имеется контактное нажатие

$$P_{K.H} = P_{Э.К} - P_{МХ.К}, \quad (4)$$

где $P_{Э.К}$ и $P_{МХ.К}$ – соответственно, электромагнитная и механическая силы при δ_K .

Как и в любых электромагнитных устройствах для анализа работы реле на герконах и их проектирования необходимо знать характер распределения магнитного поля в этих аппаратах [5].

На картине поля, изображенной на рис. 4 при пренебрежении магнитным сопротивлением КС, приведены граничные линии магнитной индукции – сепаратрисы (сплошные линии). Линии нулевой работы (градиентные линии) показаны пунктиром и даны только для магнитных потенциалов φ_{M1} и φ_{M2} , соответствующих КС1 и КС2.

Для рассматриваемой магнитной системы характерны следующие магнитные потоки: Φ_δ – поток в рабочем зазоре (этот поток входит в КС1 с левой его стороны в пределах зон АС и Ап', проходит через рабочий зазор δ и выходит из КС2 с его правой стороны в зонах мА' и С'А'); Φ_{dC1} , Φ_{dC2} – потоки рассеяния, проходящие только по одному из КС; Φ_{dB1} , Φ_{dB2} – потоки рассеяния, замыкающиеся только по воздуху.

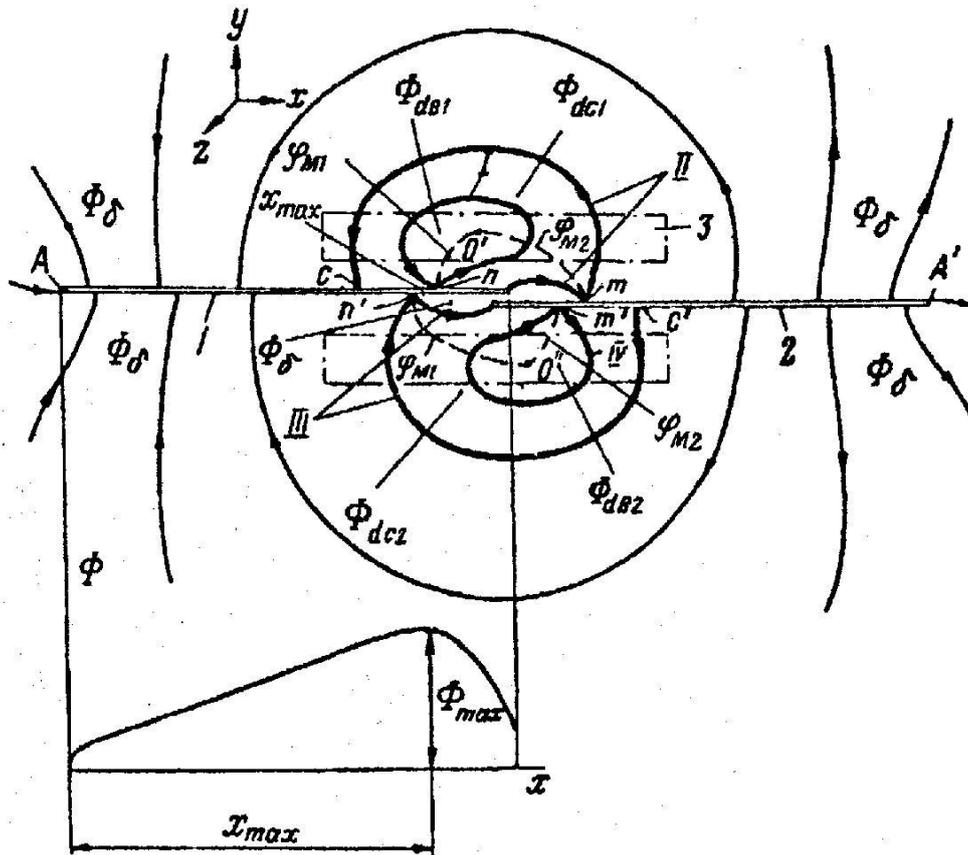


Рис. 4. Картина магнитного поля герконового реле: 1 и 2 – контактные сердечники; 3 – обмотка

По картине поля можно судить о характере распределения потока вдоль КС. На рис. 4 приведена кривая распределения магнитного потока вдоль КС1.

В первом приближении, считая, что сечения, характеризуемые точками n и n' , близки друг к другу, максимальный поток в КС можно выражать как

$$\Phi_{\max} = \Phi_{\delta} + \Phi_{dc}. \quad (5)$$

Суммарный магнитный поток всей системы

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\delta} + 2 \cdot (\Phi_{db} + \Phi_{dc}). \quad (6)$$

По картине поля, пренебрегая магнитным сопротивлением КС, можно составить упрощенную схему замещения магнитной цепи реле (рис. 5), где $R_{M.BT}$ – магнитное сопротивление внутреннего участка цепи (на пути прохождения потока Φ_{δ} между внутренними участками КС); $R_{M.ВШ}$ – приведенное к полным виткам обмотки магнитное сопротивление внешнего участка цепи (на пути прохождения потока Φ_{δ} между внешними участками КС); R_{Mdc} – приведенное к полным виткам обмотки магнитное сопротивление на пути прохождения потока Φ_{dc} ; R_{Mdb} – приведенное к полным виткам обмотки магнитное сопротивление на пути прохождения потока Φ_{db} .

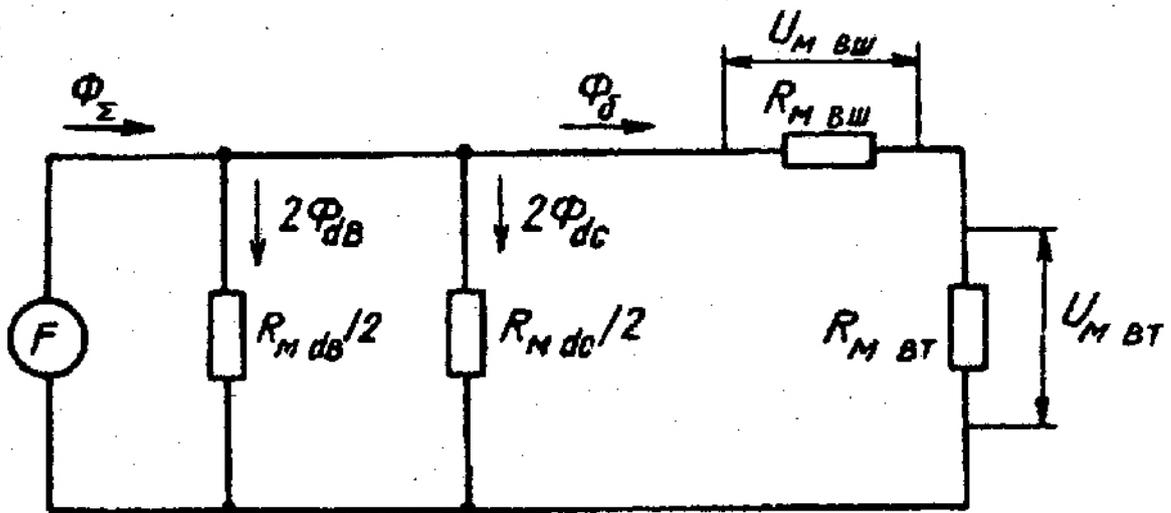


Рис. 5. Схема замещения магнитной цепи герконового реле без учета магнитного сопротивления КС

Согласно рис. 5:

$$R_{M.BT} = \frac{U_{M.BT}}{\Phi_{\delta}}, \quad (7)$$

где $U_{M.BT}$ – разность магнитных потенциалов между КС,

$$R_{M.BШ} = \frac{(F - U_{M.BT})}{\Phi_{\delta}}, \quad (8)$$

где F – МДС обмотки. Магнитным сопротивлениям $R_{M.BT}$ и $R_{M.BШ}$ соответствуют значения магнитных проводимостей Λ_{BT} и $\Lambda_{BШ}$. Значения Λ_{BT} и $\Lambda_{BШ}$ зависят от размеров обмотки и контактных сердечников.

Зазор срабатывания (рис. 3) можно определить из соотношения [6]:

$$\delta_C = \delta_H \frac{(3\Lambda_{BШ} + \Lambda_{BT})}{(5\Lambda_{BШ} + 3\Lambda_{BT})}, \quad (9)$$

где Λ_{BT} рассчитывается при $\delta = \delta_C$.

Относительный зазор срабатывания

$$\delta_C^* = \frac{(3\Lambda_{BШ} + \Lambda_{BT})}{(5\Lambda_{BШ} + 3\Lambda_{BT})}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что при допущении $\Lambda_{BH} = const$ $\delta_C^* \rightarrow \frac{1}{3}$ для $\Lambda_{BШ} \rightarrow 0$ и $\delta_C^* \rightarrow 0,6$ для $\Lambda_{BШ} \rightarrow \infty$ [7].

3. Методика проектирования

Задаются значения величин:

сила контактного нажатия (рис. 3), $P_{K.H}$;

противодействующая механическая сила (рис. 3), $P_{MX.K}$;

резонансная частота (частота первого тона собственных колебаний разомкнутого КС), f_{1p} ;

раствор контактов (рис. 2, 3), δ_p ;
толщина контактного покрытия (рис. 2), Δ_K ;
неплотность прилегания контактирующих поверхностей, Δ_H ;
максимальная ширина КС в области их перекрытия, b_{\max} ;
минимальная ширина КС в области их перекрытия, b_{\min} ;
максимальное перекрытие КС, a_{\max} ;
минимальное перекрытие КС, a_{\min} ;
марка материала КС;
форма выводов КС.

Определяются значения величин:

ширина КС в области их перекрытия, b_1 ;
толщина КС в области их перекрытия, h_1 ;
перекрытие КС (рис. 2), a ;
диаметр проволоки для изготовления КС (рис. 1), d ;
длина геркона (рис. 1), l_G ;
длина баллона (рис. 1), l_B ;
диаметр баллона (рис. 1), d_B ;
длина заварки КС в баллон (рис. 1), l_{3AB} ;
толщина стекла трубки для изготовления баллона (рис. 1), Δ_T ;
длина первого участка КС (рис. 1), l_1 ;
длина второго участка КС (рис. 1), l_2 ;
длина третьего участка КС (рис. 1), l_3 ;
ширина второго участка КС (рис. 1, 2), b_2 ;
толщина второго участка КС (рис. 1, 2), h_2 ;
начальный зазор (рис. 2, 3), δ_H ;
расчетная сила контактного нажатия, $P_{K.H}$;
расчетная резонансная частота, f_{1P} ;
МДС срабатывания геркона, F_{CP} ;
МДС отпускания геркона, F_O ;
коэффициента возврата, K_B .

4. Этапы проектирования

1. В зависимости от выбранного материала КС задаемся значением максимальной магнитной индукции B_M , которая в замкнутых КС при рабочей МДС примерно равна индукции технического насыщения ($B_M \approx B_S$). Значение B_S принимаем равным 1,5 Тл.

Из условия $b_{\min} \leq b \leq b_{\max}$, где b_{\min} и b_{\max} – соответственно, задаваемые минимальное и максимальное допустимые значения ширины КС в области перекрытия a , выбираем ширину КС b .

По заданной силе контактного нажатия $P_{K.H}$ и максимальному противодействующему усилию $P_{MX.K}$ находим электромагнитную силу $P_{Э.К}$, действующую на КС при конечном зазоре

$$P_{Э.К} = P_{K.H} + P_{MX.K} . \quad (11)$$

Находим толщину КС h в области перекрытия [1, 8] при условии выбора оптимального (по чувствительности $a^* = 2.1$ или по силе контактного нажатия $a^* = 1$, где $a^* = a/h$ [9])

перекрытия КС:

$$h = \frac{8\pi P_{\text{Э.К}}(a^*b + K_2\delta_K) + \sqrt{64\pi^2 P_{\text{Э.К}}(a^*b + K_2\delta_K)^2 + 32 \cdot 10^7 \pi K_1 B_M^2 b^3 \delta_K P_{\text{Э.К}}}}{2 \cdot 10^7 B_M^2 b^2}, \quad (12)$$

где $\delta_K = 2\Delta_K$ (Δ_K – толщина контактного покрытия) при проектировании на наибольшую чувствительность, $\delta_K = 2\Delta_K + \Delta_H$ при проектировании на наибольшую силу контактного нажатия; $K_1 = 6,66$ и $K_2 = 4,44$ – постоянные коэффициенты [10]; $B_M = B_S$.

2. Находим перекрытие сердечников a

$$a = a^* h. \quad (13)$$

Найденное значение a должно удовлетворять условию $a_{\min} \leq a \leq a_{\max}$. Если это условие не выполняется, необходимо принять новое значение ширины КС b (большее, если $a > a_{\max}$ и меньшее, если $a < a_{\min}$) и определить новые значения h и a . Выход значений b и a за границы допустимых диапазонов приводит к повышению разброса параметров геркона (МДС срабатывания и отпускания, коэффициент возврата и др.), а также может снизить его износостойкость.

3. Определяем площадь поперечного сечения КС $Q = b \cdot h$. Находим диаметр проволоки, предназначенной для изготовления КС

$$d = 2\sqrt{\frac{Q}{\pi}}. \quad (14)$$

Полученное значение d округляем до ближайшего значения из табл. 1.

Таблица 1

Диаметры проволок для изготовления КС, мм

0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4
------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

После округления d определяем новое значение

$$Q = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (15)$$

a из выражений

$$h = \frac{Q}{b} \quad (16)$$

и (13) получаем уточненные значения, соответственно, h и a . Необходимо помнить, что при коррекции параметров d и h может произойти выход за границы допустимых диапазонов значения a . Если избежать этого не удастся, то дальнейший расчет возможен только при изменении исходных данных.

4. Рассчитываем начальный зазор

$$\delta_H = \delta_P + 2\Delta_K + \Delta_H. \quad (17)$$

По заданным значениям $P_{\text{МХ.К}}$ и δ_P находим приведенную жесткость КС

$$C_{\text{П}} = \frac{P_{\text{МХ.К}}}{\delta_P}. \quad (18)$$

5. Вычисляем значение предельного начального рабочего зазора [11]:

$$\delta_{\text{Н.П}} = \frac{3}{2} \left[\Delta_H - \frac{a}{K_1 + K_2 \frac{h}{b}} + \sqrt{\left(\frac{a}{K_1 + K_2 \frac{h}{b}} - \Delta_H \right)^2 + \frac{K_S^2 B_S^2 Q^2}{\mu_0 C_{\text{П}} b \left(K_1 + K_2 \frac{h}{b} \right)}} \right], \quad (19)$$

где $K_s \approx 1,05$ – коэффициент, учитывающий возможность срабатывания геркона при магнитной индукции, превышающей значение B_s ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Если $\delta_{H.П} < 1,3 \cdot \delta_H$, то необходимо, используя табл. 1, перейти на большее значение диаметра d , произвести коррекцию значений величин Q , h , a и заново рассчитать $\delta_{H.П}$, сопоставив его с δ_H . Выход параметра a за диапазон ($a_{\min} \div a_{\max}$) на данном этапе также не допустим.

6. Определим силу контактного нажатия $P_{K.H}$ спроектированного геркона [1]

$$P_{K.H} = \frac{10^7 B_M^2 b_1^2 h_1^2}{8\pi [(a^* b_1 + K_2 \delta_K) h_1 + K_1 b_1 \delta_K]} - P_{M.K} \quad (20)$$

и сопоставим ее с заданным значением.

Оценим расхождение между реальной и заданной силами $P_{K.H}$. Если полученное расхождение будет нас удовлетворять, то продолжаем расчет геркона. В противном случае необходимо или вернуться к п. 3 и значение d округлить в сторону увеличения согласно табл. 1, или изменить исходные данные.

7. Определяем эквивалентный диаметр выводов $d_{\text{э}}$.

Для цилиндрического сечения $d_{\text{э}} = d$, а для прямоугольного

$$d_{\text{э}} = \frac{2(b_B + h_B)}{\pi}, \quad (21)$$

где b_B и h_B – соответственно, ширина и толщина выводов КС, причем $b_B \cdot h_B = Q$

8. Принимаем зазор срабатывания равным $\delta_C = 0,475 \delta_H$ ($\delta_C^* = \frac{\delta_C}{\delta_H} = 0,475$). При дальнейшем расчете полученное значение корректируется.

9. Определяем внутреннюю магнитную проводимость Λ_{BT} , соответствующую зазору срабатывания δ_C , воспользовавшись формулой [1]

$$\Lambda_{BT} = \frac{\mu_0 b}{0,142 \left(1 - e^{-5,91 \delta / a} \right)}. \quad (22)$$

Формулу (22) можно использовать при $0,125 < \frac{h}{b} < 0,285$;

если $0,285 < \frac{h}{b} < 0,5$, то расчет Λ_{BT} необходимо проводить по [1]

$$\Lambda_{BT} = \frac{\mu_0 b}{\left(0,192 - 0,174 \frac{h}{b} \right) \left(1 - e^{-\left(4,45 + 5,13 \frac{h}{b} \right) \delta / a} \right)}. \quad (23)$$

При этом в формулы (22) и (23) необходимо подставить $\delta = \delta_C$.

Находим внешнюю магнитную проводимость

$$\Lambda_{BШ} = \Lambda_{BT} \frac{(3\delta_C - \delta_H)}{(3\delta_H - 5\delta_C)}. \quad (24)$$

10. Выбираем отношение среднего диаметра обмотки катушки управления d_{OB} к эквивалентному диаметру $d_{\text{э}}$ поперечного сечения КС и отношение длины геркона l_{Γ} к длине обмотки катушки управления l_{OB} . Установлено, что наиболее целесообразными являются отношения $\frac{d_{OB}}{d_{\text{э}}} = 5 \div 7$ и $\frac{l_{\Gamma}}{l_{OB}} \approx 1,5 \div 2,5$.

11. Используя формулу [1]

$$\Lambda_{BШ} = \mu_0 l_{\Gamma} \frac{1,321 - 0,068 \cdot \left(\frac{l_{\Gamma}}{l_{OB}}\right)^2 + 0,345 \cdot \left(\frac{l_{\Gamma}}{l_{OB}}\right) - 0,104 \cdot \left(\frac{d_{OB}}{d_{\text{э}}}\right)}{\left(\frac{l_{\Gamma}}{d_{\text{э}}}\right)^{\left[0,48 - 0,029 \left(\frac{l_{\Gamma}}{l_{OB}}\right) - 0,0225 \left(\frac{d_{OB}}{d_{\text{э}}}\right)\right]}}, \quad (25)$$

после преобразований получим выражение, по которому определим длину геркона [1]

$$l_{\Gamma} = \left(\frac{\mu_0 d_{\text{э}}^R \cdot S}{\Lambda_{BШ}} \right)^{\left(\frac{1}{R-1}\right)}, \quad (26)$$

$$\text{где } R = 0,48 - 0,029 \frac{l_{\Gamma}}{l_{OB}} - 0,0225 \frac{d_{OB}}{d_{\text{э}}};$$

$$S = 1,321 - 0,068 \left(\frac{l_{\Gamma}}{l_{OB}}\right)^2 + 0,345 \left(\frac{l_{\Gamma}}{l_{OB}}\right) - 0,104 \left(\frac{d_{OB}}{d_{\text{э}}}\right).$$

Округляем l_{Γ} до ближайшего допустимого значения из табл. 2.

Попробуем сначала решить задачу, приняв двухпрофильную форму выполнения КС внутри баллона (рис. 1,а).

В зависимости от полученного значения l_{Γ} из этой же таблицы выбираем длину баллона l_B , длину участков заварки баллона l_{3AB} и длину второго участка КС l_2 (рис. 1а).

Таблица 2

Сочетание габаритных и технологических размеров герконов

l_{Γ} , мм	35	36	37	40	42	44	46	50	57	66	80
l_B , мм	5 _{-0,4}	6 _{-0,5}	7 _{-0,6}	10 _{-0,6}	12 _{-0,6}	14 _{-1,0}	16 _{-1,0}	20 _{-1,5}	27 _{-1,5}	36 _{-1,5}	50 _{-2,0}
l_{3AB} , мм	0,5	0,6	0,8	0,85	0,9	1	1,2	1,5	2	3	4,5
l_2 , мм	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,32	0,35	0,4	0,5	0,7	1
d_B , мм	1,4 _{-0,05}	1,4 _{-0,05}	1,8 _{-0,1}	1,8 _{-0,1}	1,8 _{-0,1}	2,2 _{-0,1}	2,4 _{-0,1}	2,6 _{-0,1}	3,0 _{-0,1}	5,2 _{-0,2}	5,4 _{-0,2}
	-	1,8 _{-0,1}	2,0 _{-0,1}	2,0 _{-0,1}	2,0 _{-0,1}	2,3 _{-0,1}	2,6 _{-0,1}	2,8 _{-0,1}	3,3 _{-0,1}	5,4 _{-0,2}	5,6 _{-0,2}
	-	-	-	2,2 _{-0,1}	2,2 _{-0,1}	2,4 _{-0,1}	2,8 _{-0,1}	3,0 _{-0,1}	3,6 _{-0,15}	5,6 _{-0,2}	-
	-	-	-	-	-	-	3,0 _{-0,1}	3,3 _{-0,1}	4,0 _{-0,15}	-	-

Определяем длину внутренней части баллона

$$l_B = l_B - 2l_{3AB}. \quad (27)$$

12. Определяем жесткость C одного КС

$$C = 2C_{II}. \quad (28)$$

13. Из следующего выражения, в которое подставляем $b_1 = b$ и $h_1 = h$, находим длину l_1 первого участка КС [1]

$$C = \frac{E_1 b_1 h_1^3}{4l^3 \left\{ 1 + \frac{16 b_1 h_1^3}{3 \pi d^4} \left[\left(1 + \frac{l_2}{l_1} \right)^3 - 1 \right] \right\}}, \quad (29)$$

где E – модуль упругости материала, используемого для изготовления контактных сердечников.

При нахождении из (29) значения l_1 решается кубическое уравнение, корни которого можно найти, применив либо метод Кардано, либо тригонометрическую форму решения [12].

14. Рассчитываем частоту первого тока собственных колебаний f_{1P} разомкнутого КС без учета влияния участка длиной l_2 . С этой целью определим полную массу m подвижной части КС

$$m = \gamma \left(l_1 + \frac{a}{2} \right) bh, \quad (30)$$

где γ – плотность материала, используемого для изготовления КС, которая равна $8,25 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а затем – приведенную массу этой части КС

$$m_{II} = K_m \cdot m. \quad (31)$$

На этом этапе расчета в формуле (31) принимаем $K_m = 0,24$.

Зная m_{II} , определяем [1]

$$f_{1P} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ck^3}{m_{II}}}, \quad (32)$$

здесь

$$k = 2l_1(2l_1 + a)^{-1}. \quad (33)$$

15. Выбираем диаметр баллона d_B . Как видно из табл. 2, почти для всех значений l_T допустимы несколько значений d_B . На данном этапе расчета геркона рекомендуется выбрать наименьшую величину d_B .

16. Определим длину внутренней части баллона через l_1 и l_2 как

$$l'_B = 2(l_1 + l_2). \quad (34)$$

17. Сопоставляем расчетное f_{1P} и заданное f_{13} значения частоты собственных колебаний КС, а также длины внутренних частей баллона, рассчитанных по (27) и (34). При этом возможен один из следующих вариантов.

Вариант 1.

$$f_{1P} \geq f_{13}; l_B \approx l'_B$$

В этом случае расчет размеров внутренней части КС считается законченным.

Вариант 2.

$$f_{1P} < f_{13}; l_B < l'_B$$

Это сочетание значений для удовлетворения условий первого варианта требует увеличения числа участков внутри баллона при неизменной длине внутренней части баллона ($l_B = \text{const}$), причем новый (третий) участок должен иметь меньший по сравнению с участком 1 момент инерции, т.е. должен быть более плоским. Переходим к расчету трехпрофильного варианта выполнения КС (рис.1,б). Коррекцию размеров внутренней части КС рекомендуется проводить следующим образом. Принимаем длину третьего участка КС l_3 равной длине l_2 , найденной в п.11. Выбираем новое значение l_1 длины первого участка КС, учитывая что

$$l_1 + l_2 = \frac{(l_B - 2l_3)}{2}. \quad (35)$$

Ширину и толщину первого участка оставим прежней, т.е. $b_1 = b$ и $h_1 = h$. Ширину нового участка КС b_2 найдем из выражения [1]

$$b_2 = \sqrt{\frac{(\pi d^2)^3 \left\{ \frac{Eb_1 h_1^3}{4l_1^3 C} - \frac{16 b_1 h_1^3}{3 \pi d^4} \left[\left(1 + \frac{l_2 + l_3}{l_1}\right)^3 - \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^3 \right] - 1 \right\}}{b_1 (4h_1)^3 \left[\left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^3 - 1 \right]}}, \quad (36)$$

полученного путем преобразования формулы для расчета жесткости КС, имеющего три участка, из которых два первых имеют прямоугольные поперечные сечения, а третий – круглое сечение с диаметром d (рис.1,б).

Толщину второго участка определим по формуле

$$h_2 = \frac{\pi d^4}{4b_2}. \quad (37)$$

Найденные значения b_2 и h_2 должны удовлетворять условию возможности размещения КС в баллоне в их разомкнутом состоянии ($\delta = \delta_H$) [1]

$$\frac{b_2}{2} < \sqrt{\left(\frac{d_B}{2} - \Delta_T\right)^2 - \left(\frac{\delta_H}{2} + h_2\right)^2}, \quad (38)$$

где Δ_T – толщина стенки стеклянной трубки для баллона; значение Δ_T для различных марок стекла выбирается из табл. 3, учитывая, что диаметр трубки d_T равен диаметру баллона d_B .

Таблица 3

Параметры стеклотрубок

d_T , мм	1,4 _{-0,05}	(1,6;1,8;2,0;2,2;2,3) _{-0,1}	(2,4;2,6;2,8) _{-0,1}	(3,0;3,3) _{-0,1}	(3,6;4,0) _{-0,15}	(5,0;5,1;5,4;5,6) _{-0,2}
Δ_T , мм	0,2 _{-0,025}	0,25 _{-0,05}	0,35 _{-0,05}	0,45 _{-0,05}	0,6 _{-0,15}	0,6 _{-0,15} , 0,8 _{-0,2}

В том случае, если ни одно значение b_2 не будет удовлетворять условию (38), необходимо, согласно табл. 2, увеличивать диаметр баллона d_B и повторять расчет параметров нового участка КС.

По формуле (32) рассчитываем f_{1P} для новой конфигурации КС. При этом коэффициент k принимаем равным единице; полная масса (при пренебрежении незначительной массой третьего участка) находится из выражения

$$m = \gamma \left[\left(l_1 + \frac{a}{2} \right) b_1 h_1 + l_2 b_2 h_2 \right], \quad (39)$$

а при определении приведенной массы m_{II} по формуле (31) коэффициент K_m определяется как [1]

$$K_m = 0,24 K_C / K_f^2. \quad (40)$$

Здесь

$$K_C = \frac{K_J}{[K_J + K_i^3(1 - K_J)]}, \quad (41)$$

$$K_f^2 = \frac{26K_J [K_J + K_i^5(1 - K_J)]}{26K_J^2 + (K_J - 1)[K_J(25K_i^9 + 30K_i^6 - 81K_i^5) - 26K_i^9]}, \quad (42)$$

где

$$K_i = \frac{l_1 + \frac{a}{2}}{l_1 + l_2 + \frac{a}{2}}, \quad (43)$$

$$K_J = \frac{b_1}{b_2} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^3. \quad (44)$$

Коррекцию размеров внутренней части КС по методике, изложенной в этом пункте, проводят до тех пор, пока не будет выполняться условие первого варианта.

Вариант 3.

$$f_{1P} < f_{13}; l_B \approx l'_B$$

В этом случае в соответствии с табл. 2 необходимо уменьшить длину геркона и баллона и по (27) рассчитать новое значение l_B . Затем увеличиваем число участков КС до трех и расчет проводим по аналогии с вариантом 2.

Вариант 4.

$$f_{1P} < f_{13}; l_B > l'_B.$$

Для такого сочетания необходимо уменьшить длины геркона и баллона так, чтобы выполнялись условия второго или третьего вариантов. Далее задача решается по одному из этих вариантов.

Вариант 5.

$$f_{1P} < f_{13}; l_B < l'_B$$

При таком результате необходимо увеличить длины геркона и баллона. Если после этого будут выполняться условия варианта 1, то расчет геометрических параметров геркона заканчивается. В противном случае увеличиваем число участков, и расчет проводится по второму варианту.

Вариант 6.

$$f_{1P} > f_{13}; l_B > l'_B$$

В этом случае необходимо уменьшить длины l_G , l_B и l_B так, чтобы удовлетворялись условия вариантов 1 или 5. Если на первом или последующих этапах уменьшения l_G и l_B удовлетворяются условия варианта 1, расчет заканчивается. Если условия варианта 1 не удовлетворяются, но создаются условия варианта 5, то нужно остановиться на последних полученных значениях l_G , l_B , l_B и увеличить число участков с двух до трех.

18. Как следует из анализа вариантов 2-6, в ряде случаев необходимо изменять общую длину геркона l_G , что влечет за собой изменение внешней магнитной проводимости $\Lambda_{вщ}$. Однако такое влияние можно скомпенсировать, меняя профиль поперечного сечения выводов, если их форма специально не оговорена в техническом задании на геркон. Так, если ранее была принята прямоугольная форма выводов и в процессе выполнения п. 17 потребовалось увеличение l_G , то величину $\Lambda_{вщ}$ можно поддержать неизменной за счет перехода к круглой форме поперечного сечения КС, так как в этом случае уменьшится эквивалентный диаметр $d_{\text{э}}$. И наоборот, если ранее предполагалось иметь цилиндрические выводы и выяснилась необходимость сократить суммарную длину геркона, то для

поддерживания постоянной $\Lambda_{ВШ}$ можно перейти к прямоугольной форме выводов.

Если изменение формы выводов нежелательно или оно не приводит к постоянству $\Lambda_{ВШ}$, то необходимо провести расчет внешней проводимости $\Lambda_{ВШ}$ для нового значения $l_{Г}$ по формуле (25). При этом возможны два случая [13].

Случай 1.

Если $\Lambda_{ВШ}$ получается больше, чем при начальных расчетах, необходимо увеличить δ_C^* , определить новое значение $\delta_C = \delta_C^* \cdot \delta_H$ и провести расчет $\Lambda_{ВТ}$ по (22) в случае $0,125 < \frac{h}{b} < 0,285$ или по (23) в случае $0,285 < \frac{h}{b} < 0,5$.

Из (24) получаем выражение для определения $\Lambda_{ВТ}$

$$\Lambda_{ВТ} = \Lambda_{ВШ} \frac{(3\delta_H - 5\delta_C)}{(3\delta_C - \delta_H)}. \quad (45)$$

Обозначаем $\Lambda_{ВТ}$ в формуле (45) как $\Lambda'_{ВТ}$ и произведем ее расчет. Сравниваем полученные результаты $\Lambda_{ВТ}$ и $\Lambda'_{ВТ}$. В случае, если $\Lambda_{ВТ} < \Lambda'_{ВТ}$, необходимо продолжить увеличение δ_C^* . Если $\Lambda_{ВТ} > \Lambda'_{ВТ}$, то δ_C^* необходимо уменьшить. Далее производим расчет $\Lambda_{ВТ}$ и $\Lambda'_{ВТ}$ заново до удовлетворения условию $\Lambda_{ВТ} \approx \Lambda'_{ВТ}$.

Случай 2.

Если $\Lambda_{ВШ}$ получается меньше чем при начальных расчетах, необходимо уменьшить δ_C^* и провести расчет $\Lambda_{ВТ}$ по (22) в случае $0,125 < \frac{h}{b} < 0,285$ или по (23) в случае $0,285 < \frac{h}{b} < 0,5$.

Производим расчет $\Lambda'_{ВТ}$ по (45). Сравниваем полученные результаты $\Lambda_{ВТ}$ и $\Lambda'_{ВТ}$. В случае, если $\Lambda_{ВТ} < \Lambda'_{ВТ}$, необходимо увеличить δ_C^* . Если $\Lambda_{ВТ} > \Lambda'_{ВТ}$, то необходимо продолжить уменьшение δ_C^* . Далее производим расчет $\Lambda_{ВТ}$ и $\Lambda'_{ВТ}$ заново до удовлетворения условию $\Lambda_{ВТ} \approx \Lambda'_{ВТ}$.

Надо заметить, что $0,33 < \delta_C^* < 0,6$.

19. В случае выполнения поперечного сечения выводов прямоугольной формы определим длину $l_{Ц}$ цилиндрического участка КС. Обычно $l_{Ц} = l_{ЗАВ} + 2l_2$.

20. Определим полную магнитную проводимость $\Lambda_{П.С}$, соответствующую зазору δ_C , уточненному в п.18, воспользовавшись формулой

$$\Lambda_{П} = \frac{\Lambda_{ВТ} \Lambda_{ВШ}}{\Lambda_{ВТ} + \Lambda_{ВШ}}, \quad (46)$$

где внутренняя магнитная проводимость $\Lambda_{ВТ}$ рассчитывается для зазора δ_C .

21. Найдем электромагнитную силу при $\delta = \delta_C$

$$P_{Э.С} = C_{П}(\delta_H - \delta_C). \quad (47)$$

Определим максимальную магнитную индукцию $B_{М.С}$ в КС при зазоре срабатывания [1]

$$B_{М.С} = \frac{1}{Q} \sqrt{8\pi 10^{-7} [ab_1 + (K_1 b_1 + K_2 h_1) \delta_C] P_{Э.С}}. \quad (48)$$

Найдем МДС срабатывания геркона

$$F_C = \frac{B_{М.С} Q}{\Lambda_{П.С}}. \quad (49)$$

22. Подставив в формулу (22) или (23) значение $\delta = \delta_K$, где $\delta_K = 2\Delta_K + \Delta_H$, найдем внутреннюю магнитную проводимость $\Lambda_{ВТ.О}$ при отпуске геркона, а по (46) рассчитаем

величину полной магнитной проводимости $\Lambda_{П.К}$ при $\delta = \delta_K$.

Определим электромагнитную силу

$$P_{\Delta.O} = C_{П}(\delta_H - \delta_K) \quad (50)$$

и максимальную магнитную индукцию $B_{M.O}$ в КС при конечном зазоре [1]

$$B_{M.O} = \frac{1}{Q} \sqrt{8\pi 10^{-7} [ab_1 + (K_1 b_1 + K_2 h_1) \delta_K] \cdot (P_{\Delta.O} - P_O)}. \quad (51)$$

В формулу (51) вместо δ_K следует подставлять величину $\delta'_K = 2\Delta_K$.

P_O — электромагнитная сила, учитывающая концентрацию магнитного потока в области перекрытия КС при малых зазорах на площади, меньшей площади ab [1].

$$P_O = \frac{0,106ab}{(2\Delta_K)^{0,982}}. \quad (52)$$

Найдем МДС отпускания геркона

$$F_O = \frac{B_{M.O} Q}{\Lambda_{П.К}}. \quad (53)$$

23. Определим коэффициент K_B возврата

$$K_B = \frac{F_O}{F_C} \quad (54)$$

и рабочую МДС реле

$$F_P = K_3 F_C, \quad (55)$$

где K_3 – коэффициент запаса, который выбирается из соображений обеспечения надежной работы реле с учетом возможного разброса параметров геркона, воздействия механических нагрузок, обеспечения минимального времени срабатывания (обычно $K_3 = 1,5 \div 2$).

Проектирование геркона на этом считается законченным.

5. Пример проектирования геркона с помощью программы GersimII

Значения заданных величин представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения заданных величин

1	Сила контактного нажатия, Н	0,025
2	Противодействующая механическая сила, Н	0,035
3	Максимальная ширина КС в области перекрытия, мм	0,65
4	Минимальная ширина КС в области перекрытия, мм	0,5
5	Максимальное перекрытие, мм	0,35
6	Минимальное перекрытие, мм	0,25
7	Раствор контактов, мм	0,015
8	Минимальная резонансная частота, Гц	9000
9	Толщина контактного покрытия, мкм	1,25
10	Неплотность прилегания, мкм	10

Запускаем программу автоматизированного проектирования GersimII (рис. 6).

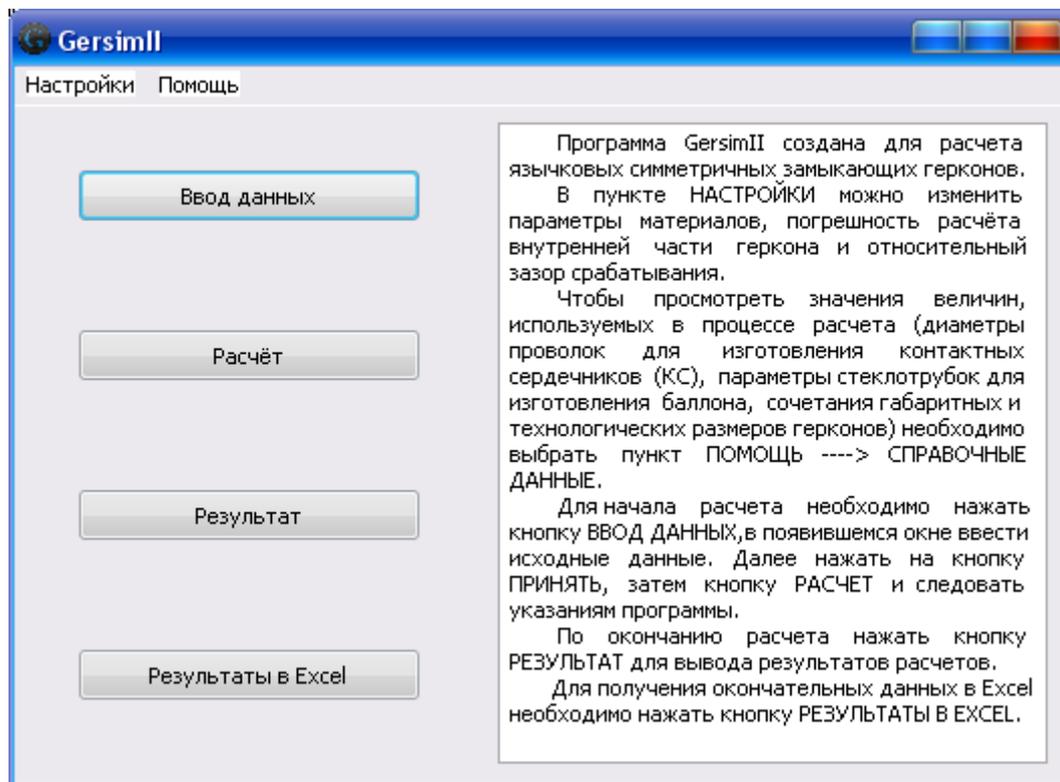


Рис. 6. Главное окно программы GersimII

В пункте НАСТРОЙКИ (рис. 6) мы можем изменять значения следующих величин:

- индукцию насыщения материала, используемого для изготовления КС;
- плотность материала;
- модуль Юнга;
- задать погрешность расчета длины первого или второго участка КС (соответственно, для двухпрофильного и трехпрофильного исполнения КС) в процентном отношении от длины баллона;
- изменить начальное значение относительного зазора срабатывания;
- выбрать отношения среднего диаметра обмотки катушки управления к эквивалентному диаметру поперечного сечения КС и длины геркона к длине обмотки управления.

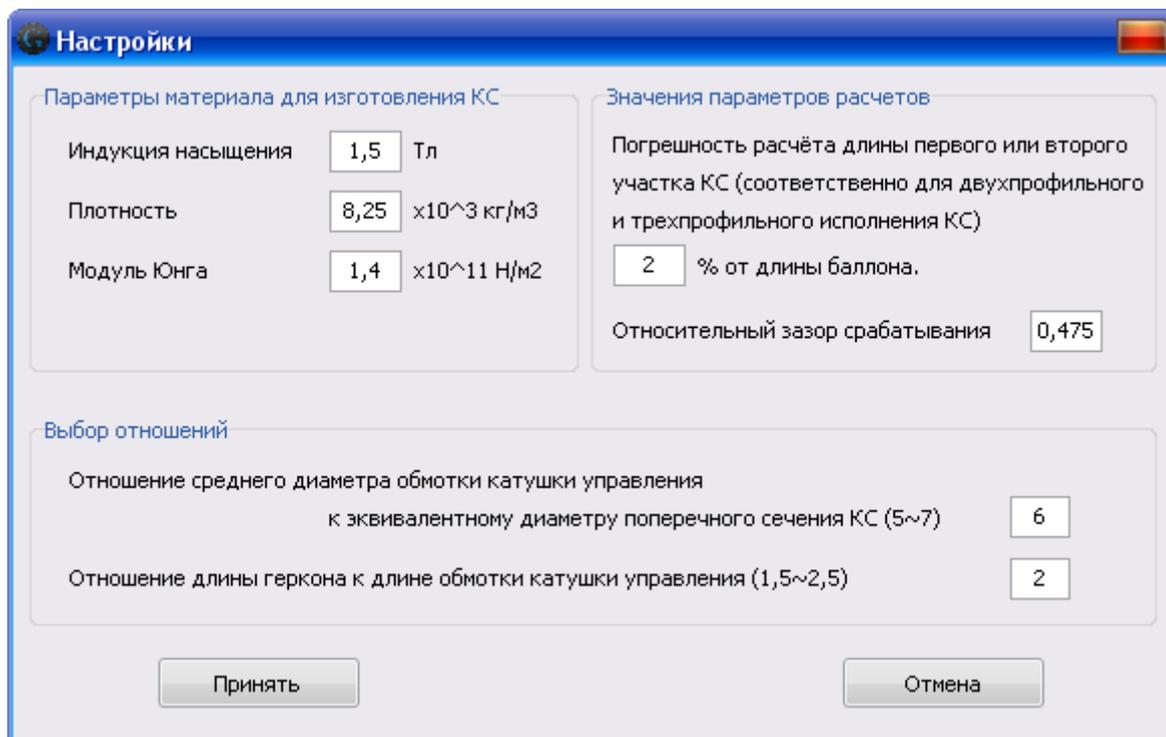


Рис. 7. Настройки

В пункте ПОМОЩЬ доступно три подпункта:

1. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ – представлены таблицы со значениями величин, используемых в процессе расчета. Диаметры проволок для изготовления КС, параметры стеклотрубок для изготовления баллона, сочетания габаритных и технологических размеров герконов.

2. СПРАВКА – справка о программе и рекомендации по проектированию.
3. О ПРОГРАММЕ.

В правой части главного окна (рис. 6) представлена краткая справка.

Для начала расчета необходимо нажать кнопку ВВОД ДАННЫХ (рис. 6); в результате появится окно для ввода данных (рис. 8). На панели ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ нам необходимо ввести значения величин для проектирования, выбрать форму поперечного сечения выводов (рис. 1) и путь проектирования на максимальную чувствительность или на максимальную силу контактного нажатия (для миниатюрных герконов). Также требуется ввести ширину КС в заданном диапазоне. Точка напротив пункта «Автоматическая корректировка ширины КС» означает, что при расчете толщины и перекрытия КС, в случае выхода последнего за заданные пределы его возможного изменения, в соответствии с п.2 третьего раздела осуществляется автоматическая корректировка ширины КС.

Нажимаем кнопку ВВОД ДАННЫХ (рис. 6) и вводим исходные данные (рис. 8) из табл. 4. Ширину принимаем равной 0,57 мм. Выбираем путь проектирования на максимальную силу контактного нажатия. Корректировку ширины КС оставляем автоматической. Нажимаем кнопку ПРИНЯТЬ для сохранения исходных данных и записи их в программу. При нажатии ОТМЕНА данные не передаются в память программы.

Ввод данных

Исходные данные

Сила контактного нажатия: 0,025 Н

Противодействующая механическая сила: 0,035 Н

Максимальная ширина КС в области перекрытия: 0,65 мм

Минимальная ширина КС в области перекрытия: 0,5 мм

Максимальное перекрытие КС: 0,35 мм

Минимальное перекрытие КС: 0,25 мм

Раствор контактов: 0,015 мм

Резонансная частота первого тона
собственных колебаний разомкнутых КС: 9000 Гц

Толщина контактного покрытия КС
в области перекрытия: 1,25 мкм

Неплотность прилегания контактирующих
поверхностей: 10 мкм

Форма поперечного сечения выводов

Цилиндрическая

Прямоугольная

Выбор пути проектирования

Максимальная чувствительность

Максимальная сила контактного нажатия

Корректировка ширины КС

Автоматическая

Ручная

Параметры расчета

Расчет трехпрофильного геркона

Ширина КС: 0,57 мм

Принять

Очистить

Отмена

Рис. 8. Ввод данных

На данном этапе программа произвела расчет толщины и перекрытия КС, что отражается на панели «Промежуточные данные» (рис. 9). Также мы видим, что ширина КС осталась неизменной (т.е. автоматическая корректировка не проводилась). Получили значение диаметра проволоки для изготовления КС, которое необходимо округлить до ближайшего значения из табл. 1 (рис. 9).

Ширина КС – 0,57 мм.

Толщина КС – 0,269 мм.

Перекрытие КС – 0,269 мм.

Полученный диаметр проволоки – 0,441 мм.

Округленное значение диаметра проволоки – 0,45 мм.

Принимаем полученные значения.

Диаметр проволоки для изготовления КС

Промежуточные данные

Ширина КС мм Толщина КС мм

Перекрытие КС мм

Полученное значение диаметра проволоки мм

необходимо округлить до ближайшего значения мм

- 0,25
- 0,3
- 0,35
- 0,4
- 0,45

Рис. 9. Диаметр проволоки для изготовления КС

Затем рассчитывается сила контактного нажатия и открывается окно (рис. 10), предлагающее сравнить рассчитанную и заданную силу контактного нажатия.

Полученная сила контактного нажатия – 0,028 Н.

Заданная сила контактного нажатия – 0,025 Н.

Расхождение нас устраивает, нажимаем кнопку ДА.

Проверка силы контактного нажатия

Полученная сила контактного нажатия Н

Заданная сила контактного нажатия Н

Удовлетворяет расхождение?

Рис. 10. Проверка силы контактного нажатия

В процессе дальнейшего расчета мы получаем длину геркона, и появляется диалоговое окно для ее округления (рис. 11).

Округление длины геркона

На данном этапе производится расчет двухпрофильного геркона

Полученное значение длины геркона мм

необходимо округлить до ближайшего значения мм

Полученные значения

Длина геркона	<input type="text" value="40"/> мм
Длина баллона	<input type="text" value="10"/> мм
Длина заварки	<input type="text" value="0,85"/> мм
Длина второго участка	<input type="text" value="0,25"/> мм
Диаметр баллона	<input type="text" value="1,8"/> мм

35
36
37
40
42
44
46
50
57
66
80

Принять

Рис. 11. Округление длины геркона

Рассчитанное значение длины геркона – 43,43 мм округлим до 40 мм и получаем следующие значения из табл. 2:

Длина геркона – 40 мм.

Длина баллона – 10 мм.

Длина заварки – 1,4 мм.

Длина второго участка – 0,25 мм.

Диаметр баллона – 1,8 мм.

Нажимаем кнопку ПРИНЯТЬ.

Расчет показывает, что при двухпрофильном исполнении КС не могут быть реализованы все заданные величины – получается вариант 2 ($f_{1P} < f_{13}$; $l_B < l'_B$) (см. «Этапы проектирования», п.17). Программа переходит к проектированию геркона с трехпрофильным исполнением КС.

Появляется следующее диалоговое окно (рис. 12), из которого мы видим, что получили девять возможных вариантов трехпрофильного исполнения КС, удовлетворяющих заданным условиям.

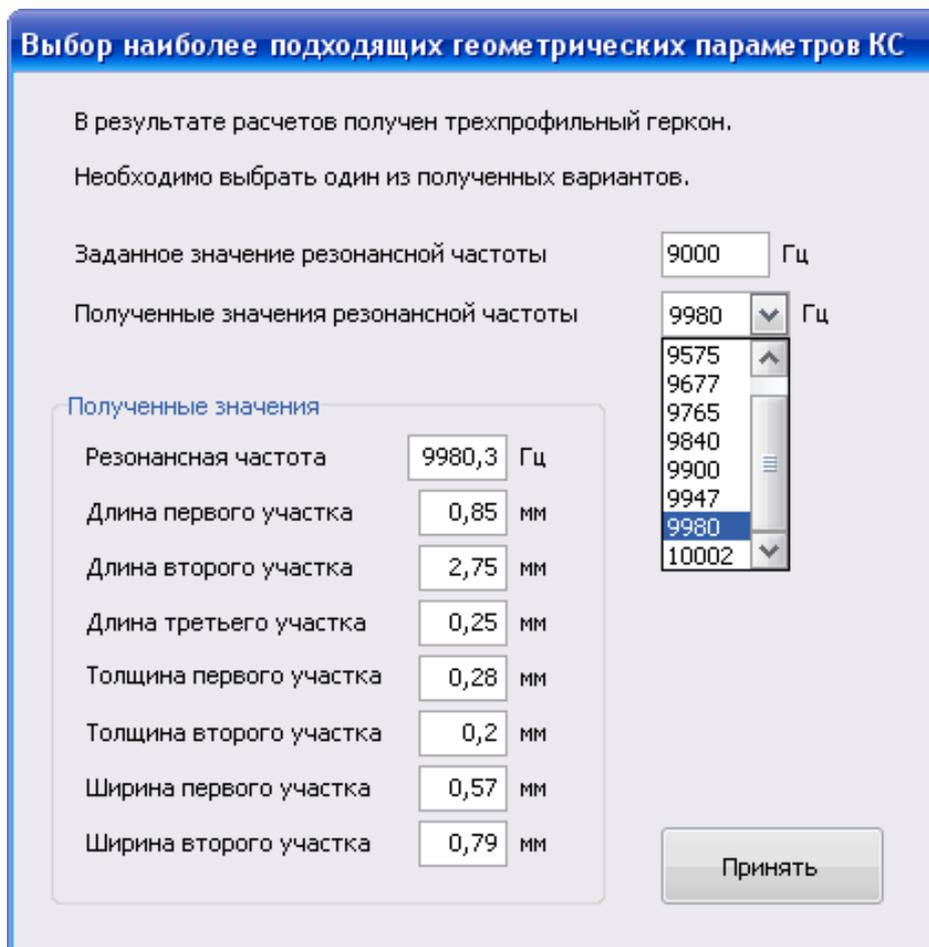


Рис. 12. Выбор наиболее подходящих геометрических параметров КС

Выделяя поочередно отмеченные частоты, просматриваем и анализируем все варианты сочетания номинальных размеров КС с учетом влияния технологических допусков на характеристики геркона. Выберем вариант с резонансной частотой 9980 Гц.

Нажимаем кнопку ПРИНЯТЬ.

Так как диалоговых окон больше нет, нажимаем РЕЗУЛЬТАТ (рис. 6), и открывается окно с полученными результатами проектирования (рис. 13).

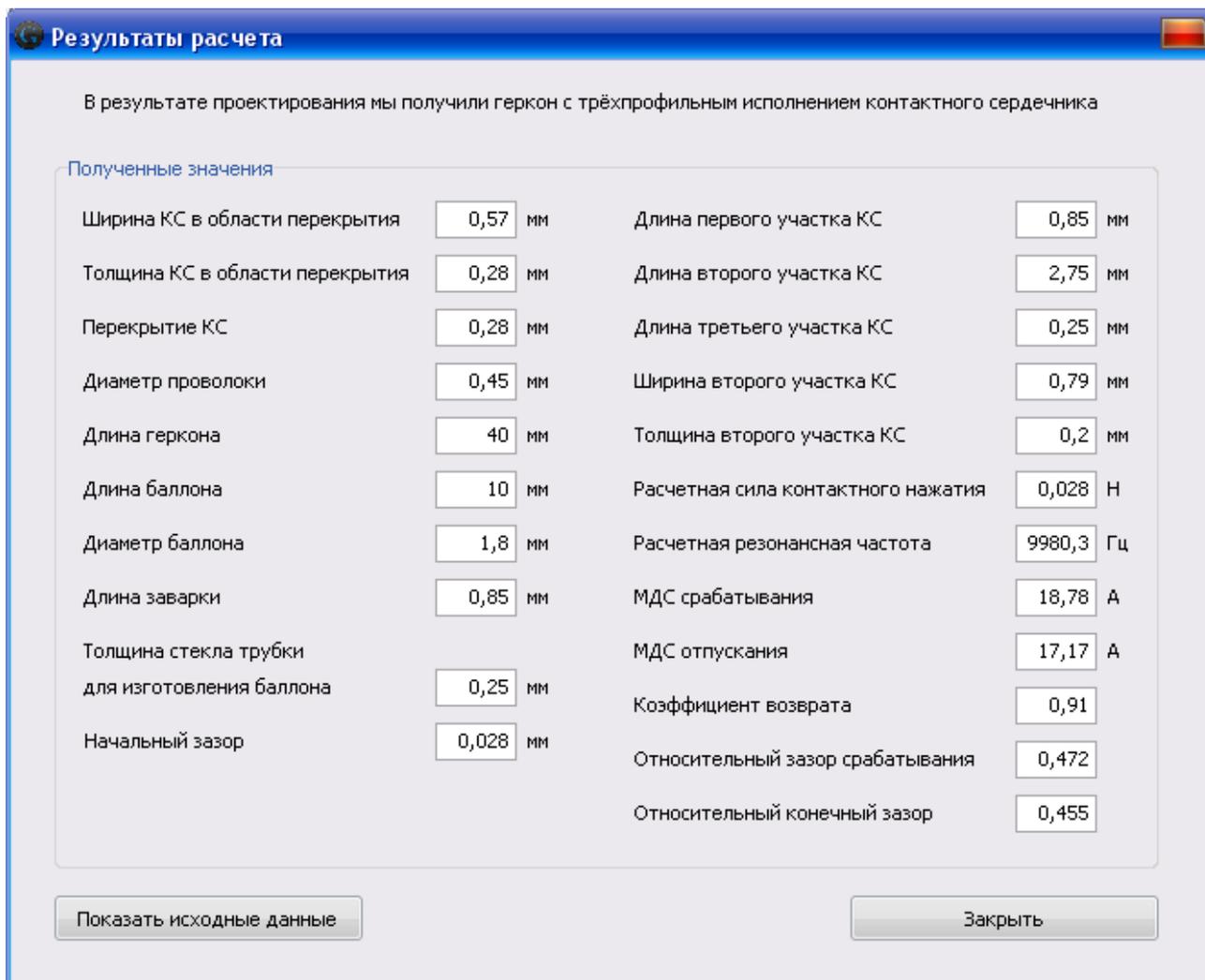


Рис. 13. Результаты расчетов

Спроектированный геркон по размерам и функциональным характеристикам аналогичен миниатюрным герконам типов МКА-10110 и МКА-10704, производимых ОАО «РЗМКП».

Использование программы GersimII значительно ускорило и облегчило процесс выполнения поставленной задачи.

Литература

1. Шоффа В.Н., Давыдов С.В. / Под ред. А.В. Савельева. САПР языковых замыкающих герконов и реле на их основе: Учебное пособие. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1987.
2. Подгорная Д.Б. Проектирование герконов и реле на их основе: Дипломный проект. – М.: МЭИ, 2007.
3. Грошев С.В. Совершенствование программы проектирования герконового реле: Дипломный проект. – М.: МЭИ, 2006.
4. ГОСТ 17448-79. Контакты магнитоуправляемые герметизированные малой и средней мощности. Основные параметры и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1979.
5. Шоффа В.Н. Анализ полей магнитных систем электрических аппаратов. / Под ред. Г.Г. Нестерова. – М.: Изд-во МЭИ. 1994.

6. Буль Б.К., Шоффа В.Н., Умеренков А.С. Электрические аппараты автоматики на герконах: Учебное пособие по курсу «Электромеханические аппараты автоматики». – М.: Моск. энерг. ин-т, 1978.
7. Буль Б.К., Шоффа В.Н. Учебное пособие по курсу «Электромеханические аппараты автоматики». Раздел «Реле на герметизированных магнитоуправляемых контактах». – М.: Моск. энерг. ин-т, 1977.
8. Шоффа В.Н. Определение оптимального соотношения размеров контактных сердечников герконов для обеспечения максимального контактного нажатия. // Электричество, 1977, № 10.
9. Шоффа В.Н. Особенности проектирования и производства миниатюрных и субминиатюрных герконов. Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) и изделия на их основе. // Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции. 1-3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова: Издательство ООО «Полиграф», 2009.
10. Peek R.L. Magnetization and Pull Characteristics of Mating Magnetic Reed. The Bell System Technical Journal, 1961, v.40, n.2.
11. Шоффа В.Н. Расчет предельных начальных зазоров герконов. Труды МЭИ, вып. 367, 1978.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978.
13. Лебедев Б.Д. Автоматизированное проектирование герконов: Выпускная бакалаврская работа. – М.: МЭИ, 2008.