

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СФЕРИЧЕСКОГО ЖИГ-РЕЗОНАТОРА

А. В. Васильев, А. А. Игнатьев

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kbkt@renet.ru

Приведена нелинейная модель сферического ЖИГ-резонатора для малых (милливаттных) уровней мощности в диапазоне частот от 0,7 до 4 ГГц.

Ключевые слова: ЖИГ-резонатор, эквивалентная схема, нелинейная модель.

Nonlinear Model of Spherical YIG-resonator

A. V. Vasiliev, A. A. Ignatiev

Given a nonlinear model of spherical YIG-resonator for small (mW) power levels in the frequency range from 0,7 to 4 GHz.

Key words: YIG-resonator, equivalent circuit, nonlinear model.

Гетеромагнитные устройства и микросистемы автогенераторного типа имеют в своем составе различные виды и топологии ферритовых резонаторов (ФР) [1], которые представляют собой сферы из монокристаллических ферритов [1], прямоугольные резонаторы из эпитаксиальных пленок ферритов [2], массивы из магнитных углеродных нанотрубок на диэлектрическом основании [3] или сфероиды из разных наноразмерных магнитных материалов [4]. В [5, 6] показан нелинейный характер поглощения входной СВЧ-мощности резонаторами на основе объемных ферритов (сферы, призмы).

В большинстве случаев при проектировании СВЧ-генератора с ЖИГ-резонатором используется линейная эквивалентная схема. Варианты такой схемы приведены в [7, 8]. Блок-схема СВЧ-генератора, в которой ЖИГ-резонатор заменен на линейную эквивалентную схему, приведена на рис. 1.

Применение в расчетах линейных эквивалентных схем сферических ФР в различных участках частотного диапазона (от УВЧ до ТВЧ) на различных уровнях мощности показало их ограниченный характер [1]. Так, расчетные значения центральной частоты генерируемого сигнала, уровень выходной мощности, ширина спектральной линии, уровень фазовых шумов, перестройка центральной частоты гетеромагнитных автогенераторов милливаттного уровня мощности на сферических ФР в диапазоне частот 1 ГГц не соответствовали экспериментальным данным.

В статье предложена нелинейная модель ЖИГ-резонатора, разработанная в среде САПР *Microwave Office*. Модель построена на основе экспериментально полученных характеристик ЖИГ-резонатора (уровней поглощения входного сигнала ферритовым резонатором на различных

уровнях мощности от 0,1 мкВт (−40 дБм) до 200 мВт (+23 дБм) в диапазоне частот от 500 МГц до 4 ГГц).

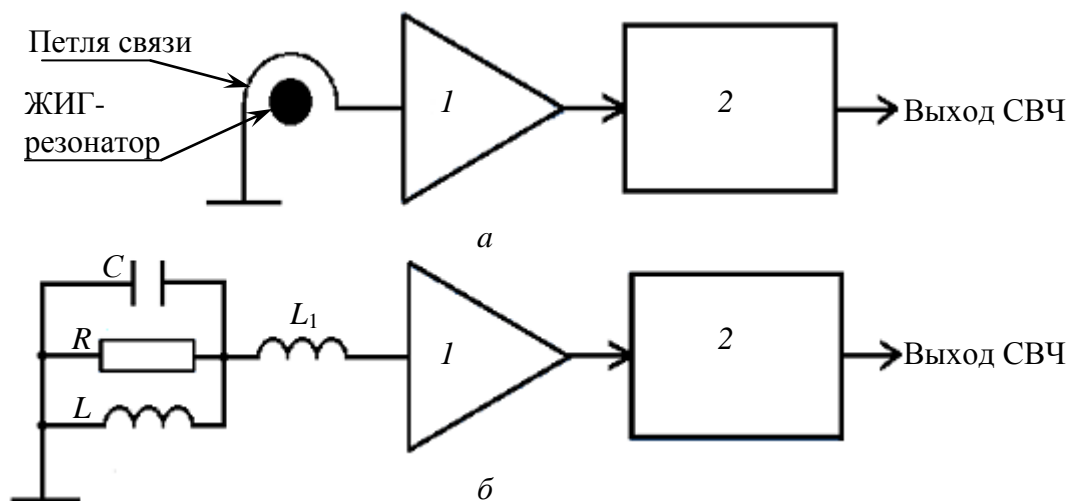


Рис. 1. Генератор с ЖИГ-резонатором: *а* – блок-схема; *б* – схема генератора с линейной эквивалентной схемой ЖИГ-резонатора; *1* – активный элемент с отрицательным сопротивлением; *2* – цепь согласования; L_1 – индуктивность петли связи с ЖИГ-резонатором; C , R и L – емкость, активное сопротивление и индуктивность ЖИГ-резонатора соответственно

Для исследований был выбран сферический ферритовый резонатор марки 30КГ диаметром 0,8 мм, с намагниченностью насыщения $4\pi M_s = 360$ Гс и шириной $\Delta H = 0,3$ Э линии ферромагнитного резонанса (ФМР) [9]. Резонатор размещен в центре петли связи (см. рис. 1, *а*), которая представляет собой один виток (диаметр 0,85 мм) медной проволоки (диаметр 0,1 мм). Виток смонтирован на плате из текстолита размером 34×19 мм и толщиной 0,5 мм. Вся конструкция смонтирована в корпусе с СВЧ-разъемами. Для измерения характеристик резонатора устройство устанавливалось в зазор электромагнита, обеспечивающего поле подмагничивания резонатора H_0 так, чтобы линии магнитной индукции лежали в плоскости витка связи (перпендикулярно монтажной плате). Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

Сигнал фиксированной частоты (500, 600, 700, 750, 790, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 МГц) подавался на исследуемый резонатор, а уровень сигнала, прошедшего через него, определялся с помощью анализатора спектра. Поле электромагнита устанавливалось так, чтобы частота ФМР совпала с частотой сигнала, подаваемого на вход резонатора. При этом снималась зависимость коэффициента передачи K резонатора от уровня входной мощности $P_{вх}$. Полученные результаты представлены на рис. 3.

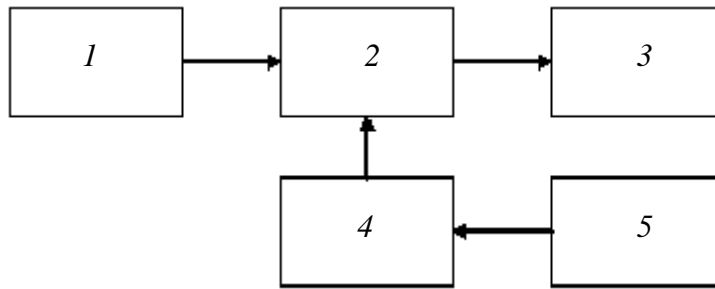


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор СВЧ-сигналов; 2 – исследуемое устройство; 3 – анализатор спектра; 4 – электромагнит; 5 – блок питания электромагнита

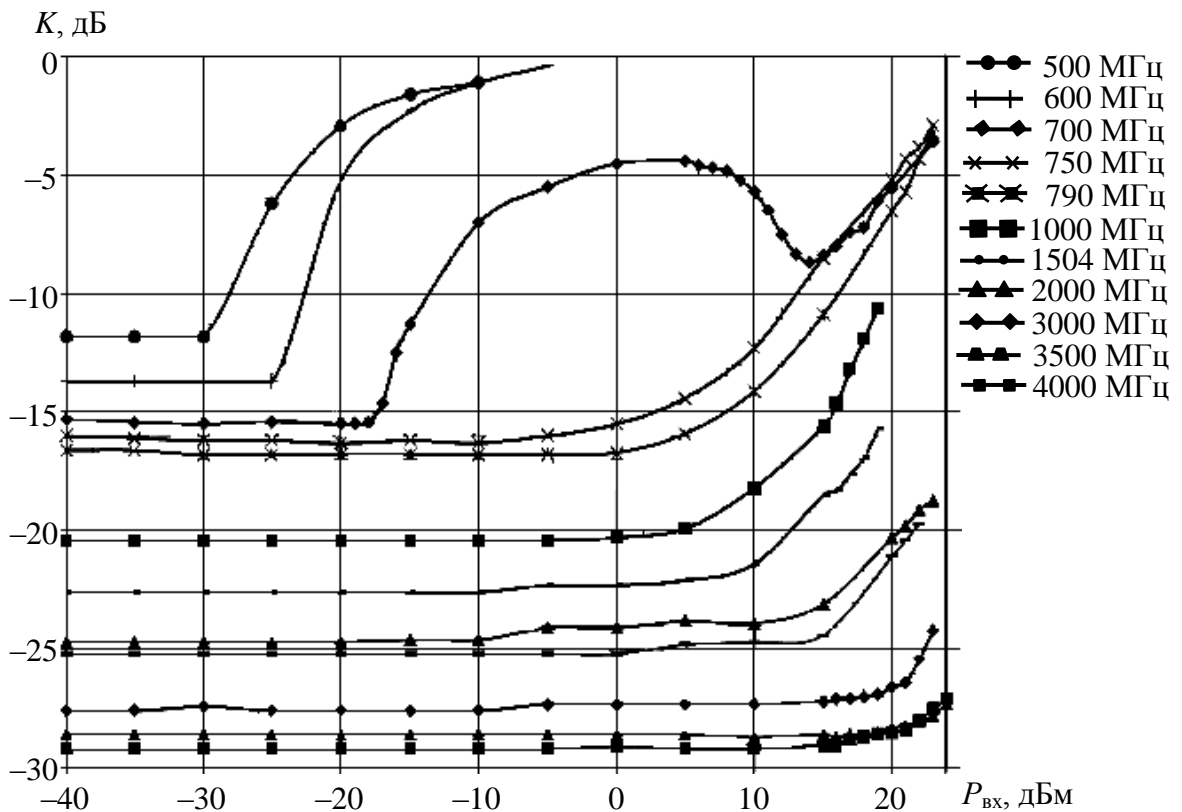


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи K от уровня мощности входного сигнала на частоте ФМР

Аномальное поведение зависимости $K(P)$ на частотах 500 МГц, 600 МГц и 700 МГц обусловлено, по всей видимости, ненасыщенным режимом работы ферритового резонатора (напомним, что использовался резонатор 30КГ с $4\pi M_S = 360$ Гс). Остальные зависимости $K(P)$ носят качественно предсказуемый характер.

По полученным характеристикам (см. рис. 3) можно определить области работы ферритового резонатора в линейном (горизонтальные участки зависимости $K(P)$) и нелинейном режимах.

Нелинейная модель ЖИГ-резонатора разрабатывалась на частоте (998,2 МГц) близкой к 1 ГГц, исходя из практических потребностей [9].

Результаты измерения параметров ферритового резонатора 30КГ на частоте ФМР 998,2 МГц при поле подмагничивания 356,5 Э представлены на рис. 4–6.

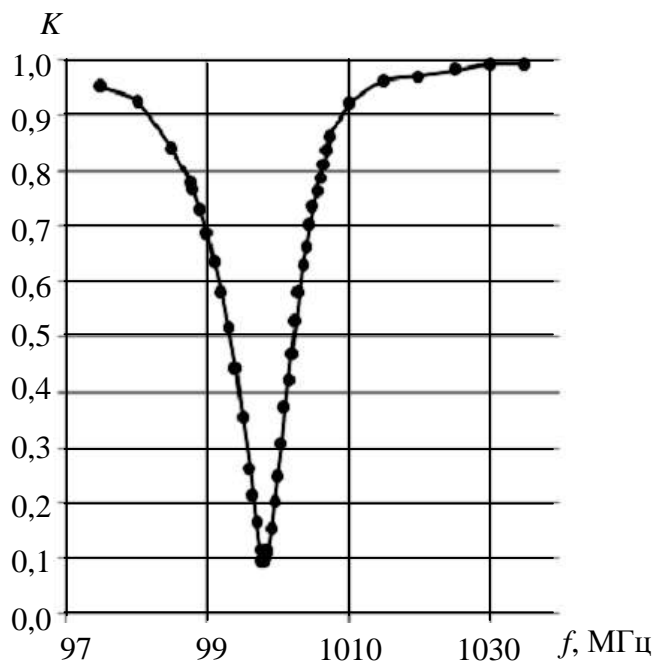


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи ЖИГ-резонатора от частоты f входного сигнала

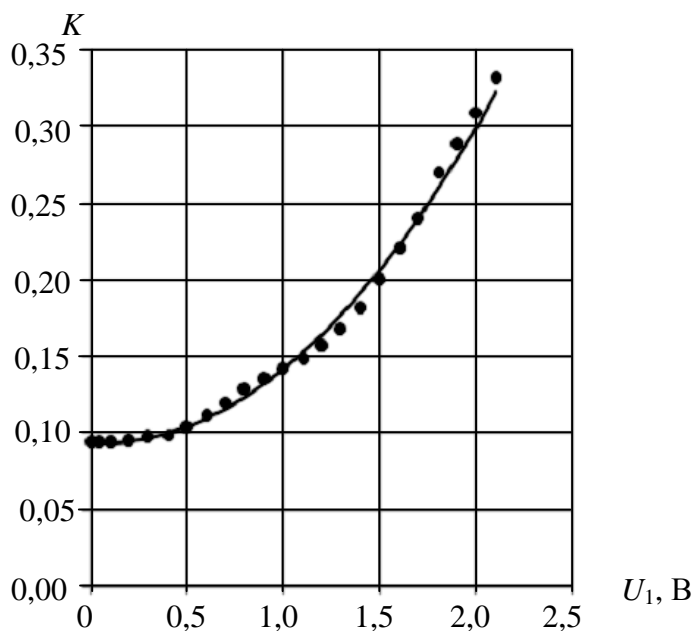


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи от подаваемого на резонатор напряжения U_1 . Точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимация полиномом 2-го порядка

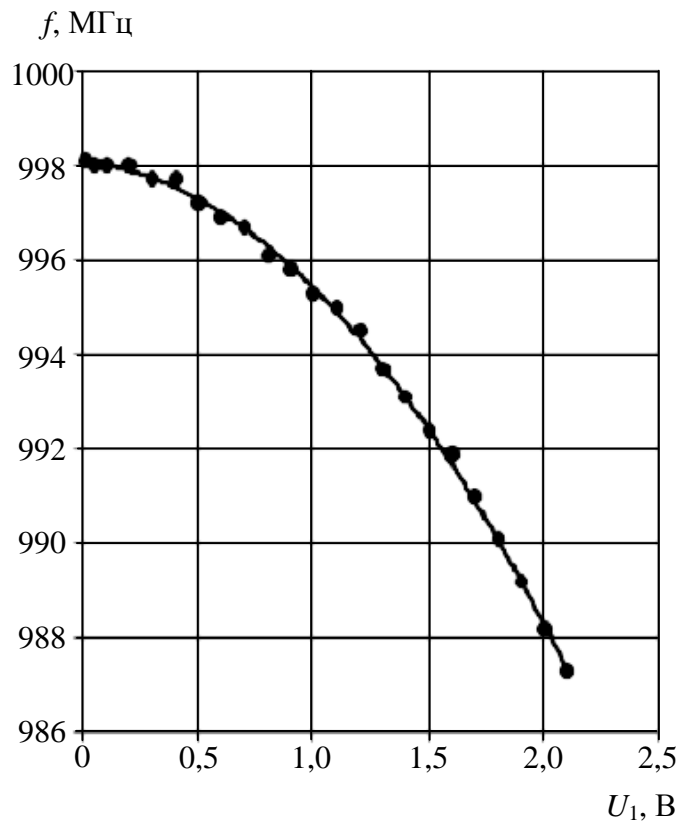


Рис. 6. Зависимость частоты ФМР от подаваемого на резонатор напряжения U_1 . Точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимация полиномом 2-го порядка

В качестве модели была использована нелинейная эквивалентная схема включения ЖИГ-резонатора, показанная на рис. 7.

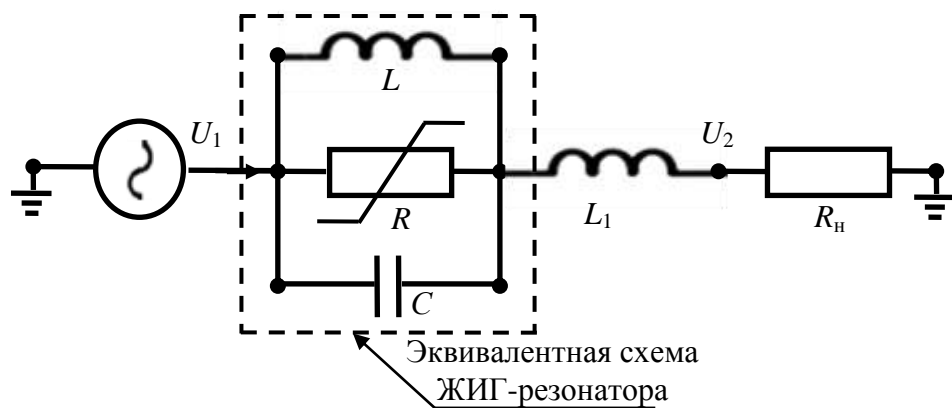


Рис. 7. Нелинейная эквивалентная схема включения ЖИГ-резонатора: U_1 – напряжение с выхода генератора; U_2 – напряжение с выхода ферритового резонатора; R_n – сопротивление нагрузки (вход анализатора спектра); L_1 –

индуктивность петли связи резонатора с линией передачи СВЧ-мощности

Параметры элементов R , L , C ЖИГ-резонатора на рис. 7 определяются по следующим формулам [8]:

$$\begin{aligned}
 F_0 &= \gamma H_0, \\
 Q &= \frac{H_0 - \frac{1}{3} 4\pi M_S}{\Delta H}, \\
 \omega_0 &= 2\pi F_0, \\
 R &= 0,487Q, \\
 L &= \frac{R}{\omega_0 Q}, \\
 C &= \frac{1}{\omega_0^2 L},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где F_0 – частота ФМР, МГц; H_0 – напряженность поля подмагничивания, Э; Q – добротность RLC -контура; ΔH – ширина резонансной линии ФМР, Э (для КГ30 это 0,3 Э); $4\pi M_S$ – намагниченность насыщения ЖИГ-резонатора, Гс (для КГ30 это 360 Гс); $\gamma = 2,8$ МГц/Гс – гиромагнитное отношение; ω_0 – циклическая частота.

Коэффициент передачи на резонансной частоте определяется по формуле

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_H}{\dot{Z} + R_H}, \tag{2}$$

где \dot{Z} – полное комплексное сопротивление ЖИГ-резонатора.

В первом приближении можно считать $\omega L_1 \ll R$, и сопротивление параллельного RLC контура на резонансной частоте становится чисто активным, т. е. $\dot{Z} \approx R$, тогда

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{R_H}{R + R_H}, \\
 R &= R_H \left(\frac{1}{K} - 1 \right).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Так как K – нелинейный параметр (см. рис.3), то и R – нелинейное сопротивление. Используя экспериментальные данные (см. рис. 4–6)

$$K(U) = 0,055U^2 - 0,007U + 0,094$$

и формулу (3), получим зависимость $R(U)$:

$$R(U) = R_H \frac{0,906 - 0,055U^2 + 0,007U}{0,094 + 0,055U^2 - 0,007U} . \quad (4)$$

Из (4) можно получить выражение для вольт-амперной характеристики (ВАХ) сопротивления R (рис. 8):

$$I(U) = \frac{U}{R_H} \cdot \frac{0,094 + 0,055U^2 - 0,007U}{0,906 - 0,055U^2 + 0,007U} \quad (5)$$

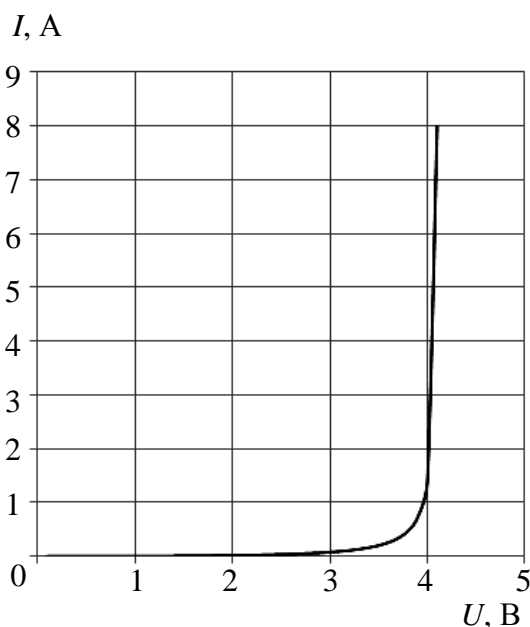


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления R в нелинейной модели ЖИГ-резонатора

Подставляем нелинейное сопротивление (3) в модель резонатора, показанную на рис. 7. В среде *Microwave Office* это можно сделать двумя способами: заданием ВАХ сопротивления кусочно-линейной аппроксимацией или заменой его двумя встречно-параллельными диодами (рис. 9) с такими же, как на рис. 8, характеристиками. Можно подобрать ВАХ диодов так, чтобы они совпадали с ВАХ сопротивления RLC -контура.

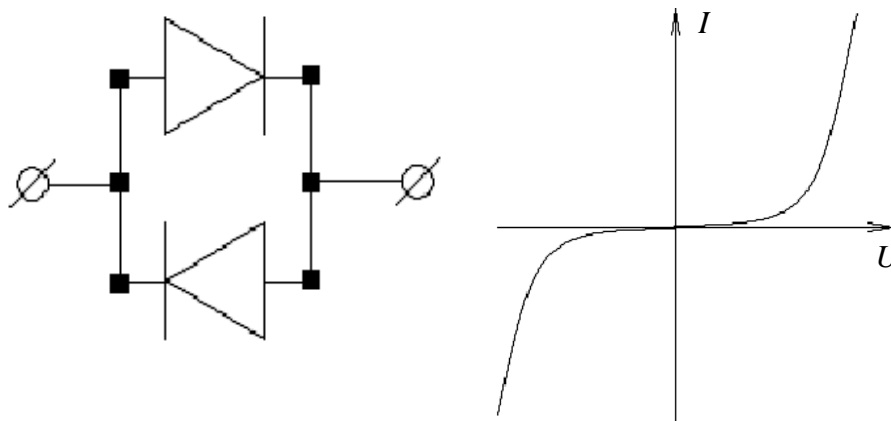


Рис. 9. Два диода, включенные встречно-параллельно и их вольт-амперная характеристика

Таким образом, смоделировано насыщение ЖИГ-резонатора при переходе в нелинейный режим работы на высоких уровнях мощности. Однако, как видно из рис. 6, с в нелинейном режиме работы ЖИГ-резонатора экспериментально наблюдается изменение резонансной частоты. В эквивалентной схеме ЖИГ резонатора величина изменения резонансной частоты от уровня мощности определяется индуктивностью L_1 петли связи. Зависимости $K(f)$ при разных уровнях мощности (от -20 до +20 дБм) показаны на рис. 10. Точкам минимума зависимости $K(f)$ соответствуют значения резонансной частоты ЖИГ-резонатора. Пунктирной линией показано изменение резонансной частоты от уровня мощности, подаваемой на резонатор, которое пересчитано из зависимости $f(U_1)$ (см. рис. 6). Величина индуктивности L_1 петли связи подбирается так, чтобы смещение резонансной частоты при изменении уровня входной мощности в модели совпало с экспериментально полученными данными.

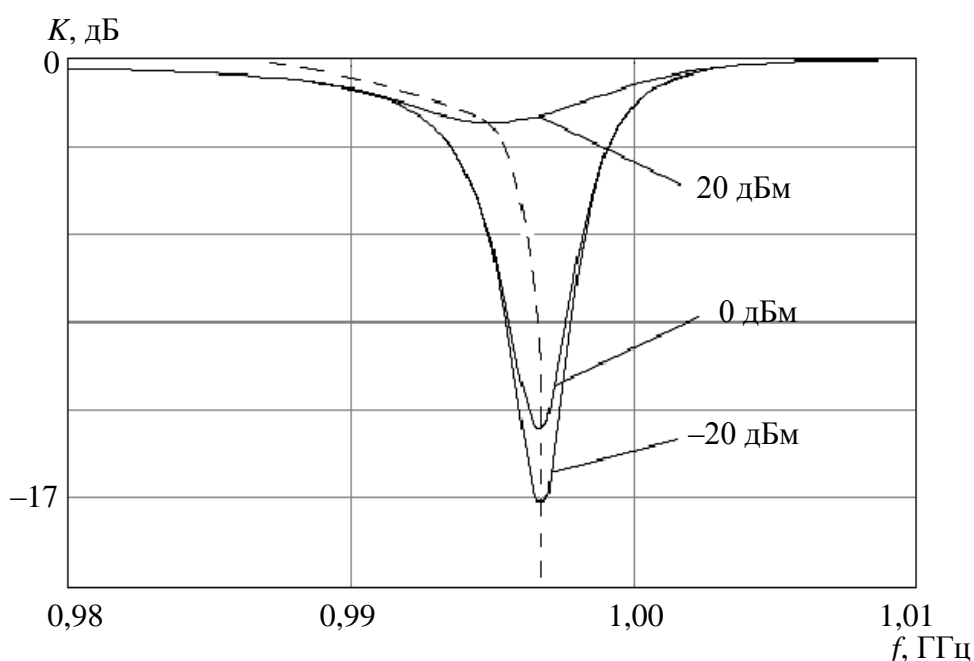


Рис. 10. Зависимость $K(f)$ при разных уровнях мощности

Проведенный расчет в среде *Microwave Office* показывает, что предложенная модель для частоты 1 ГГц достаточно корректно работает в полосе $\pm 10\%$ с точностью методической погрешности измерений параметров ЖИГ-резонатора.

Таким образом, авторами предложена нелинейная модель ЖИГ-резонатора и приведена методика ее расчета. Однако в модели не учтена зависимость коэффициента передачи на частоте ФМР от самой частоты ФМР (от внешнего подмагничивающего поля). Не учтено также и то, что с ростом частоты увеличивается диапазон линейного режима работы ЖИГ-резонатора (растет пороговая мощность [2, 5, 10]), как это видно из рис. 3. Для учета этих эффектов необходимо вводить зависимость величины R не только от напряжения, но и от частоты (с ростом частоты сопротивление должно увеличиваться). К сожалению, в среде *Microwave Office* нет такой возможности. Поэтому приходится ограничиваться узкополосной моделью резонатора, что достаточно для многих практических случаев [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Гетеромагнитная микроэлектроника. Микросистемы активного типа. М. : Наука, 2007. 612 с.
2. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М. : Наука, 2005. 877 с.
3. *Игнатъев А. А., Куликов М. Н., Васильев А. В., Митин И. В.* Экспериментальные исследования возбуждения СВЧ-колебаний в магнитных углеродных нанотрубках на микрополосковых устройствах // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2008. Вып. 3 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 81–85.
4. *Глебов В. А., Глебов А. В., Сафронов Б. В., Шингарев Э. Н.* Кристаллические магнитные материалы // Цветные металлы. 2011. № 1. С. 83–86.
5. *Лакс Б., Баттон К.* Сверхвысокочастотные ферриты и ферримагнетики. М.: Мир, 1965. 675 с.
6. *Гуревич А. Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 588 с.
7. *Ильченко М. Е., Кудинов Е. В.* Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. Киев : Изд-во Киев. ун-та, 1973. 175 с.
8. *Ollivier P. M.* Microwave YIG-tuned transistor oscillator amplifier design : application to C band // IEEE J. of solid-state circuits. February. 1972. Vol. sc-7, № 1. P. 54–60.
9. *Самолданов В. Н., Луконин И. С.* Разработка автогенератора с ЖИГ-резонатором для датчика слабых магнитных полей // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2008. Вып. 5 : Прикладные аспекты микро- и наноэлектроники. С. 35–51.
10. *Моносов Я. А.* Нелинейный ферромагнитный резонанс. М.: Наука, 1971. 376 с.