

Гапончик Р.В., Устинов А.Б.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

Теоретическое исследование нелинейного сдвига частоты СВЧ резонатора на плёнке железо-иттриевого граната

Проведено теоретическое исследование нелинейных колебаний намагниченности пленочного ферромагнитного резонатора с учетом нелинейного затухания. Показано, что нелинейное затухание ограничивает нелинейный сдвиг частоты.

Ключевые слова: железо-иттриевый гранат, резонатор, спиновые волны.

Известно, что собственные гармонического осциллятора колебания без потерь описываются уравнением

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (1)$$

В реальных системах существуют потери, которые в предположении их малости описываются феноменологически путём введения дополнительного слагаемого, учитывающего релаксацию колебаний. Поэтому вынужденные колебания в диссипативных системах описываются уравнением

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = P \cos pt. \quad (2)$$

где δ - параметр релаксации. Если возбуждать колебания в такой системе, периодически воздействуя на неё силой амплитуды « P » и частотой « p », то меняя частоту вынуждающей силы « p », можно наблюдать всем известное явление резонанса.

Увеличение амплитуды колебаний может приводить в реальных системах к возникновению различных нелинейных процессов, например, нелинейного затухания и нелинейного сдвига частоты. В теории нелинейных колебаний нелинейный сдвиг частоты описывается путём введения соответствующего дополнительного слагаемого в уравнение для колебаний (2). В результате уравнение принимает вид [1]:

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x(1 + \gamma x^2) = P \cos pt. \quad (3)$$

где γ - коэффициент нелинейного сдвига частоты. Такое уравнение можно решить методом медленно меняющихся амплитуд и получить резонансные кривые, которые качественно показаны на рис.1(б). Из рисунка видно, что с ростом амплитуды колебаний возникает нелинейный сдвиг частоты. При сравнительно большом сдвиге частоты возможно возникновение бистабильности колебаний.

Увеличение амплитуды колебаний также может приводить к нелинейному затуханию, которое проявляется в увеличении ширины резонансных кривых с ростом амплитуды (см. рис. 1(а)). Для описания этого эффекта вводятся соответствующие слагаемые в уравнение (2). В результате уравнение принимает вид [1]:

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x}(1 + \alpha\dot{x} + \beta\dot{x}^2) + \omega_0^2x = P \cos pt. \quad (4)$$

Ранее, при описании колебаний различных динамических систем, перечисленные нелинейные эффекты изучались по отдельности. Вместе с тем известно, что при изучении нелинейных колебаний намагниченности в пленочных ферромагнитных резонаторах, с ростом амплитуды колебаний нелинейный сдвиг частоты и нелинейное затухание могут существовать одновременно [2].

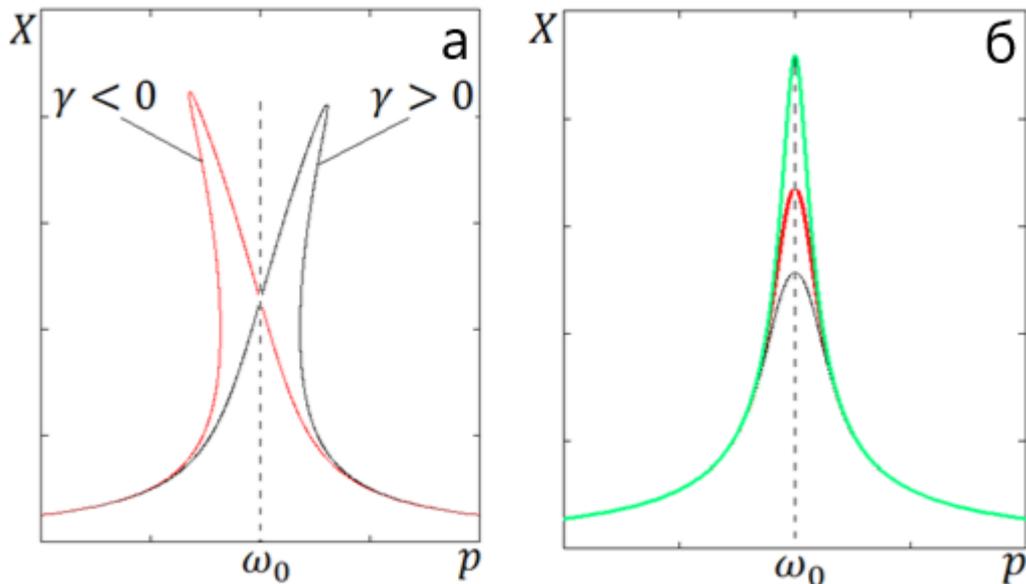


Рис. 1. Резонансные кривые с учетом нелинейного сдвига частоты (а) и с учетом нелинейного затухания (б).

Целью работы являлось теоретическое исследование таких нелинейных колебаний, при которых нелинейный сдвиг частоты и нелинейное затухание в плёночном ферромагнитном резонаторе существует одновременно.

Это уравнение нелинейных колебаний одновременно учитывающее нелинейный сдвиг частоты и нелинейное затухание запишем в виде:

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x}(1 + \alpha x + \beta x^2) + \omega_0^2 x(1 + \gamma x^2) = P \cos pt. \quad (5)$$

Уравнение (5) решалось методом медленно меняющихся амплитуд [1]. В результате было получено следующее выражение для расчета резонансных кривых:

$$p^2 = \omega_0^2 \left(1 + \frac{3}{4}\gamma A^2\right) - 2\delta^2 \left(1 + \frac{3}{4}\beta A^2\right)^2 \pm \sqrt{\frac{P^2}{A^2} + \left[2\delta^2 \left(1 + \frac{3}{4}\beta A^2\right)^2 - \omega_0^2 \left(1 + \frac{3}{4}\gamma A^2\right)\right]^2 - \omega_0^2 \left(1 + \frac{3}{4}\gamma A^2\right)^2}. \quad (6)$$

Результаты расчёта резонансных кривых по выражению (6) показаны на рис.2. Из графиков видно, что полученное выражение действительно учитывает одновременно нелинейный сдвиг частоты и нелинейное затухание. Нелинейное затухание приводит к уширению резонансной кривой, а нелинейный сдвиг частоты приводит к сдвигу максимума амплитуды колебаний.

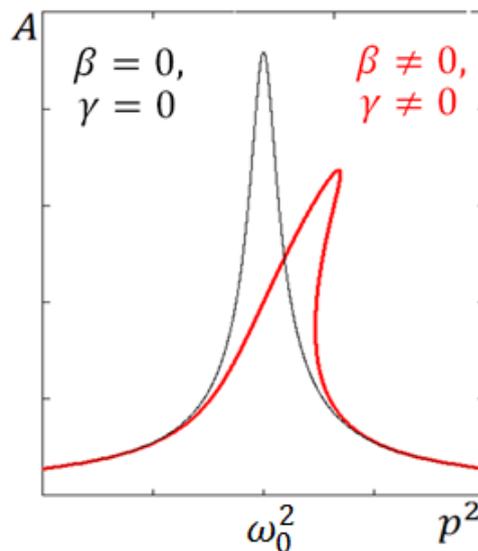


Рис. 2. Результат моделирования резонансных кривых при нулевых и ненулевых коэффициентах нелинейного затухания и нелинейного сдвига частоты.

На рис. 3 показаны результаты расчетов для типичных значений параметров ферромагнитного резонатора, изготовленного из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Моделирование было проведено для следующих параметров: толщина пленки ЖИГ 7 мкм, стороны резонатора 1 мм, намагниченность насыщения плёнки 1750 Э, магнитное поле 1800 Э.

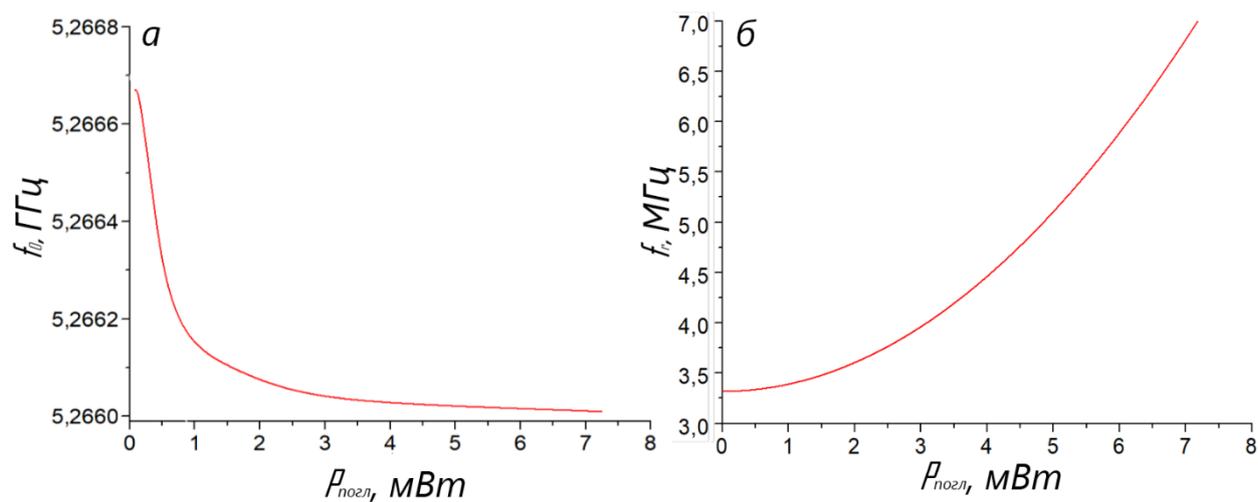


Рис. 3. Зависимости резонансной частоты (а) и частоты релаксации (б) от поглощённой мощности.

Проведенное исследование показывает, что уравнение (5) позволяет описать влияние нелинейного затухания на нелинейный сдвиг частоты колебаний намагниченности резонаторов на основе пленок ЖИГ.

Библиографический список

1. Мигулин, В. В. Основы теории колебаний [Текст] / В. В. Мигулин. – М.: Наука. – 1978. – 392 с.
2. Дроздовский, А. В. Нелинейный отклик пленочного ферромагнитного резонатора в условиях нелинейного затухания колебаний намагниченности [Текст]: Письма в ЖТФ / А. В. Дроздовский, А. Б. Устинов. – 2010. – том 36, вып. 18. – 7с.