

# МИКРОМИНИАТЮРНОЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ ГЕРКОНОВОЕ РЕЛЕ С МАЛОЙ МОЩНОСТЬЮ УПРАВЛЕНИЯ

И.А. Александров, А.В. Орлов  
173000, ул. Нехинская, 55, Великий Новгород, Россия, ОАО «СКТБ РТ»

*В работе представлены две конструкции реле РГА 12 и РГА 13 с диапазонами частот коммутируемого сигнала соответственно 400-1000 МГц, 1000-2000 МГц, разработанные на базе геркона МКА-10704. Рассмотрено СВЧ реле как СВЧ многополюсник на основе волновых матриц рассеяния и передачи, связывающие приведенные напряжения падающих и отраженных волн на входах и выходах данного многополюсника. Представлены зависимости от частоты величины развязки коммутируемого сигнала разработанных реле.*

*The paper represents two relay РГА 12 and РГА 13 with frequency ranges 400-1000 MHz and 1000-2000 MHz, respectively, developed on basis of reed switch МКА-10704. The microwave relay is considered as a microwave multiport on basis of wavefront scattering and transmission matrixes connecting reduced voltages of incident and reflected waves at the input and output of this multiport. Dependences on frequency of switched signal isolation value of the developed relays.*

На основе высокочастотного геркона МКА 10704 ОАО СКТБ РТ разработаны два типа реле РГА 12 и РГА 13 с диапазонами частот коммутируемого сигнала 400-1000 МГц и 1000-2000 МГц, соответственно. Высокочастотные реле с частотой коммутируемого сигнала до 2 ГГц имеют широкий спектр применения в аппаратуре связи, стационарных, подвижных и бортовых объектах, они предназначены для коммутации электрических сигналов: в приемо-передающих трактах, в высокочастотных системах автоматики радиоэлектронной аппаратуры, в сетях линий передач. В настоящее время совершенствование высокочастотных герконовых реле происходит по следующим направлениям: микроминиатюризация с одновременным повышением параметров коммутируемого сигнала, т.е. увеличение частоты, коммутируемой мощности, коммутируемого тока и напряжения, увеличение числа срабатываний; сокращение переходного сопротивления и сохранение его в течение всего срока службы.

Высокочастотное герконовое реле состоит из геркона, вмонтированного в цилиндрический медный экран, который, в свою очередь, помещается внутрь управляющей катушки. Собранный коммутационное устройство устанавливается в пластмассовый корпус с вмонтированными в основание выводами, сформованными под поверхностный монтаж. Высокочастотный экран играет в реле большую роль, и поэтому от выбора материала и геометрических размеров экрана зависят волновые характеристики реле. Рассматривалось несколько возможных материалов экрана: золото, серебро, алюминий, медь. Медь и серебро наиболее подходят в качестве материалов экрана высокочастотного реле. Обладая небольшим удельным сопротивлением, эти материалы имеют малое значение глубины проникновения электромагнитной волны в материал, но применение серебра в качестве материала экрана приведет к увеличению стоимости реле. Поэтому в качестве материала экрана выбрана медь, которая имеет лучшие характеристики и низкую стоимость. Конструктивно экран выполнен в виде цилиндра из мягкой медной ленты. Такая конструкция экрана позволяет рассматривать реле как круглую коаксиальную линию. Геометрические размеры каркаса катушки определяются размещенными в нем герконом и экраном. Отверстие каркаса катушки выполнено в виде цилиндра наружным диаметром 2,7 мм. Длина каркаса определяется длиной баллона геркона и составляет 12 мм. Из них длина намоточного окна с учетом толщины стенок каркаса составляет 11,4 мм. Материалом каркаса выбрана композиция полиамидная, которая перерабатывается на термопластавтоматах по типовой технологии. В дальнейшем при разработке геркона возможно уменьшение габаритов каркаса катушки за счет уменьшения диаметра баллона геркона, что позволит уменьшить габариты разрабатываемого высокочастотного реле.

Реле, из-за соизмеримости его длины с  $\frac{1}{4}$  длины волны пропускаемого через него сигнала частотой 400–2000 МГц, превращает его в элемент, рабочие характеристики которого зависят не только от его сосредоточенных  $R$ ,  $L$ ,  $C$  параметров, но и от распределенных по его длине  $L$  и  $C$  параметров. В результате развязка в цепи зависит от межконтактной емкости, а величина емкости, в свою очередь, зависит от геометрии контактов.

Расчет развязки герконового реле проведен для трех значений межконтактной емкости.

На рис. 1 представлена эквивалентная схема герконового реле, включенного в СВЧ передающий тракт с волновым сопротивлением 50 Ом. Выводы геркона с точки зрения теории и техники СВЧ представляют из себя отрезки линии передачи длиной  $L_1$  с волновым сопротивлением  $W_1$ , а баллон геркона образует отрезок линии передачи длиной  $L_2$  с волновым сопротивлением  $W_2$ .

Через  $a_1$  и  $a_2$  обозначены падающие, а через  $b_1$  и  $b_2$  - отраженные волны СВЧ сигнала, распространяющегося в линии передачи.

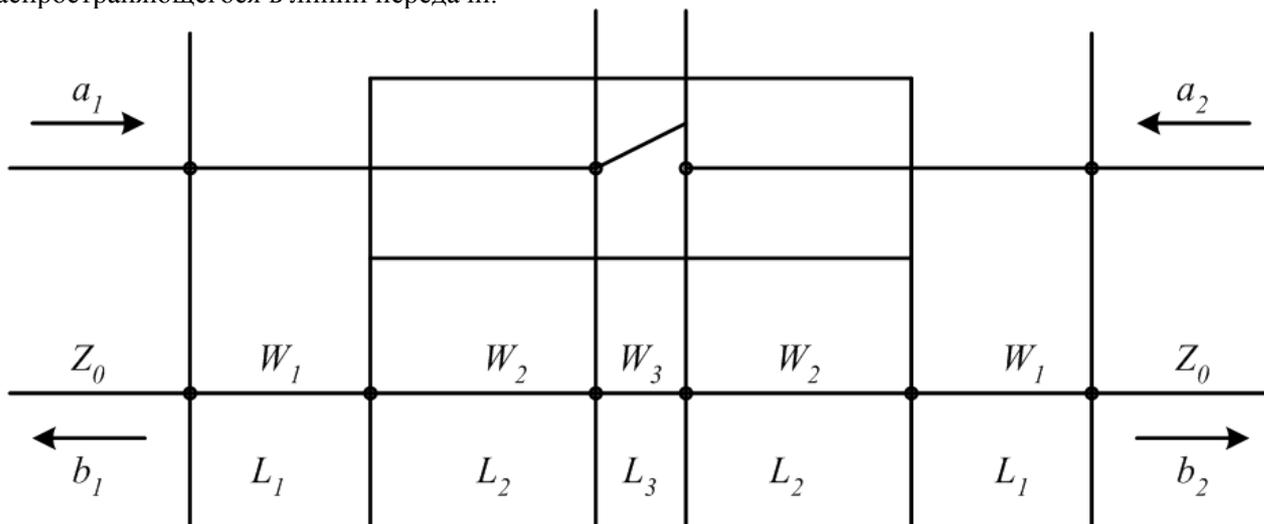


Рис. 1. Эквивалентная схема герконового реле, включенного в СВЧ передающий тракт.

В случае геркона с идеальными характеристиками отношение волн  $b_2/a_1$ , определяющее коэффициент передачи СВЧ сигнала через отрезок линии, при герконе в замкнутом состоянии должно быть равно 1, а при герконе в разомкнутом состоянии равно 0.

Любое СВЧ устройство можно представить в виде «черного ящика», подразумевая под этим многополюсник с неизвестным внутренним содержанием. Для расчета СВЧ многополюсников чаще всего используют волновые матрицы рассеяния и передачи, связывающие приведенные напряжения падающих и отраженных волн на входах и выходах (плечах) многополюсника.

Герконовое реле можно представить в виде четырехполюсника, которому соответствует матрица рассеяния:

$$|S| = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Приведенные напряжения на входе и выходе четырехполюсника в случае волновых матриц передачи связаны уравнениями:

$$U'_{1nad} = T_{11} \cdot U'_{2omp} + T_{12} \cdot U'_{2nad}, \quad (2)$$

$$U'_{1omp} = T_{21} \cdot U'_{2omp} + T_{22} \cdot U'_{2nad}, \quad (3)$$

или

$$\begin{bmatrix} U'_{1nad} \\ U'_{1omp} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} U'_{2omp} \\ U'_{2nad} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $[T]$  – матрица передачи

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Элементы матриц рассеяния и передачи связаны следующими соотношениями:

$$S_{11} = T_{21}/T_{11}, \quad (6)$$

$$S_{12}=T_{22}\cdot T_{21}\cdot T_{12}/T_{11}, \quad (7)$$

$$S_{21}=1/T_{11}, \quad (8)$$

$$S_{22}=-T_{12}/T_{11}, \quad (9)$$

$$T_{11}=1/S_{21}, \quad (10)$$

$$T_{12}=-S_{22}/S_{21}, \quad (11)$$

$$T_{21}=S_{11}/S_{21}, \quad (12)$$

$$T_{22}=S_{21}\cdot S_{11}\cdot S_{21}/S_{21}, \quad (13)$$

При расчетах, как правило, любой четырехполюсник сложной структуры может быть представлен каскадным соединением элементарных четырехполюсников с известными матрицами передачи. Результирующая матрица передачи каскадного соединения четырехполюсников равна произведению матриц передачи составляющих четырехполюсников, причем перемножение матриц ведется по направлению к нагрузке.

Герконовое реле можно рассматривать как соединение нескольких отрезков линии передачи. Каждому будет соответствовать своя матрица передачи. Результирующая матрица передачи будет равна произведению этих матриц:

$$[T]=[T_1]\cdot[T_2]\cdot[T_3]\cdot[T_4]\cdot[T_5], \quad (14)$$

Рассмотрим герконовое реле как соединение нескольких отрезков линии передач (рис. 2).

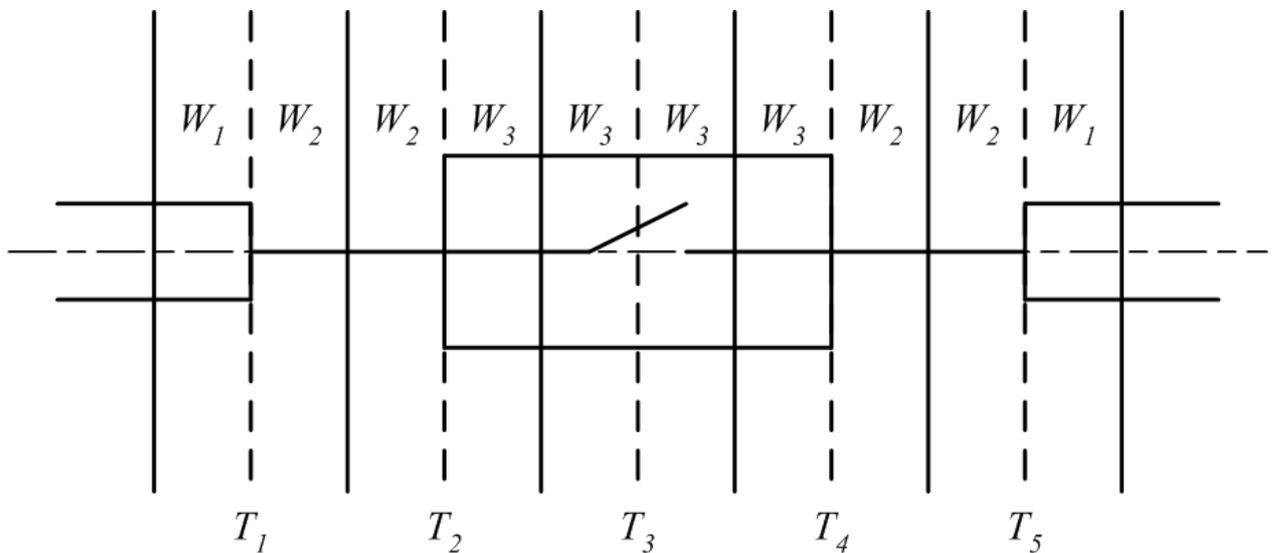


Рис. 2. Герконовое реле как соединение четырехполюсников.

Распишем матрицы передачи для каждого участка.

Участок 1 представляет собой прямое соединение линий с различным волновым сопротивлением, ему соответствует матрица передачи (15):

$$[T]=\begin{bmatrix} \frac{R+1}{2\cdot\sqrt{R}} & \frac{R-1}{2\cdot\sqrt{R}} \\ \frac{R-1}{2\cdot\sqrt{R}} & \frac{R+1}{2\cdot\sqrt{R}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$R = \frac{W_2}{W_1}, \quad (16)$$

$W_1$  – волновое сопротивление подводящих линий,  $W_1 = 50$  Ом.

$W_2$  – волновое сопротивление двухпроводной линии, образованной выводами реле, оно рассчитывается по формуле (39).

$$W = 276 \cdot \text{Lg} \left[ \frac{D}{d} + \sqrt{\frac{D^2}{d^2} - 1} \right], \quad (17)$$

где  $D$  – расстояние между выводами,  $d$  – диаметр вывода.  $D = 1,9$  мм,  $d = 0,5$ .

Рассчитаем  $W_2$  по формуле 17.

$$W_2 = 276 \cdot \text{Lg} \left[ \frac{1,9}{0,5} + \sqrt{\frac{1,9^2}{0,5^2} - 1} \right] = 157,8 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем  $R$  по формуле 16:

$$R = \frac{157,8}{50} = 3,2.$$

Запишем матрицу передачи:

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{3,2+1}{2 \cdot \sqrt{3,2}} & \frac{3,2-1}{2 \cdot \sqrt{3,2}} \\ \frac{3,2-1}{2 \cdot \sqrt{3,2}} & \frac{3,2+1}{2 \cdot \sqrt{3,2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,17 & 0,607 \\ 0,607 & 1,17 \end{bmatrix}$$

*Участок 2* тоже представляет собой прямое соединение линий с различным волновым сопротивлением, ему соответствует матрица передачи (15).

Рассчитаем  $R$  для участка 2.

$$W_2 = 157,8 \text{ Ом}$$

$$W_3 = 52 \text{ Ом}$$

$$R = \frac{52}{157,8} = 0,33$$

Запишем матрицу передачи:

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{0,33+1}{2 \cdot \sqrt{0,33}} & \frac{0,33-1}{2 \cdot \sqrt{0,33}} \\ \frac{0,33-1}{2 \cdot \sqrt{0,33}} & \frac{0,33+1}{2 \cdot \sqrt{0,33}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,158 & -0,584 \\ -0,584 & 1,158 \end{bmatrix}$$

*Участок 3* представляет собой последовательное сопротивление в линии передач, ему соответствует матрица передачи (40).

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{Z+R+1}{2 \cdot \sqrt{R}} & \frac{R-Z-1}{2 \cdot \sqrt{R}} \\ \frac{Z+R-1}{2 \cdot \sqrt{R}} & \frac{R-Z+1}{2 \cdot \sqrt{R}} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\text{где } R = \frac{W_3}{W_3} = 1.$$

$$Z = \frac{z}{W_3}, \quad (19)$$

где  $Z$  – ненормированное полное сопротивление.

Ненормированное полное сопротивление равно сумме активного и реактивного сопротивления.

При замкнутых контактах реле оно будет равно сопротивлению контактов  $z=r$ . Сопротивление контактов реле  $r = 0,1$  Ом.

$$Z = \frac{0,1}{52} = 1,92 \cdot 10^{-3}$$

Запишем матрицу передачи для 3 участка при замкнутых контактах:

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{1,92 \cdot 10^{-3} + 1 + 1}{2 \cdot \sqrt{1}} & \frac{1 - 1,92 \cdot 10^{-3} - 1}{2 \cdot \sqrt{1}} \\ \frac{1,92 \cdot 10^{-3} + 1 - 1}{2 \cdot \sqrt{1}} & \frac{1 - 1,92 \cdot 10^{-3} + 1}{2 \cdot \sqrt{1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,001 & -9,615 \cdot 10^{-4} \\ 9,615 \cdot 10^{-4} & 0,999 \end{bmatrix}$$

При разомкнутых контактах реле ненормированное полное сопротивление будет равно:

$$z = \frac{1}{6,28 \cdot i \cdot c \cdot f}, \quad (20)$$

где  $c$  – межконтактная емкость,  $f$  – частота коммутируемого сигнала.

$$c = 0,3 \text{ пФ}$$

$$f = 2 \text{ ГГц}$$

$$z = \frac{1}{6,28 \cdot i \cdot 0,3 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^9} = -265,39i \text{ Ом.}$$

Рассчитаем  $Z$  по формуле 41:

$$Z = \frac{-265,39i}{52} = -5,104i \text{ Ом.}$$

Запишем матрицу передачи для 3 участка при разомкнутых контактах:

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{-5,104i + 1 + 1}{2 \cdot \sqrt{1}} & \frac{1 + 5,104i - 1}{2 \cdot \sqrt{1}} \\ \frac{-5,104i + 1 - 1}{2 \cdot \sqrt{1}} & \frac{1 + 5,104i + 1}{2 \cdot \sqrt{1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2,552i & 2,552i \\ -2,552i & 1 + 2,552i \end{bmatrix}$$

Участки 4 и 5 тоже представляют собой прямое соединение линий с различным волновым сопротивлением, им соответствует матрица передачи (37). Они рассчитываются аналогично матрицам для участков 1 и 2.

Запишем матрицу передачи для участка 4:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1,158 & 0,584 \\ 0,584 & 1,158 \end{bmatrix}$$

Запишем матрицу передачи для участка 5:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1,17 & -0,607 \\ -0,607 & 1,17 \end{bmatrix}$$

Рассчитаем результирующие матрицы передачи реле при замкнутых и разомкнутых контактах по 14:

Матрица передачи реле при замкнутых контактах:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1,17 & 0,607 \\ 0,607 & 1,17 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,158 & -0,584 \\ -0,584 & 1,158 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,001 & -9,615 \cdot 10^{-4} \\ 9,615 \cdot 10^{-4} & 0,999 \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} 1,158 & 0,584 \\ 0,584 & 1,158 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,17 & -0,607 \\ -0,607 & 1,17 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,01 & -10^{-3} \\ 10^{-3} & 0,99 \end{bmatrix}$$

Матрица передачи реле при разомкнутых контактах:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1,17 & 0,607 \\ 0,607 & 1,17 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,158 & -0,584 \\ -0,584 & 1,158 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1-2,552i & 2,552i \\ -2,552i & 1+2,552i \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} 1,158 & 0,584 \\ 0,584 & 1,158 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,17 & -0,607 \\ -0,607 & 1,17 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-2,654i & 2,654i \\ -2,654i & 1+2,654i \end{bmatrix}$$

КСВН и коэффициент затухания рассчитываются по формулам (21)-(23):

$$КСВН = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}, \quad (21)$$

где  $S_{11} = \frac{T_{21}}{T_{11}}$

$$\alpha = 20 \cdot \lg \left( \left| \frac{1}{T_{11}} \right| \right), \quad (22)$$

Рассчитаем КСВН и коэффициент затухания реле при замкнутых контактах:

$$КСВН = \frac{1 + \left| \frac{10^{-3}}{1,01} \right|}{1 - \left| \frac{10^{-3}}{1,01} \right|} = 1,02$$

$$\alpha_{замк} = 20 \cdot \lg \left( \left| \frac{1}{1,01} \right| \right) = 0,1 \text{ дБ}$$

Рассчитаем коэффициент затухания реле при разомкнутых контактах:

$$\alpha_{раз} = 20 \cdot \lg \left( \left| \frac{1}{1-2,654i} \right| \right) = 9,05 \text{ дБ}$$

Этот параметр в основном зависит от межконтактной емкости и частоты коммутируемого сигнала. Проведен расчет при трех значениях емкости ( $c = 0,1; 0,2; 0,3$  пФ), на частотах от 1 до 2 ГГц, с шагом 100 МГц.

На рис. 3 представлена теоретическая зависимость развязки герконового реле от частоты для трех значений межконтактной емкости.

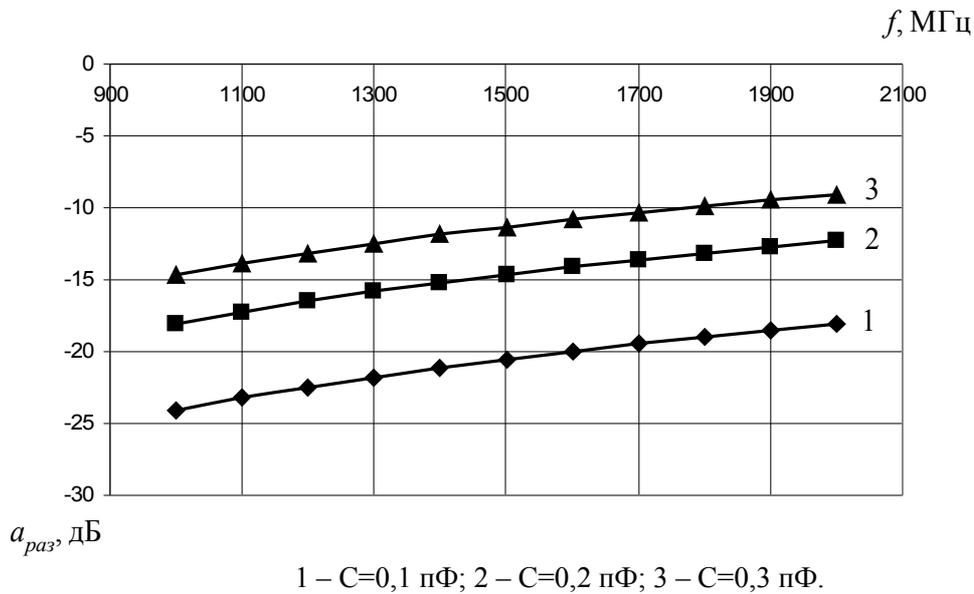


Рис. 3. Зависимость развязки высокочастотного герконового реле от частоты для разных значений межконтактной емкости.

На рис. 4 приведены зависимости развязки от частоты для нескольких экспериментальных образцов.

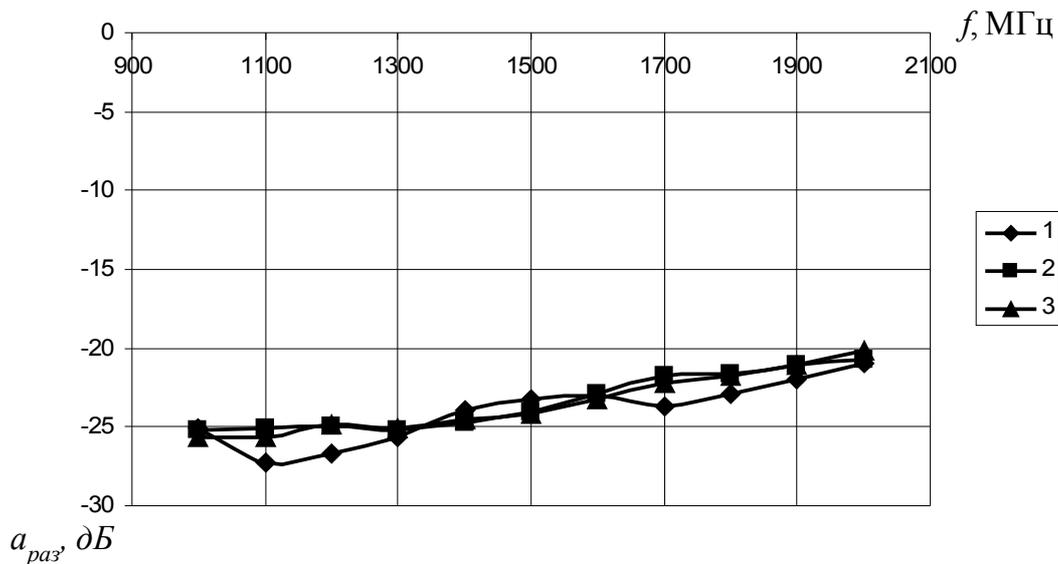


Рис. 4. Зависимость развязки от частоты для трех экспериментальных образцов.

Достоинствами разработанных высокочастотных герконовых реле являются малые габариты, высокое быстродействие, большая износостойкость контактов, высокое число срабатываний, небольшое и относительно стабильное сопротивление контактов в процессе работы, более высокая стабильность электрических и механических параметров, более высокая надежность, стойкость к внешним воздействующим факторам, простота технологического процесса изготовления, отсутствие в конструкции дорогостоящих комплектующих, низкая себестоимость изготовления.