

УДК 537.874; 537.624

## АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ

В. С. Власов<sup>1</sup>, Д. А. Плешев<sup>1</sup>, В. Г. Шавров<sup>2</sup>, В. И. Щеглов<sup>2</sup><sup>1</sup> Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,  
167001, Сыктывкар, Октябрьский пр-т, 55<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им В.А.Котельникова РАН,  
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 9 апреля 2019 г.

**Аннотация.** Рассмотрены колебания намагниченности в нормально намагниченной тонкой пластине, обладающей магнитоупругими свойствами, происходящие под воздействием амплитудно модулированного переменного поля. В качестве главного предмета рассмотрения избраны амплитудно-частотные характеристики магнитных и упругих колебаний в широком диапазоне частот. Получены уравнения движения для намагниченности и упругого смещения, а также граничные условия на поверхностях пластины. Приведен закон изменения во времени переменного поля, амплитуда которого модулирована синусоидальным сигналом. Выполнено решение полученной системы уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка, в результате чего построены амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности и упругого смещения в широком диапазоне частот. Рассмотрена общая структура амплитудно-частотных характеристик в линейном режиме возбуждения. Показано, что в условиях модуляции характеристики тех и других колебаний имеют трехлепестковый вид, представляющий собой совокупность максимума на центральной (несущей) частоте и двух боковых максимумов, отстоящей от основного на частоту модуляции. Рассмотрено соотношение амплитуд магнитных и упругих колебаний в случае круговой и линейной поляризации переменного поля. Отмечено, что в случае линейной поляризации колебания являются эллиптическими, причем эллипс оказывается

повернутым относительно исходной поляризации на 90 градусов. Рассмотрено изменение амплитудно-частотных характеристик магнитных и упругих колебаний при изменении толщины магнитной пластины. Показано, что в линейном режиме резонансные колебания намагниченности выделяют упругие колебания, приводя к увеличению их амплитуды при совпадении резонансных частот тех и других колебаний. Рассмотрены амплитудно-частотные характеристики магнитных и упругих колебаний в трех установленных ранее в работе [12] основных режимах амплитуды возбуждения: линейном (№1), умеренно нелинейном (№2) и сильно нелинейном (№3). Показано, что геометрически правильный трехлепестковый характер тех и других характеристик имеет место только в режиме линейных колебаний (режим №1). При малом уровне нелинейности (режим №2) характеристика магнитных колебаний имеет вид скошенного треугольника, а характеристика упругих колебаний имеет трехлепестковый изрезанный вид. При среднем уровне возбуждения (режим №2) характеристика упругих колебаний, кроме основного максимума на частоте в окрестности ферромагнитного резонанса, приобретает дополнительный максимум, лежащий по частоте примерно вдвое выше и имеющий амплитуду того же порядка, что и основной. При высоком уровне возбуждения (режим №3) характеристики как магнитных, так и упругих колебаний приобретают сильно изрезанный близкий к хаотическому вид, причем ограничение их по частоте отсутствует. Отмечено, что в режиме умеренного и сильного возбуждения степень изрезанности характеристик как магнитных, так и упругих колебаний при изменении шага по частоте не меняется, что говорит об их четко выраженном фрактальном характере. Отмечена решающая роль сигнала модуляции в формировании амплитудно-частотных характеристик. В рамках режима умеренной нелинейности (режим №2) выполнено сравнение характеристик для магнитных и упругих колебаний в отсутствие модуляции и при ее наличии. Показано, что в отсутствие модуляции характеристика для магнитных колебаний имеет вид скошенного треугольника с плавной огибающей, а характеристика упругих колебаний имеет сильно

выраженный пик на частоте упругого резонанса. При наличии модуляции характеристика для магнитных колебаний возрастает на 20% и более, приближаясь в своей верхней части к единице. При этом на характеристике упругих колебаний появляются два сильно изрезанных подъема, первый из которых имеет трехлепестковый характер и располагается в окрестности частоты ферромагнитного резонанса, а второй – на частоте примерно в два раза более высокой, причем амплитуды обоих подъемов превышают амплитуду в отсутствие модуляции на два порядка. В присутствии модуляции как магнитная, так и упругая характеристики приобретают сильную изрезанность хаотического вида. Рассмотрено влияние поперечной составляющей постоянного поля на амплитудно-частотные характеристики магнитных и упругих колебаний. Показано, что амплитудно-частотные характеристики для магнитных колебаний во всех трех режимах при включении поперечного поля практически не меняются. При этом амплитудно-частотные характеристики для упругих колебаний при включении поперечного поля в режиме линейного (режим №1) и в режиме умеренно нелинейного (режим №2) возбуждения возрастают на порядок и более. Рассмотрено влияние расстройки между частотой модуляции и частотой упругого резонанса пластины. Показано, что амплитудно-частотные характеристики к изменению частоты модуляции значительно менее чувствительны, чем сами колебания и их спектры. Кратко перечислены основные задачи, следующие из проведенного рассмотрения, могущие составить предмет для дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** магнитоупругое взаимодействие, нелинейные колебания, амплитудно-частотные характеристики.

**Abstract.** It is investigated the oscillations of magnetization in normal magnetized thin ferrite plate having magnetoelastic properties which is subjected to influence of amplitude modulated alternating field. As a main subject of investigation it is chose the amplitude-frequency characteristics of magnetic and elastic oscillations in broad frequency region. It is found the equations of motion for magnetization and elastic displacement and also boundary conditions on the plate surfaces. It is found the low

of changing in time of alternating field which having amplitude modulated by sine signal. The obtained equation system is executed by fourth order Runge-Kutta method. As a result was found the amplitude-frequency characteristics of magnetization and elastic oscillations in broad frequency region. It is investigated the general structure of amplitude-frequency characteristics in linear regime of excitation. It is shown that in modulation conditions the characteristics both oscillations have three-petal structure consist of combination of maximum on central (carrying) frequency and two lateral maxima taken away from main maximum on the modulation frequency. It is investigated the correlation between the amplitudes both magnetic and elastic oscillations in the case of circular and linear polarization of alternating field. It is established that in the case of linear polarization the oscillation are elliptical and ellipse is turned relatively to initial polarization on the angle equal to 90 degree. It is investigated the changing of amplitude-frequency characteristics both magnetic and elastic oscillations by the variation of magnetic plate thickness. It is shown that in linear regime the resonance oscillations of magnetization select the elastic oscillations and bring to increase of its amplitude when resonance frequencies of both oscillations are equal one to another. It is investigated the amplitude-frequency characteristics of magnetic and elastic oscillations in three established earlier in paper [12] fundamental regimes of excitation amplitude: linear (№1), moderate nonlinear (№2) and strong nonlinear (№3). It is shown that the geometrically correct three-petal character of both amplitude-frequency characteristics takes place only in linear oscillations regime (regime №1). In the case of small level of nonlinearity (regime №2) the amplitude-frequency characteristic of magnetization has the appearance of oblique triangle and amplitude-frequency characteristic of elastic oscillations has three-petal indented form. In the case of middle excitation level (regime №2) amplitude-frequency characteristic of elastic oscillations besides to main maximum on the ferromagnetic resonance frequency has also addition maximum which is disposed in two-multiplied frequency and having the same amplitude as main maximum. In the case of high level of excitation (regime №3) the amplitude-frequency characteristics both magnetic and elastic oscillations

have strong indented near to chaotic form and the limitation of frequency is absent. It is established that in middle and large excitation regimes the degree of intended of amplitude-frequency characteristics both magnetic and elastic oscillations when the step on frequency is varied is not changed. This circumstance testifies its fractal character. It is established the decisive role of modulation signal in formation of amplitude-frequency characteristics. In the frame of middle nonlinear regime (regime №2) it is made the comparison of amplitude-frequency characteristics for magnetic and elastic oscillations between two cases: when modulation is present and modulation is absent. It is shown that when modulation is absent the amplitude-frequency characteristics for magnetization has form of oblique triangle with smooth rounding and amplitude-frequency characteristic for elasticity has strong peak on the frequency of elastic oscillations resonance. When the modulation is in presence the characteristic of magnetic oscillations increases on 20% and more and it approach in its upper part to unit. In this case on the characteristic for magnetic oscillations it is appeared two high intended peaks. First of these peaks has three-petal character and is located near the frequency of ferromagnetic resonance. Second of these peaks is located on the frequency which is in twice of first peak. The amplitudes of these peaks are equal to each other. When the modulation is in presence the magnetic and elastic characteristics have high intended which has chaotic view. It is investigated the influence of transverse component of constant magnetic field on amplitude-frequency characteristics of magnetic and elastic oscillations. It is shown that the amplitude-frequency characteristics for magnetic oscillations in all three regimes in the case of transverse field is in presence are not changed. In this case the amplitude-frequency characteristics for magnetic oscillations in the case of transverse field is in presence in linear (regime №1) and partly in moderate nonlinear (regime №2) regime of excitation are increased to order and more. It is investigated the influence of disorganization between frequency of modulation and frequency of elastic resonance of plate. It is shown that amplitude-frequency characteristics to the changing of modulation frequency are smaller in sensitivity then oscillations itself and its spectra.

In brief is enumerated the essential tasks which are followed from described investigation and may be serve objects for further investigations.

**Key words:** magnetoelastic interaction, nonlinear oscillations, amplitude-frequency characteristics.

## Введение

Возбуждение гиперзвука с использованием магнитострикционных преобразователей находит широкое применение во многих областях науки и техники [1, 2]. Особенно перспективным материалом для таких преобразователей является железоиттриевый гранат (ЖИГ), который лежит в основе генераторов гиперзвука до частот порядка десяти и более гигагерц и линий задержки со временами задержки до 40 мксек [3-7].

В работе [8] показано, что использование геометрии нормально намагниченной тонкой пластины, в сравнении с другими традиционными геометриями магнитострикционного преобразователя [1-4], позволяет увеличить мощность возбуждаемых гиперзвуковых колебаний на два порядка и более. В работах [9-11] аналогичная возможность продемонстрирована для двухслойной структуры.

В работе [12] для той же геометрии показана возможность эффективного детектирования амплитудно-модулированного сигнала, то есть выделения в чистом виде сигнала модуляции. Выявлены два возможных варианта детектирования – первого и второго порядка, различающиеся продольной и поперечной поляризацией упругих колебаний по толщине магнитной пластины. Главное внимание уделено детектированию второго порядка. Приведены развертки во времени магнитных и упругих колебаний при различных уровнях переменного поля. В соответствии с уровнем возбуждения выделены три режима. Режим №1 – линейный, при котором упругие колебания пластины происходят точно на частоте переменного поля. Режим №2 – умеренно нелинейный, при котором в пластине возбуждаются интенсивные упругие колебания на частоте модуляции, то есть происходит эффективное

детектирование исходного сигнала. Режим №3 – сильно нелинейный, при котором колебания намагниченности становятся неустойчивыми, амплитуда упругих колебаний растет, однако протектированный сигнал теряет чистоту, обогащаясь гармониками. Показано, что выделение частоты модуляции при детектировании происходит за счет квадратичности продольной компоненты намагниченности. Отмечен факт резкого увеличения упругого смещения при достаточно высоком уровне возбуждения, интерпретированный как механическое разрушение магнитной пластины. Рассмотрен ряд особенностей процесса детектирования, таких как нестационарная задержка и возбуждение квазихаотических колебаний. Кратко перечислены основные задачи, следующие из проведенного рассмотрения, могущие составить предмет для дальнейших исследований.

Однако, несмотря на выполненное в работе [12] довольно подробное исследование процесса детектирования, ряд вопросов остался вне поля зрения этой работы. Так, все исследование базируется на рассмотрении разверток магнитных и упругих колебаний во времени, тогда как частотным свойствам уделено значительно меньше внимания.

Настоящая работа является продолжением и дополнением исследований, выполненных в работе [12], причем на этот раз главное внимание уделяется амплитудно-частотным характеристикам возбуждения магнитных и упругих колебаний в широком диапазоне частот.

## **1. Геометрия, основные уравнения и параметры задачи**

Общая постановка задачи совпадает с принятой в работе [12]. Приведем здесь основные ее положения.

Геометрия задачи показана на рис.1. Плоскопараллельная пластина толщины  $d$ , обладает магнитными, упругими и магнитоупругими свойствами. Материал пластины имеет кубическую кристаллографическую симметрию, плоскость (100) которой совпадает с плоскостью пластины.

Внешнее постоянное магнитное поле  $\vec{H}_0$  приложено перпендикулярно плоскости пластины, переменное магнитное поле  $\vec{h}$  параллельно плоскости

пластины. Задача решается в декартовой системе координат  $Oxyz$ , плоскость  $Oxy$  которой совпадает с плоскостью пластины, а оси  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$  параллельны ребрам куба кристаллографической ячейки. Центр системы координат  $O$  находится в центре пластины, а ее плоскости соответствуют координатам  $z = \pm d/2$ .

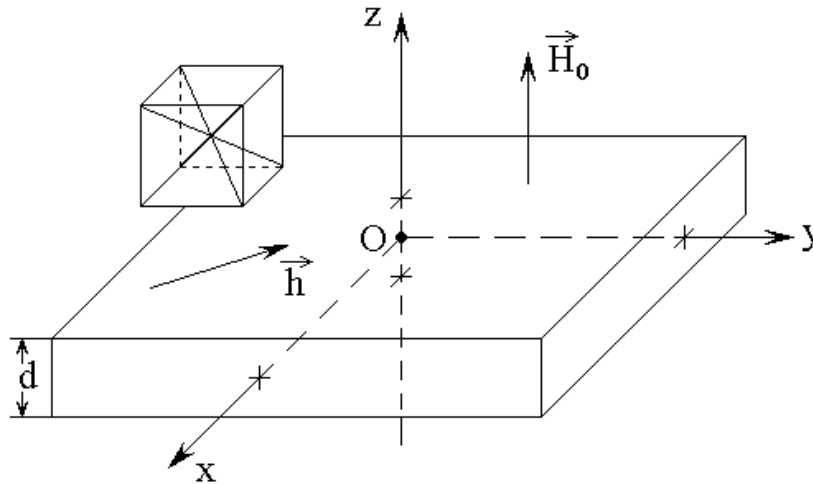


Рис.1. Геометрия задачи. Слева – схема кристаллографической ячейки.

Плотность энергии пластины  $U$  в поле  $\vec{H} = \{h_x; h_y; H_0\}$ , где  $h_{x,y} \ll H_0$ , имеет вид:

$$\begin{aligned}
 U = & -M_0 h_x m_x - M_0 h_y m_y - M_0 H_0 m_z + 2\pi M_0^2 m_z^2 + \\
 & + \frac{1}{2} c_{11} (u_{xx}^2 + u_{yy}^2 + u_{zz}^2) + c_{12} (u_{xx} u_{yy} + u_{yy} u_{zz} + u_{zz} u_{xx}) + \\
 & + 2c_{44} (u_{xy}^2 + u_{yz}^2 + u_{zx}^2) + B_1 (m_x^2 u_{xx} + m_y^2 u_{yy} + m_z^2 u_{zz}) + \\
 & + 2B_2 (m_x m_y u_{xy} + m_y m_z u_{yz} + m_z m_x u_{zx}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

где:  $\vec{m} = \vec{M}/M_0$  – нормированный вектор намагниченности,  $M_0$  – намагниченность насыщения;  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  – константы упругости;  $B_1$ ,  $B_2$  – константы магнитоупругого взаимодействия.

Компоненты тензора деформаций равны:



$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

где  $u_i$  – компоненты упругого смещения при  $i = x, y, z$ ,  $x_i$  – координаты  $x, y, z$ .

Полная система уравнений и граничных условий имеет вид:

уравнения для компонент намагниченности  $m_{x,y,z}$ :

$$\frac{\partial m_x}{\partial t} = - \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} \cdot \left[ (m_y + \alpha m_x m_z) \cdot H_z - (m_z - \alpha m_y m_x) \cdot H_y - \alpha \cdot (m_y^2 + m_z^2) \cdot H_x \right]; \quad (3)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитная постоянная,  $\alpha$  – параметр магнитного затухания, а уравнения для  $m_y$  и  $m_z$  получаются циклической перестановкой  $x, y, z$ ;

уравнения для компонент упругих смещений  $u_{x,y}$ :

$$\frac{\partial^2 u_{x,y}}{\partial t^2} = - 2\beta \frac{\partial u_{x,y}}{\partial t} + \frac{c_{44}}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u_{x,y}}{\partial z^2}, \quad (4)$$

где  $c_{44}$  – константа (модуль) упругости,  $\rho$  – плотность материала пластины,  $\beta$  – параметр упругого затухания;

граничные условия:

$$c_{44} \frac{\partial u_{x,y}}{\partial z} \Big|_{z=\pm d/2} = - B_2 m_{x,y} m_z, \quad (5)$$

где  $B_2$  – константа магнитоупругого взаимодействия.

Входящие в уравнение (3) эффективные поля  $H_{x,y,z}$  имеют вид:

$$H_x = h_x + H_{ax}; \quad (6)$$

$$H_y = h_y + H_{ay}; \quad (7)$$

$$H_z = H_0 - 4\pi M_0 m_z + H_{az}, \quad (8)$$

где  $H_0$  – внешнее постоянное поле,  $h_{x,y}$  – компоненты внешнего переменного поля, а компоненты полей  $H_{ax, ay, az}$  имеют вид:

$$H_{ax} = -\frac{B_2}{M_0} \left[ m_y \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + m_z \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right], \quad (9)$$

при этом  $H_{ay}$  и  $H_{az}$  получаются из (9) циклической перестановкой  $x, y, z$ .

Компоненты переменного поля имеют вид:

$$h_x = h_{0x} \cdot \sin(2\pi f t); \quad (10)$$

$$h_y = -h_{0y} \cdot \cos(2\pi f t). \quad (11)$$

Амплитудная модуляция имеет классический вид:

$$h_x = h_{0x} [1 + A_m \sin(2\pi F t)] \sin(2\pi f t), \quad (12)$$

где  $A_m$  – коэффициент модуляции. Для неискаженной передачи сигнала должно быть  $A_m \leq 1$ .

При расчете использовались параметры материала, типичные для монокристалла ЖИГ:  $4\pi M_0 = 1750$  Гс,  $B_2 = 6.96 \cdot 10^6$  эрг см<sup>-3</sup>,  $c_{44} = 7.64 \cdot 10^{11}$  эрг см<sup>-3</sup>,  $\rho = 5,17$  г см<sup>-3</sup>. Поле  $H_0 = 2750$  Э. При этом частота ферромагнитного резонанса (ФМР) при  $\gamma = 2,8$  МГц Э<sup>-1</sup> равнялась 2800 МГц. Частота сигнала модуляции, кроме особо оговоренных случаев, равнялась 280 МГц, при этом толщина пластины  $d$  равнялась 6,865 мкм, что соответствовало упругому резонансу на частоте модуляции. Амплитуда переменного поля  $h_{0x}$  составляла от 1 до 10000 Э. Коэффициент модуляции  $A_m$  равнялся единице. Параметры затухания магнитной и упругой подсистем были равными:  $\alpha = 0,02$ ,  $\beta = 2 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>.

## 2. Схема получения амплитудно-частотных характеристик

Система уравнений с граничными условиями и принятыми параметрами

(1)-(12), решалась методом Рунге-Кутты [13] в соответствии со схемой, приведенной в [8]. При этом изначально получалось развитие колебаний во времени. Для получения амплитудно-частотных характеристик задавалась начальная частота (на краю диапазона исследуемых частот). На этой частоте рассматривалось развитие колебаний во времени и выполнялась регистрация установившейся амплитуды колебаний в момент времени, превышающий времена релаксации магнитной и упругой систем в несколько раз (обычно – в четыре раза). Полученное значение амплитуды давало точку, соответствующую заданной частоте. После этого производился шаг по частоте и вся процедура повторялась и так далее до конца заданного диапазона частот. Таким образом, получалась совокупность значений установившихся амплитуд, соответствующих заданным с определенным шагом частотам, что и давало амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) исследуемого процесса.

### 3. Общая структура амплитудно-частотных характеристик

Рассмотрим сначала общую структуру амплитудно-частотных характеристик на примере воздействия амплитудно-модулированного переменного поля круговой поляризации с амплитудой 1 Э. Относительно заведомо нелинейной магнитной системы такая амплитуда соответствует чисто линейному режиму колебаний. Упругая система сама по себе является линейной, поэтому для нее значение амплитуды возбуждения не критично.

На рис.2 показаны амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности и упругого смещения. Регистрируются  $x$ -компоненты намагниченности  $m_x$  и упругого смещения  $u_x$ . Верхние два рисунка (а,б) соответствуют отсутствию модуляции, нижние (в,г) – ее наличию. Поляризация переменного поля круговая, амплитуды компонент поля равны:  $h_{0x} = 1\text{Э}$ ,  $h_{0y} = 1\text{Э}$ . Частота переменного поля меняется от нуля до 5000 МГц. Частота модуляции – 500 МГц. Толщина пластины –  $0,6865 \times 2 = 1,3730$  мкм, что соответствует резонансной частоте 1400 МГц.

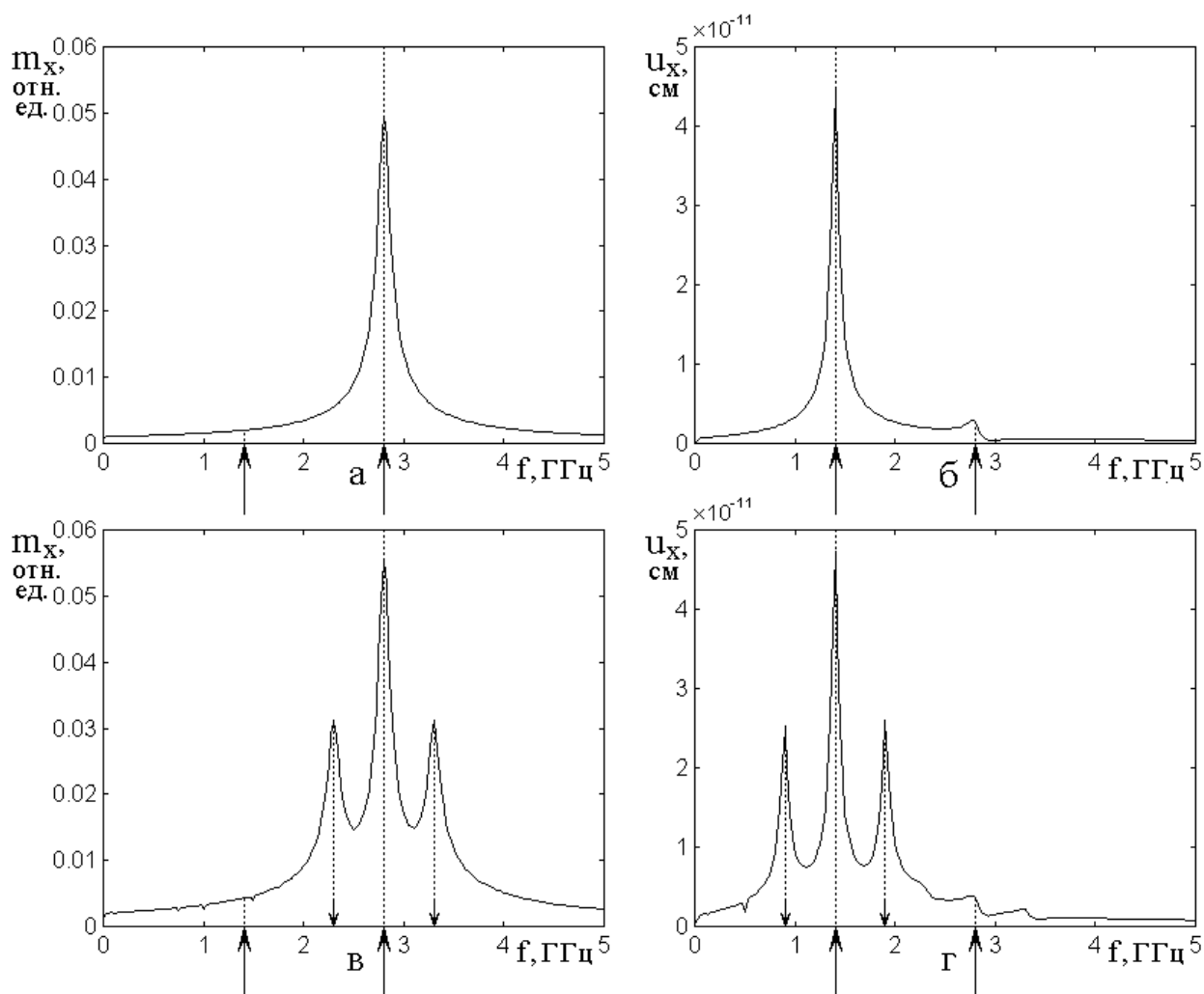


Рис.2. Амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности (а,в) и упругого смещения (б,г) в отсутствие (а,б) и при наличии (в,г) модуляции.

Итак, в левом столбце рисунка (а,в) приведены амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности, в правом столбце (б,г) – амплитудно-частотные характеристики упругого смещения. Вертикальные точечные линии соответствуют характерным частотам. Укрупненными стрелками с нижней стороны горизонтальной оси показаны резонансные частоты магнитной (2800 МГц) и упругой (1400 МГц) систем. Малыми стрелками сверху горизонтальной оси показаны боковые частоты, соответствующие режиму модуляции.

Из рисунка можно видеть, что эти частоты отстоят в обе стороны от частоты резонанса на частоту модуляции. Для магнитной системы эти частоты равны  $2800 - 500 = 2300$  МГц и  $2800 + 500 = 3300$  МГц, а для упругой системы

равны  $1400 - 500 = 900$  МГц и  $1400 + 500 = 1900$  МГц. Амплитуда колебаний как магнитной, так и упругой системы на боковых частотах равна половине амплитуды той же системы на центральной частоте.

Такая структура точно соответствует классическому частотному спектру амплитудно-модулированного сигнала, для которого центральная частота является несущей, а боковые частоты расположены по обе стороны от несущей на расстоянии, равном частоте модуляции [14-16]. Равенство амплитуд боковых частот половине амплитуды центральной частоты также соответствует классике.

Такой обратный падающему сигналу характер структуры амплитудно-частотной характеристики обусловлен тем, что в процессе плавного изменения частоты модулированного сигнала сначала на частоту резонансной системы попадает одна боковая частота, затем несущая, после чего – вторая боковая частота. При этом каждое такое «попадание» сопровождается резким увеличением амплитуды вынужденных колебаний за счет резонанса, так что получающаяся амплитудно-частотная характеристика повторяет частотный спектр падающего сигнала. То есть магнитная и упругая системы, каждая за счет собственного резонанса, выступают в качестве «анализатора спектра» падающего сигнала.

Из несколько более подробного рассмотрения рис. 2 можно видеть, что на магнитной характеристике (а,в) наличие упругого резонанса никак не сказывается: какие-либо особенности на частоте 1400 МГц отсутствуют. Однако на упругой характеристике (б,г) в обоих случаях на частоте магнитного резонанса 2800 МГц имеется небольшой подъем. То есть упругий резонанс на магнитном никак не сказывается, тогда как магнитный на упругом, хотя и в небольшой степени, но воздействие все же оказывает.

Можно полагать, что такое различие в поведении магнитных и упругих колебаний обусловлено тем обстоятельством, что магнитные колебания возбуждаются непосредственно переменным полем, тогда как упругие колебания возбуждаются тем же полем через посредство поля магнитного.

Связь между магнитной и упругой системами осуществляется через эффект магнитострикции, так что воздействие переменного поля на магнитную систему за счет такого «посредника» получается ослабленным. При этом в воздействии магнитной системы на упругую «посредник» получается задействованным один раз, тогда как в воздействии упругой на магнитную – два раза (то есть поле сначала раскачивает намагниченность, которая затем раскачивает упругое смещение, после чего упругое смещение в свою очередь дополнительно раскачивает намагниченность). Такое двухступенчатое воздействие намагниченности на саму себя в силу двукратного ослабления не может ее изменить в заметной степени, тогда как намагниченность воздействует на упругое смещение только одноступенчатым образом, результате чего оно в какой-то степени меняется.

#### **4. Влияние поляризации возбуждающего поля**

В работе [12] установлено, что решающую роль в успешной реализации эффекта детектирования играет линейная поляризация возбуждающего поля. При круговой поляризации детектирование также имеет место, однако амплитуда протектированного сигнала по сравнению со случаем линейной поляризации падает более чем на два порядка. Рассмотрим, как сказывается поляризация переменного поля на эффективности возбуждения магнитных и упругих колебаний, для чего обратимся к таблице №1, где приведены координатные составляющие амплитуд магнитных и упругих колебаний при различных режимах возбуждения. При построении таблицы использовались те же параметры задачи, что при построении рис.2. Амплитуды регистрировались по основной частоте, при этом амплитуды боковых частот всегда оставались равными половине амплитуды колебаний на основной частоте.

Из таблицы можно видеть, что максимальная амплитуда тех и других колебаний имеет место при круговой поляризации (строка 1), когда амплитуды возбуждающего поля по обеим координатам одинаковы. При этом амплитуды как магнитных, так и упругих колебаний по обеим координатам также между собой равны.

**Таблица №1.** Амплитуды магнитных и упругих колебаний при различных режимах возбуждения.

N	$h_{0x}$ , Э	$h_{0y}$ , Э	$m_x$ , отн.ед.	$m_y$ , отн.ед.	$u_x$ , см	$u_y$ , см
1	1	1	0,055	0,055	$4,7 \cdot 10^{-11}$	$4,7 \cdot 10^{-11}$
2	1	0	0,028	0,028	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$
3	0	1	0,028	0,028	$3,2 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$

В случае линейной поляризации (строки 2 и 3) амплитуда магнитных колебаний по сравнению со случаем круговой поляризации падает в два раза, причем падение по обеим координатам является одинаковым, так что поляризация возбуждаемых магнитных колебаний остается круговой. При этом сумма амплитуд по обеим составляющим как раз равна амплитуде для случая круговой поляризации.

Амплитуда упругих колебаний в случае линейной поляризации также уменьшается, однако по разным координатам в различной степени. При этом амплитуда колебаний по одной из координат превышает амплитуду колебаний по другой координате в два раза, то есть колебания являются эллиптическими с соотношением осей эллипса один к двум. Сумма амплитуд по обеим составляющим (то есть сумма длин осей эллипса), как и для магнитных колебаний, равна амплитуде для случая круговой поляризации. Ориентация осей эллипса такова, что большей амплитуде переменного поля соответствует меньшая ось эллипса, а меньшей – большая, то есть эллипс как бы оказывается повернутым относительно исходной поляризации на 90 градусов.

Можно полагать, что такой поворот большой оси эллипса относительно большей компоненты переменного поля происходит благодаря сочетанию магнитной гиротропии среды с анизотропным характером ее упругой и магнитоупругой составляющих.

**Замечание.** Подобный поворот преимущественных ориентаций компонент колебаний по разным осям отмечается также для чисто магнитных колебаний в случае прецессии положения равновесия [17, гл.9, 10]. Такой поворот особенно хорошо наблюдается при анализе параметрических портретов колебаний и проявляется в несовпадении ориентации сгущений малых колец относительно поляризации возбуждающего поля. Для интерпретации поворота предложены энергетическая и векторная модели, так что можно полагать, что построение подобных моделей объяснит и поворот осей эллипса в рассматриваемом здесь случае. Следует заметить, что в работе [17] описаны чисто магнитные колебания, тогда как здесь важнейшее значение приобретает упругая составляющая. Рассмотрение магнитоупругих свойств прецессии положения равновесия, выполненное в работе [18], не дает исчерпывающего ответа на поставленный вопрос. Авторы оставляют более подробное исследование поворота осей эллипса, в том числе на основе анализа параметрических портретов с построением соответствующих моделей, в качестве задачи для отдельного исследования.

## **5. Зависимость амплитудно-частотных характеристик от толщины пластины**

Рассмотрим сначала, как меняются амплитудно-частотные характеристики возбуждения магнитных и упругих колебаний при изменении толщины магнитной пластины. Как отмечено в разделе 3, магнитные колебания влиянию упругих не подвержены, так что амплитудно-частотная характеристика колебаний намагниченности от толщины пластины не зависит. Это обстоятельство было проверено в широком диапазоне изменения толщины и получило свое полное подтверждение, так что здесь рассматриваются колебания только упругие. Из рис.2б и рис.2г видно, что как в отсутствие, так и при наличии модуляции амплитудно-частотная характеристика для упругих колебаний имеет два явно выраженных максимума: один большой, соответствующий колебаниям на частоте упругого резонанса (в случае модуляции – с боковыми частотами) и другой – малый, соответствующий



колебаниям на частоте ферромагнитного резонанса. Первая частота при изменении толщины пластины меняется, при этом меняется и амплитуда колебаний на этой частоте. Вторая частота всегда остается постоянной, однако амплитуда упругих колебаний на ней также меняется.

Обратимся теперь к рис.3, где показаны зависимости от толщины пластины частоты и амплитуды упругих колебаний в обоих отмеченных случаях.

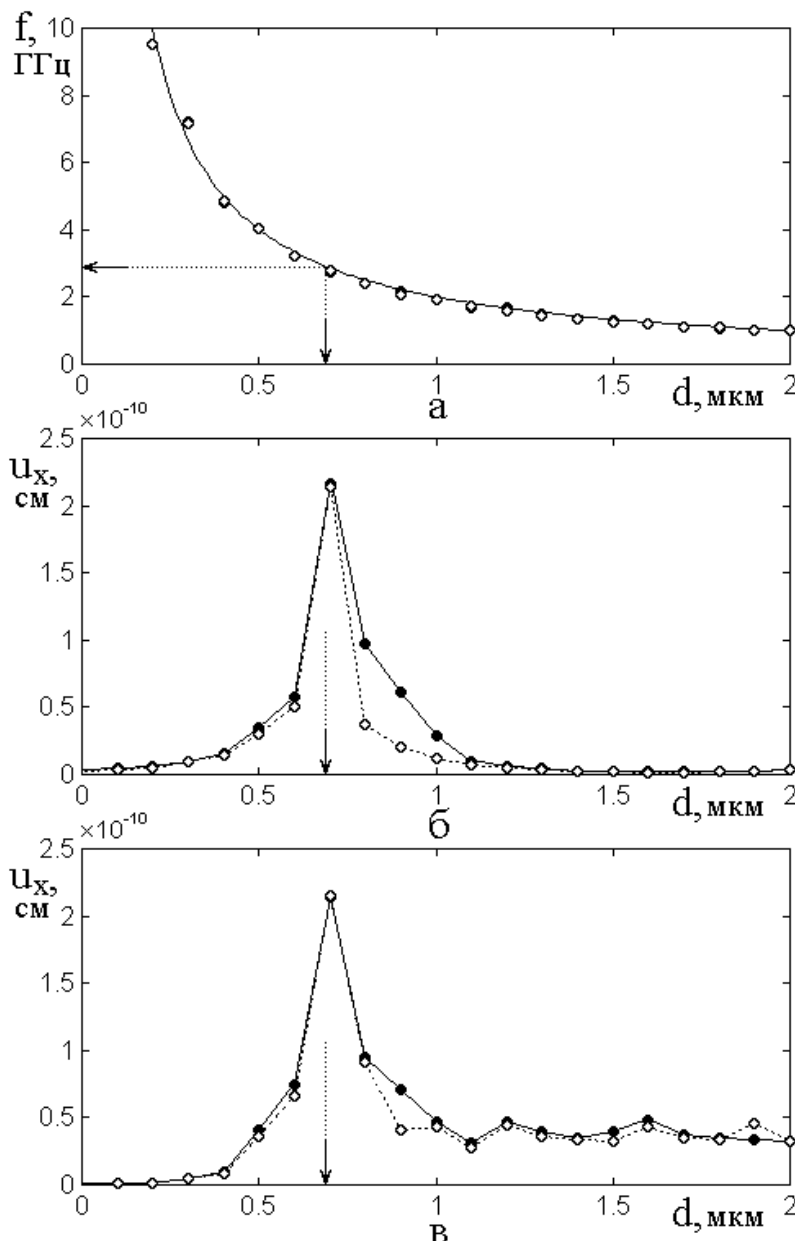


Рис.3. Частота (а) и амплитуда (б,в) упругих колебаний при изменении толщины пластины.

а – резонансная частота упругих колебаний; б – амплитуда упругих колебаний на частоте ферромагнитного резонанса (2800 МГц); в – амплитуда упругих колебаний на частоте упругого резонанса (определяемой толщиной пластины).

На рис.3 сплошные точки и сплошные линии соответствуют наличию модуляции, открытые точки и пунктирные линии соответствуют отсутствию модуляции. Точки – результаты машинного эксперимента при круговой поляризации возбуждающего поля  $h_{0x} = 1Э$ ,  $h_{0y} = 1Э$  (колебания линейные). Остальные параметры представлены в разделе 1. Линии на рис.3б и рис.3в выполнены в виде отрезков прямых, соединяющих измеренные точки. Сплошные линии – при наличии модуляции, пунктирные – в ее отсутствие. Стрелкой на горизонтальной оси отмечена толщина пластины, соответствующая резонансу на частоте 2800 МГц (0,6865 мкм). Стрелка на рис.3а на вертикальной оси слева соответствует частоте резонанса при толщине пластины 0,6865 мкм (2800 МГц). Кривая на рис.3а построена по формуле:

$$f = 2/d, \quad (13)$$

где частота  $f$  измеряется в ГГц, толщина  $d$  – в мкм.

Из рис.3а можно видеть, что частота упругого резонанса пластины зависит от толщины обратно пропорциональным образом, что полностью соответствует классическим представлениям [19]. При этом какое-либо различие между случаем отсутствия и наличия модуляции не наблюдается.

Кривые на рис.3а соответствуют частоте ферромагнитного резонанса, то есть все точки измерены на частоте 2800 МГц (второй из отмеченных выше случаев, малый пик на кривых рис.2б и рис.2г). Кривые на рис.3в соответствуют частоте упругого резонанса, то есть частоты точек по мере изменения толщины меняются в соответствии с зависимостью, приведенной на рис.3а (первый из отмеченных выше случаев, большой пик центральной частоты на кривых рис.2б и рис.2г).

Из рис.3б и рис.3в можно видеть, что амплитуда упругих колебаний в обоих случаях резко возрастает при толщине, соответствующей первой моде упругого резонанса на частоте 2800 МГц (рис.3а). Эта частота задается условиями ферромагнитного резонанса, которая при постоянном поле  $H_0$  равном 2750 Э, намагниченности насыщения  $4\pi M_0 = 1750$  Гс и

гиромагнитной постоянной  $\gamma = 2,8$  МГц/Э в случае нормально намагниченной пластины равна [20-22]:

$$f_{res} = \gamma(H_0 - 4\pi M_0), \quad (14)$$

то есть  $f_{res} = 2800$  МГц. При этом зависимости амплитуды упругих колебаний от толщины при включении модуляции хотя и меняются (точечные кривые идут несколько ниже сплошных), однако такое различие довольно незначительно. В общем случае некоторое различие обусловлено тем, что в отсутствие модуляции на резонансную кривую ферромагнитного резонанса накладывается только одна кривая упругого резонанса, тогда как при наличии модуляции таких кривых накладывается три, что обуславливает более сложное взаимодействие тех и других кривых.

Таким образом, можно сделать вывод, что в линейном режиме резонансные колебания намагниченности выделяют упругие колебания, приводя к увеличению их амплитуды при совпадении резонансных частот тех и других колебаний, причем такое выделение от модуляции не зависит. При этом обратное воздействие упругих колебаний на магнитные отсутствует, тогда как прямое воздействие магнитных на упругие имеет место всегда, даже при несовпадении резонансных частот тех и других колебаний.

## **6. Амплитудно-частотные характеристики при высоком уровне возбуждения**

В предыдущих разделах настоящей работы рассмотрены особенности амплитудно-частотных характеристик магнитных и упругих колебаний в условиях, когда амплитуда возбуждения является достаточно малой по сравнению с намагниченностью насыщения материала пластины ( $h_{0x} = 1$  Э,  $h_{0y} = 1$  Э при  $4\pi M_0 = 1750$  Гс). Однако в работе [12] установлено, что развитие во времени колебаний магнитоупругой системы при воздействии амплитудно-модулированного переменного поля существенным образом зависит от уровня возбуждения. По мере увеличения амплитуды переменного поля выделены три режима колебаний. Режим №1 – линейный. Упругие

колебания пластины при любой ее толщине происходят точно на частоте переменного поля. Режим №2 – умеренно нелинейный. При точной настройке толщины пластины на частоту сигнала модуляции, в пластине возбуждаются интенсивные упругие колебания на частоте модуляции. Режим №3 – сильно нелинейный. Колебания намагниченности становятся неустойчивыми, приобретая хаотический характер, а амплитуда упругих колебаний на частоте модуляции возрастает, достигая порога механического разрушения пластины.

Обратимся теперь к рассмотрению амплитудно-частотных характеристик магнитных и упругих колебаний в условиях значительной амплитуды возбуждения. Для соблюдения с преемственностью результатов, полученных в работе [12], примем те же условия возбуждения, то есть положим частоту модуляции равной 280 МГц, а толщину пластины равной 6,865 мкм, что соответствует упругому резонансу на частоте модуляции. Поляризацию возбуждающего поля положим линейной, то есть  $h_{0x} > 0$ ,  $h_{0y} = 0$ . Остальные параметры оставим прежними (раздел 1), а амплитуду возбуждения будем менять ступенчатым образом такими же шагами, как и в работе [12].

На рис.4 представлены амплитудно-частотные характеристики магнитных (а) и упругих (б) колебаний при различных амплитудах возбуждающего поля, тех же что в работе [12]. На рисунке, в отличие от принятых в работе [12, рис.4] буквенных обозначений, соответствующих различным амплитудам возбуждения, введены цифровые, следующие в том же порядке. Для удобства дальнейшего обращения номера характеристик будут снабжаться буквами, соответствующими буквенным обозначениям рис.4, то есть магнитные – 1а, 2а, 3а и т. д., упругие – 1б, 2б, 3б и т.д.

Из рис.4 можно видеть, что те и другие характеристики имеют весьма сложный, часто переплетающийся характер.

Для магнитных колебаний трехлепестковый характер, подобный приведенному на рис.2в, сохраняется только при самом низком уровне возбуждения (кривая 1а), причем даже в этом случае отдельные лепестки характеристики заметно наклоняются в сторону высоких частот.

Характеристики 2а, 3а, 4а по частоте сначала плавно возрастают, а пройдя через максимум, резко обрываются вниз, то есть имеют вид треугольника, наклоненного в сторону высоких частот, что соответствует расстроечному механизму ограничения амплитуды магнитных колебаний [22, 8-11].

Амплитуда последующих характеристик для намагниченности при увеличении уровня возбуждения растет нелинейным образом, стремясь к насыщению, то есть  $m_x$  стремится к единице во всем диапазоне частот (что ограничивается сохранением нормированной длины вектора намагниченности). Характеристики 7а, 8а, 9а, 10а уже почти во всем диапазоне частот приближаются к единице, причем их характер становится сильно изрезанным. Однако по мере увеличения уровня возбуждения изрезанность этих кривых заметно уменьшается, что связано с усилением их стремления к единице, к которой они прижимаются все теснее и ближе.

Упругие характеристики в низкочастотной области повторяют трехлепестковый характер, соответствующий структуре амплитудно-модулированного сигнала (несущая частота, сопровождаемая двумя боковыми), подобный приведенному на рис.2г, хотя здесь «повторение» с повышением уровня возбуждения значительно ухудшается и для кривых 8б, 9б, 10б практически сходит на нет. Характеристики 1б, 2б, 3б, 4б в известной степени повторяют подобные характеристики для магнитных колебаний 1а, 2а, 3а, 4а, то есть тоже имеют вид скошенного треугольника с резким обрывом в области высоких частот, причем этот обрыв по частоте точно приходится на обрыв подобных характеристик для намагниченности. Однако начиная с характеристики 5б и далее все кривые приобретают сильно изрезанный характер, никак не отвечающий соответствующим характеристикам для намагниченности. При этом изрезанность по мере увеличения уровня возбуждения также увеличивается (как это можно проследить с учетом логарифмического масштаба), что соответствует увеличению амплитуды самих колебаний.

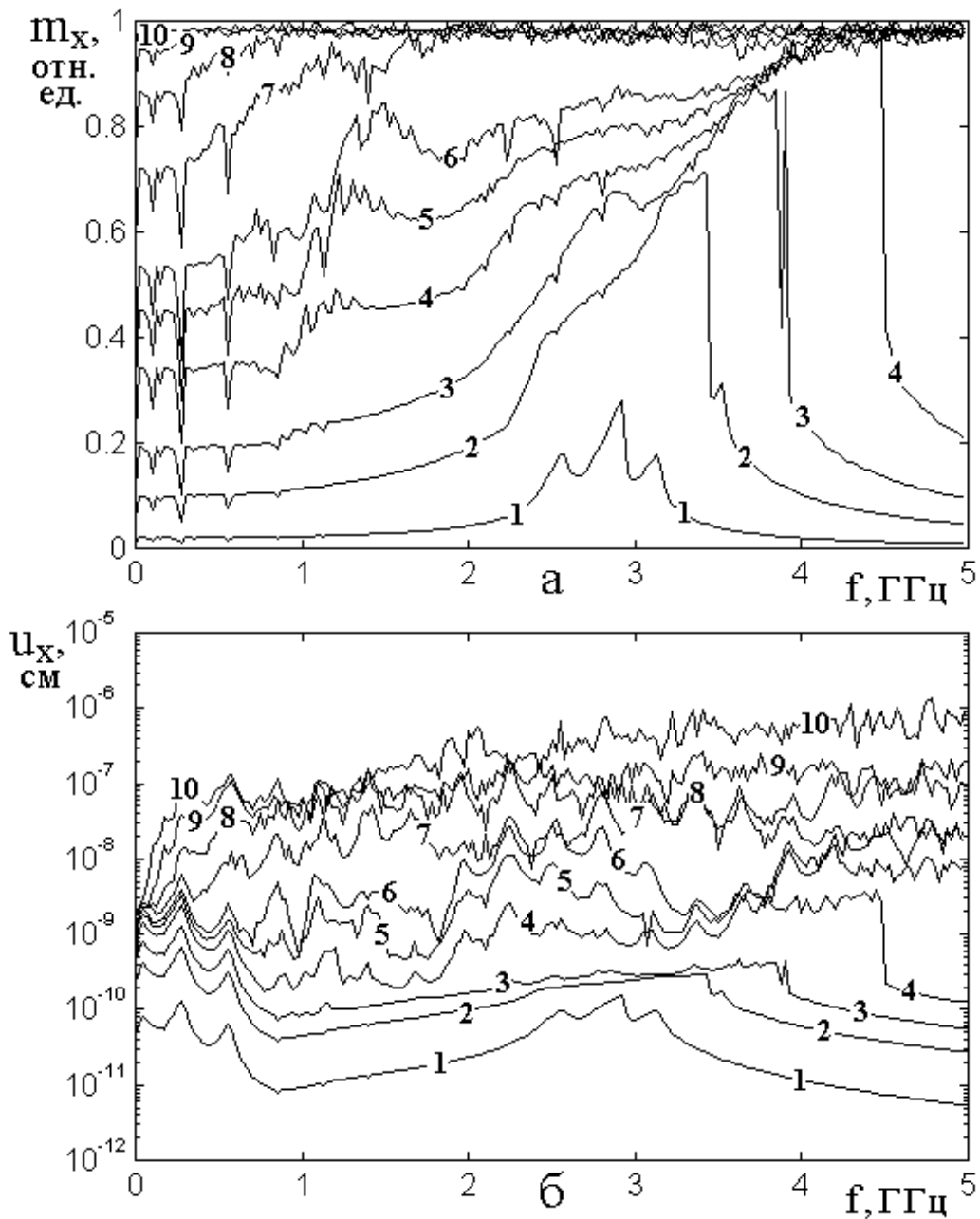


Рис.4. Амплитудно-частотные характеристики магнитных (а) и упругих (б) колебаний при различных амплитудах возбуждающего поля: 1 – 10 Э; 2 – 50 Э; 3 – 100 Э; 4 – 200 Э; 5 – 300 Э; 6 – 400 Э; 7 – 800 Э; 8 – 1600 Э; 9 – 3200 Э; 10 – 6400 Э.

Ввиду крайней сложности обеих частей рис.4, для более подробного выявления характера кривых, приведем их по отдельности (подобно тому, как это было сделано в работе [12]).

На рис.5 в левом столбце приведены амплитудно-частотные характеристики для намагниченности, а в правом – для упругого смещения. Номера отдельных эпюр рисунка соответствуют номерам кривых на рис.4. Для

выявления тонкой структуры кривых масштаб по вертикальной оси для каждой кривой выбран соответствующим наиболее подробному изображению деталей. При этом предполагается, что относительное соотношение амплитуд может быть определено из рис.4 в достаточной степени.

Как отмечено выше, в работе [12] в характере развития во времени магнитных и упругих колебаний в рассматриваемых здесь условиях выделены три режима: №1 – линейный, №2 – умеренно нелинейный и №3 – сильно нелинейный. При этом по уровню возбуждения границы между режимами №1 и №2 установлены на уровне от 100 до 200 Э, между режимами №2 и №3 на уровне от 800 до 1600 Э. В используемых здесь обозначениях эти границы соответствуют переходу от кривых 3а, 3б к кривым 4а, 4б и от кривых 7а, 7б к кривым 8а, 8б. Рассмотрим, в какой степени соответствуют такие границы характеру изменения амплитудно-частотных характеристик магнитных и упругих колебаний.

Из эюр 1а-3а на рис.5, соответствующих режиму №1, можно видеть, что магнитный колебания в пределах всего этого режима не являются однородными. Так, на эюре 1а амплитудно-частотная характеристика имеет четко выраженный трехлепестковый характер, тогда как уже на следующих двух эюрах она имеет вид скошенного направо треугольника. То есть здесь режим №1 разбивается на два подрежима, первый из которых №1-1 близок к линейному, а второй №1-2 – к слабо нелинейному. Амплитудно-частотные характеристики для упругости (эюры 1б, 2б, 3б) в этом случае в своей низкочастотной части (ниже 1 ГГц) остаются трехлепестковыми, а в высокочастотной (выше 1 ГГц) фактически повторяют форму амплитудно-частотных характеристик для намагниченности. То есть и здесь наблюдается разбиение единого режима №1 на два подрежима №1-1 и №1-2.

Таким образом, можно сделать вывод, что с точки зрения амплитудно-частотных характеристик колебания как намагниченности, так и упругого смещения значительно более чувствительны к уровню возбуждения, чем с точки зрения развития колебаний во времени.

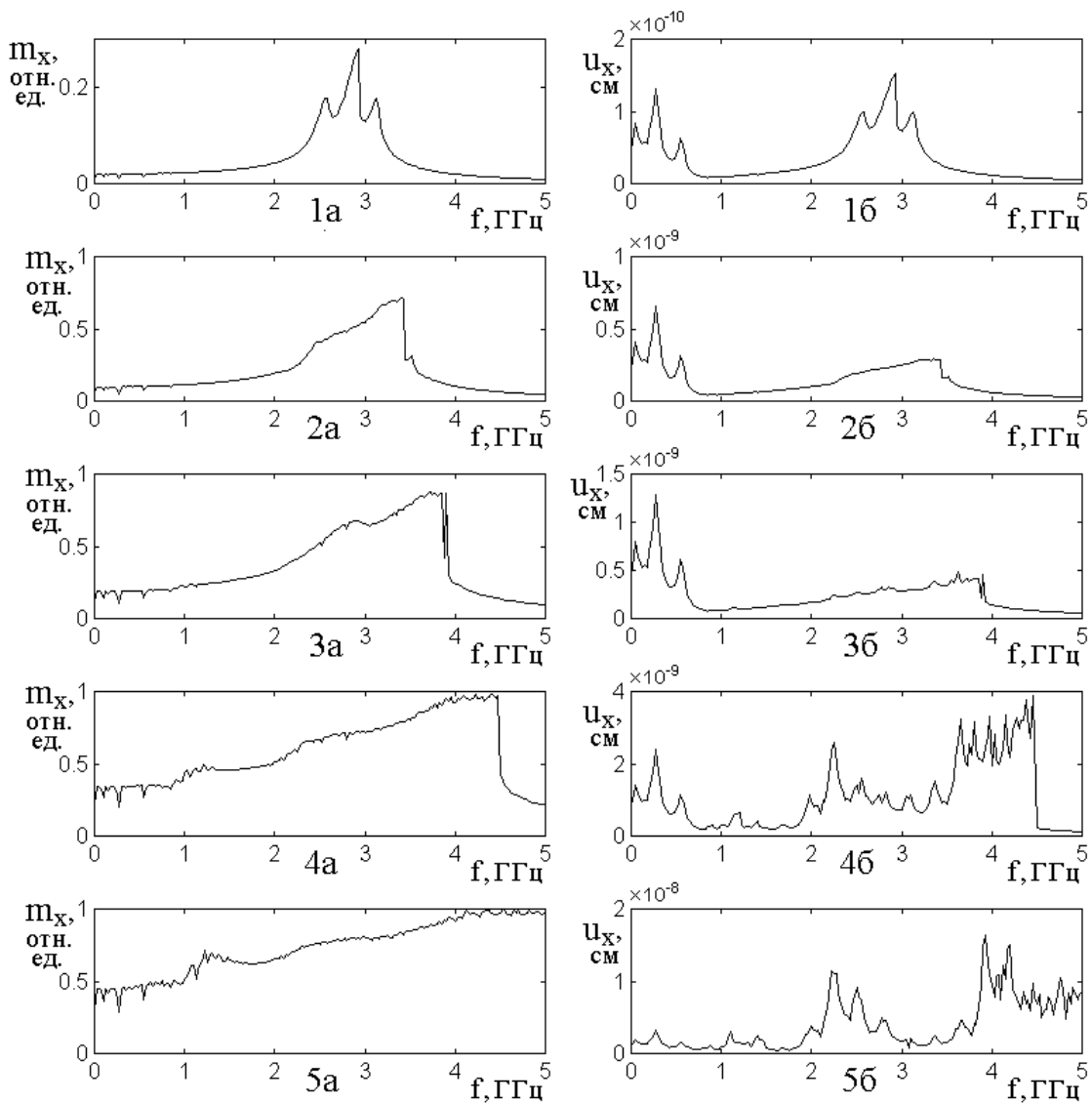


Рис.5. Амплитудно-частотные характеристики для намагниченности (левый столбец) и упругого смещения (правый столбец). Номера эюр рисунка соответствуют номерам кривых на рис.4. Все параметры – те же, что на рис.4.

Обратимся теперь к рассмотрению режима №2, включающего в себя эюры 4а-7а и 4б-7б. Здесь скошенный треугольник магнитных амплитудно-частотных характеристик по мере увеличения уровня возбуждения расплывается по частоте в обе стороны, причем его вершина стремится к единице, образуя плоский участок тем более широкий, чем уровень возбуждения выше.

Амплитудно-частотная характеристика упругих колебаний в низкочастотной части (ниже 1 ГГц) сначала (на эюре 4б) сохраняет трехлепестковый характер, но далее (на эюре 5б) он проявляется весьма слабо,



после чего совсем исчезает, заменяясь слабо изрезанной кривой, на фоне которой отдельные лепестки, соответствующие несущей и боковым частотам, уже теряются. С другой стороны, в области средних частот (от 2.0 до 3,5 ГГц), то есть там, куда приходится основной трехлепестковый подъем в линейном режиме (эпюры 1а и 1б), наблюдается резкий подъем, в основном, также имеющий трехлепестковый или близкий к таковому характер. Следует отметить, что такой характер амплитудно-частотной характеристики говорит о высокой интенсивности упругих колебаний в этой области частот, однако ничего не сообщая о частоте этих колебаний. Согласно данным работы [12, рис.4] в этом интервале уровня возбуждения (режим №2) колебания происходят на частоте собственного резонанса упругой системы, то есть на той, которая выделяется в результате детектирования. То есть при снятии амплитудно-частотной характеристики на эпюрах 4б-7б подается частота порядка 2-4 ГГц с соответствующей модуляцией, а регистрируется амплитуда колебаний на частоте 250 МГц.

Другой важнейшей особенностью амплитудно-частотных характеристик упругих колебаний в режиме №2 является резкий подъем в области частот выше 3,5 ГГц. Здесь наблюдается широкий подъем с сильно изрезанной верхней частью, пики которой отстоят друг от друга на интервалы порядка 100-200 МГц. Согласно данным работы [12], колебания и здесь происходят на продетектированной частоте 250 МГц, причем амплитуда колебаний по мере увеличения возбуждения растет, однако не вполне монотонным образом, что на рис.5б в работе [12], соответствует переходу от кривой 3 к кривой 4 в области амплитуд возбуждения 800-1600 Э (где общая зависимость 3-4 претерпевает резкий излом).

Рассмотрим теперь режим №3, включающий в себя эпюры 8а-10а и 8б-10б. Здесь амплитудно-частотная характеристика для намагниченности (эпюры 8а-10а) практически вся прижимается к верхнему краю рисунка, соответствующего прецессии намагниченности вблизи плоскости пластины. Однако, согласно данным работы [12, рис.8], вектор намагниченности

претерпевает здесь квазихаотические колебания, не оставаясь в плоскости пластины, а случайным образом перескакивая от положительного направления нормали к плоскости пластины к отрицательному и обратно. Можно полагать, что наблюдаемая на амплитудно-частотной характеристике сильная изрезанность, происходящая резкими скачками, особенно ярко выраженная на эюре 10а, обусловлена именно такими перескоками вектора намагниченности от одного направления к другому, диаметрально противоположному, имеющими случайный характер.

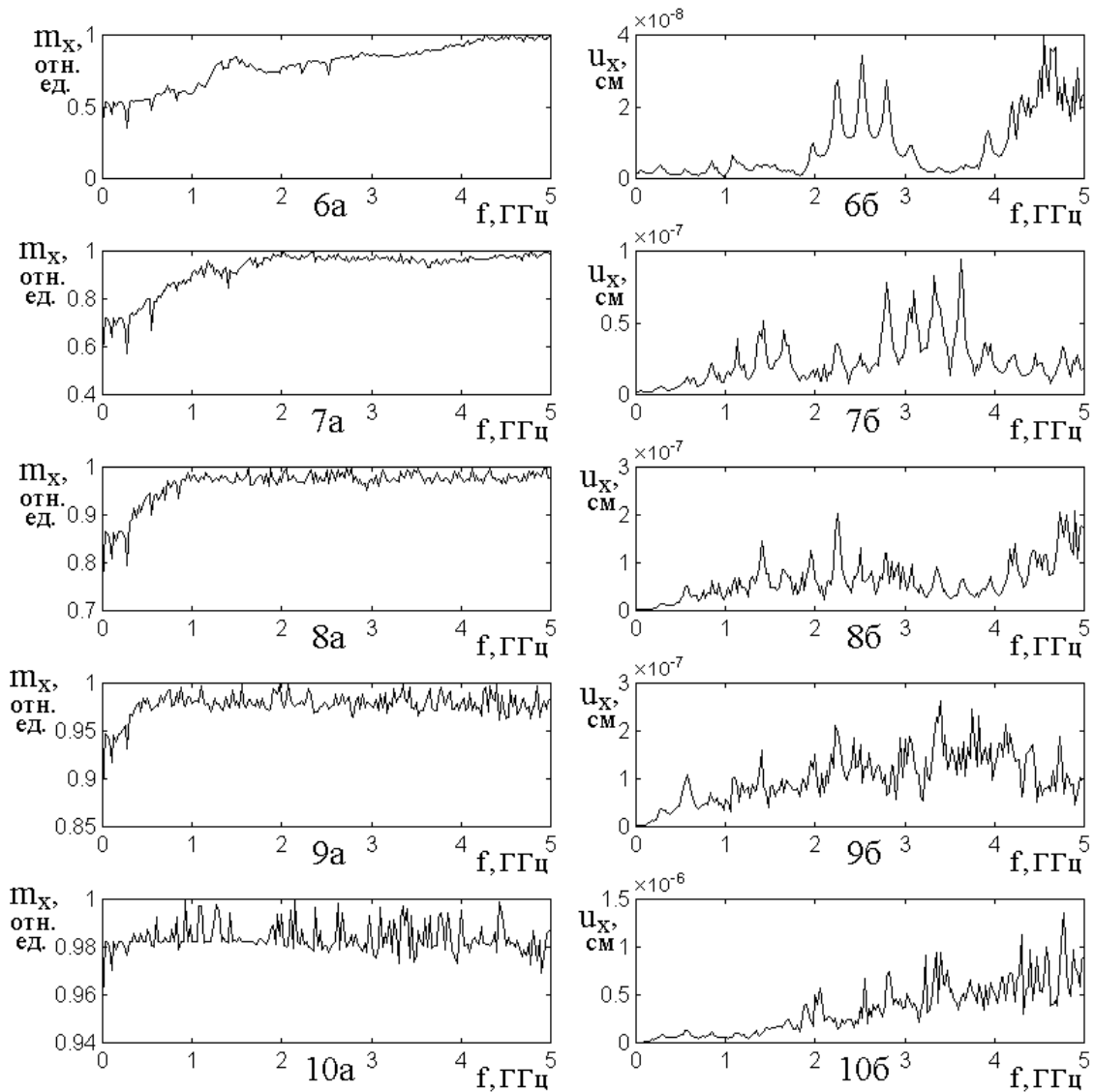


Рис.5. Продолжение.

Амплитудно-частотная характеристика для упругих колебаний имеет также сильно изрезанный характер, соответствующий таковому для

намагниченности. Согласно данным работы [12], упругие колебания здесь по-прежнему происходят на продетектированной частоте 250 МГц, однако амплитуда их по мере увеличения уровня возбуждения меняется, хотя и близким к квадратичному, но довольно нерегулярным образом. На рис.5 в работе [12] именно такая нерегулярность проявляется в сильном разбросе точек на кривой 4.

### 7. Амплитудно-частотные характеристики в широком диапазоне частот

Из рис.5 можно видеть, что существенной особенностью режима №3 является то обстоятельство, что амплитуда скачкообразных колебаний по мере увеличения частоты возбуждения постепенно растет, что особенно хорошо заметно на эюре №10б. В связи с этим возникает вопрос, как ведут себя амплитудно частотные характеристики в более широком диапазоне частот (то есть за правым краем эюры 10). Для разрешения этого вопроса было выполнено исследование амплитудно-частотных характеристик в диапазоне частот до 40 ГГц при амплитуде возбуждения 6400 Э. Результаты исследования приведены на рис.6.

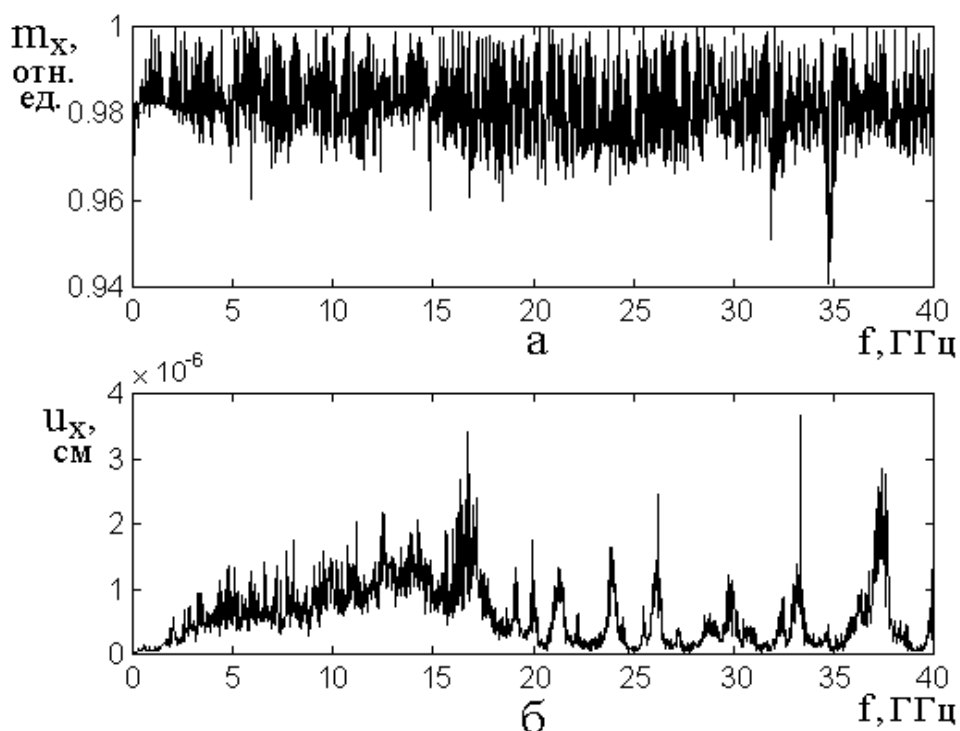


Рис.6. Амплитудно-частотные характеристики для намагниченности (а) и упругого смещения (б) при уровне возбуждения 6400 Э. Остальные параметры – те же, что на рис.5.

Из рисунка можно видеть, что во всем диапазоне от нуля до 40 ГГц амплитудно-частотная характеристика магнитных колебаний (рис.6а) имеет сильно изрезанный характер, подобный квазихаотическому. При этом амплитудно-частотная характеристика упругих колебаний (рис.6б) сначала до частоты порядка 15 ГГц постепенно возрастает, что и дало подъем на эюре 10б на рис.5, однако при дальнейшем увеличении частоты рост прекращается и колебания характеристики приобретают характер, близкий к хаотическому. Можно полагать, что такой сильно изрезанный вид характеристики для упругих колебаний обусловлен изрезанностью характеристики для магнитных колебаний.

Можно было бы полагать, что при достаточно высокой частоте амплитуда магнитных колебаний должна упасть до нуля, так как вектор намагниченности просто не будет успевать следовать за возбуждающим полем. В пользу такого механизма говорит резкий спад характеристик на эюрах 2а, 3а, 4а рис.5. Однако рис.6 показывает, что при достаточно высоком уровне возбуждения вплоть до частоты 40 ГГц такой спад отсутствует.

**Замечание.** Авторы настоящей работы не ставили себе задачу подробно проследить поведение характеристик на еще более высоких частотах, в том числе их связь с временами релаксации магнитных и упругих колебаний. Однако можно полагать, что рассмотрение такого вопроса было бы полезным в свете продвижения современной техники в диапазон нано, пико и фемтосекунд [23-30]. Следует отметить, что расчет амплитудно-частотных характеристик в столь широком диапазоне частот с использованием вычислительной техники, применяемой в настоящей работе (двухъядерный процессор Intel, частота 2,8 ГГц, объем оперативной памяти 2 ГБ), требует значительного машинного времени. Так, расчет кривых, приведенных на рис.6, потребовал времени около одного часа. То есть для решения подобной задачи требуется значительный ресурс машинного времени в сочетании с возможным совершенствованием алгоритма расчета. Так что рассмотрение амплитудно-частотных характеристик

в более широком диапазоне частот авторы оставляют в качестве задачи для отдельного исследования.

## 8. Фрактальный характер амплитудно-частотных характеристик

Сильная изрезанность амплитудно-частотных характеристик, особенно ярко проявляющаяся в режиме №3 (эпюры 8а-10а, 8б-10б на рис.5) говорит в пользу фрактальности их характера. Для проверки такой гипотезы было выполнено исследование амплитудно-частотных характеристик в уменьшающемся по длине интервале частот с соответствующим уменьшением шага по частоте (при условии сохранения постоянным отношения длины шага к длине интервала). Результаты исследования представлены на рис.7.

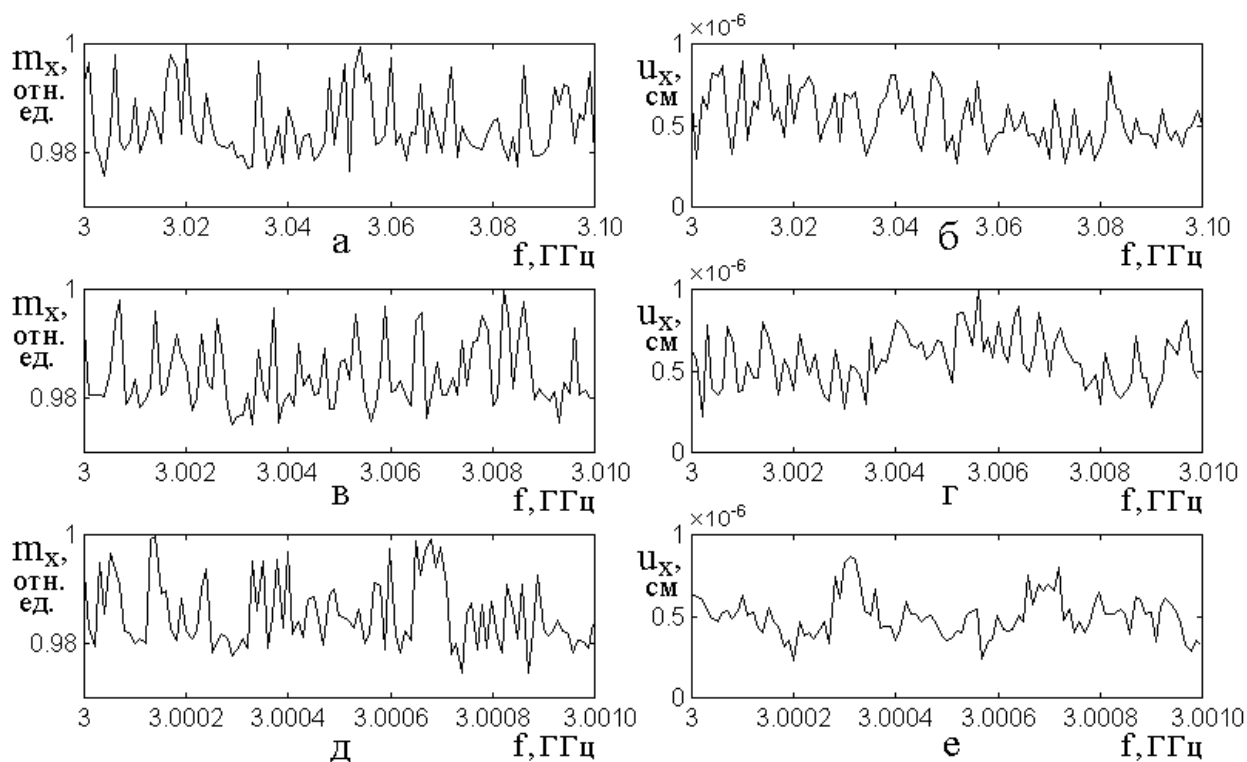


Рис.7. Амплитудно-частотные характеристики магнитных (левый столбец) и упругих (правый столбец) колебаний в различных интервалах частот:  
 а, б – диапазон – 100 МГц, шаг по частоте – 1 МГц;  
 в, в – диапазон 10 МГц, шаг по частоте – 0,1 МГц;  
 д, е – диапазон – 1 МГц, шаг по частоте – 0,01 МГц.  
 Уровень возбуждения – 6400 Э (эпюры 10а, 10б на рис.4). Остальные параметры – те же, что на рис.4.

Из рисунка видно, что на всех приведенных характеристиках степень изрезанности примерно одинакова, так что изменение интервала при

соответствующем изменении шага (при сохранении их одинаковой кратности) изрезанности не меняет. Контрольная проверка показывает, что при неизменной длине интервала уменьшение шага приводит к увеличению изрезанности, так что характеристики приобретают шумовой характер.

Таким образом, можно полагать, что наблюдаемые амплитудно-частотные характеристики имеют четко выраженный фрактальный характер.

**Замечание.** Сделанный вывод в полной степени относится к амплитудно-частотным характеристикам, полученным в режиме №3, то есть при довольно высоком уровне возбуждения. В то же время, из рис.4 можно видеть, что в режиме №2 и особенно в режиме №1 изрезанность характеристик проявляется в значительно меньшей степени. Выяснение степени фрактального характера в этих режимах авторы оставляют в качестве задачи для отдельного исследования.

## **9. Решающая роль сигнала модуляции в формировании амплитудно-частотных характеристик**

В разделе 6 рассмотрены амплитудно-частотные характеристики магнитных и упругих колебаний в диапазоне частот не выше 5 ГГц, что было достаточным для рассмотрения колебаний в режиме №1 и в значительной части режима №2, так как на более высоких частотах упругие колебания, в основном, повторяли магнитные и какие-либо особенности, связанные с модуляцией, отсутствовали.

Однако в разделе 7 было показано, что в режиме №3, где как магнитные, так и упругие колебания приобретают хаотический характер, диапазон колебаний, связанных с модуляцией, значительно расширяется, во всяком случае, достигая 40 ГГц.

Тем не менее, четкого соотношения между характером тех и других колебаний в условиях модуляции и в ее отсутствие выявлено не было. Рассмотрим теперь этот вопрос на примере верхнего участка режима №2, где колебания еще сохраняют более или менее регулярный характер, так что

хаотическая составляющая проявляется в сравнительно небольшой степени, что позволяет выявить важные особенности характеристик более четко.

Так, из эюр 4б, 5б, 6б рис.5 видно, что на амплитудно-частотных характеристиках для упругого смещения, кроме основного максимума между частотами от 2 до 3 ГГц, имеет место другой максимум на частотах выше 4 ГГц, по амплитуде сравнимый с основным или даже несколько его превышающий. На эюре 6б рис.5 этот максимум частично располагается за правым краем рисунка (то есть простирается выше 5 ГГц).

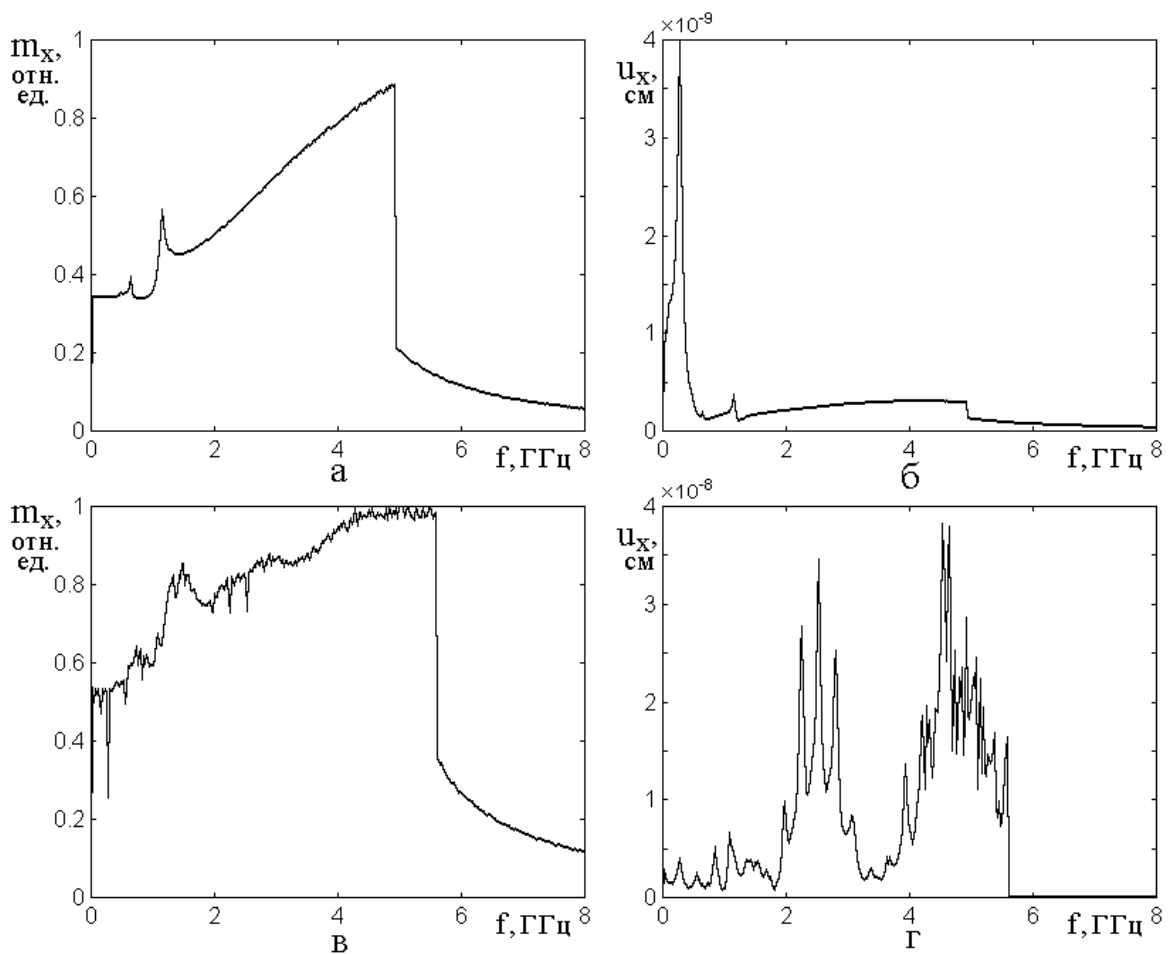


Рис.8. Амплитудно-частотные характеристики магнитных (левый столбец) и упругих (правый столбец) колебаний в отсутствие модуляции (а,б) и при ее наличии (в,г).

Частота модуляции – 280 МГц, частота упругого резонанса – 280 МГц;  
амплитуда переменного поля – 400 Э.

Поперечная составляющая постоянного поля отсутствует.

Остальные параметры совпадают с приведенными в разделе 1.

Рассмотрим характер этого дополнительного максимума более подробно, для чего обратимся к рис.8, где показаны амплитудно-частотные характеристики магнитных (левый столбец) и упругих (правый столбец) колебаний а отсутствие модуляции (а,б) и при ее наличии (в,г). Диапазон частот взят намеренно шире, чем на рис.5, то есть до 8 ГГц, чтобы выявить структуру дополнительного максимума во всем диапазоне его существования. Характеристики, соответствующие наличию модуляции, представлены в нижнем ряду, тогда как в верхнем ряду для сравнения приведены такие же характеристики в ее отсутствие.

Из рисунка можно видеть, что в отсутствие модуляции (рис.8а,б) характеристики как для магнитных, так и для упругих колебаний имеют совершенно плавный характер, так что какие-либо проявления хаотичности полностью отсутствуют.

Характеристика для намагниченности (рис.8а) имеет вид треугольника, скошенного в сторону высоких частот. Как отмечено ранее (раздел б), такой вид типичен для магнитного резонанса в сильно нелинейном режиме. Небольшой максимум вблизи 1,2 ГГц соответствует сильно нелинейному режиму возбуждения магнитных колебаний. Предварительная проверка показывает, что этот максимум обусловлен чисто магнитными колебаниями и с упругой системой не связан (остается даже в случае  $B_2 = 0$ ), однако при изменении амплитуды переменного поля вниз (с 400 до 300 Э) он несколько смещается по частоте вверх (с 1,2 ГГц до 1,3 ГГц). То же касается еще одного незначительного максимума на частоте около 0,8 ГГц.

**Замечание.** На данном этапе исследования явлений авторы не ставили себе задачу подробного рассмотрения природы и свойств обоих этих максимумов, так как с магнитоупругостью они не связаны. Однако можно предполагать, что их появление говорит о каких-то нетрадиционных свойствах магнитных колебаний в условиях сильной нелинейности, так что авторы оставляют этот вопрос в качестве задачи для отдельного исследования.



Характеристика для упругого смещения (рис.8б) имеет резкий выброс вверх, соответствующий резонансу упругой системы (280 МГц). Далее она фактически повторяет характеристику для намагниченности, причем амплитуда здесь более чем на порядок меньше амплитуды на частоте упругого резонанса.

При включении модуляции (рис.8в,г) амплитудно-частотные характеристики как для магнитных, так и для упругих колебаний изменяются кардинальным образом.

Так, характеристика для колебаний намагниченности (рис.8в) проходит значительно (до полутора-двух раз) выше, чем в отсутствие модуляции (рис.8а). Ее резкий спад смещается по частоте выше примерно на 0,5 ГГц и теперь вместо 4,8 ГГц приходится на 5,3 ГГц. В области от 4,1 ГГц до 5,3 ГГц характеристика приближается вплотную к верхнему пределу, соответствующему  $m_x = 1$ . На всей характеристике, особенно на ее части до спада, появляется значительная «рябь» хаотического вида, составляющая порядка 2-3% от полной амплитуды, причем на частотах ниже 3 ГГц некоторые отдельные выбросы достигают 10% и более.

Еще сильнее включение модуляции меняет характеристику для упругих колебаний (рис.8г). Здесь пик на частоте упругого резонанса (280 МГц) по сравнению со случаем отсутствия модуляции (рис.8б) почти не меняется (это четко видно при учете десятикратного различия масштабов на рис.8б и рис.8г). Однако в области частот от 2,1 до 3,2 ГГц появляется резко выраженный трехлепестковый максимум, соответствующий возбуждению упругих колебаний вблизи частоты магнитного резонанса в виде несущей с двумя боковыми частотами. Максимальная амплитуда этого максимума (на центральной частоте) превышает амплитуду характеристики на той же частоте в отсутствие модуляции (рис.8б) почти на два порядка. Однако, в отличие от четкого трехлепесткового максимума, подобного показанному на эюре 1б рис.5, который там соответствует линейному режиму, здесь амплитуды боковых частот значительно превышают половину амплитуды основной частоты (достигают от нее 70% и более). Кроме того здесь, наряду с основными

боковыми максимумами, появляются небольшие дополнительные максимумы, достигающие 30% от основной частоты.

Еще сильнее при включении модуляции меняется характеристика упругих колебаний в области частот от 3,9 до 5,3 ГГц, где появляется сильный максимум, еще более энергично выраженный, чем в интервале частот от 2,1 до 3,2 ГГц. Здесь какой-то намек на трех или даже пятилепестковый характер также имеет место, однако все лепестки сопровождаются сильным искажением шумового характера. Амплитуда шума достигает 30% от величины самого максимума, так что амплитудно-частотная характеристика является сильно нестационарной.

Превышение максимальной амплитуды этого максимума (на центральной частоте) над амплитудой характеристики на той же частоте в отсутствие модуляции (рис.8б) также составляет более двух порядков.

Таким образом, относительно амплитудно-частотной характеристики для упругих колебаний, можно сделать вывод, что включение модуляции, по сравнению с режимом в ее отсутствие, приводит как к появлению новых максимумов весьма значительной амплитуды, так и к сильному обогащению огибающей характеристики шумовыми компонентами.

Из сравнения рис.8г с рис.8в можно видеть, что дополнительный максимум характеристики на рис.8г по частоте приходится как раз на тот участок характеристики для намагниченности, где она стремится к единице, то есть вектор намагниченности колеблется почти в плоскости пластины. В работе [12] показано, что в этих условиях колебания намагниченности приобретают близкий к хаотическому характер с возможностью переориентации, что и проявляется в виде особенности на характеристике для упругих колебаний.

**Замечание.** Предметом рассмотрения работы [12] является исследование вынужденных колебаний магнитоупругой пластины на частоте ферромагнитного резонанса магнитной системы. Такой выбор обусловлен предпринятым там изучением свойств процесса детектирования. Однако, как следует из приведенных выше данных, на других частотах колебания

намагниченности и особенно упругого смещения могут иметь весьма сложный характер, в рамки эффекта детектирования не укладываемый. Можно полагать, что изучение разверток во времени таких колебаний в достаточно широком диапазоне частот, подобное выполненному в работе [12], а также рассмотрение соответствующих параметрических портретов выявило бы ряд нетривиальных особенностей. Так, интересно было бы проверить, имеет ли место детектирование и в какой степени оно проявляется в области частот дополнительного пика на рис.8г. Подробное изучение этого и других подобных явлений авторы оставляют в виде задачи для отдельного исследования.

### 10. Несимметричность постоянного поля

В работе [12] рассмотрены особенности процесса детектирования в случае несимметричности постоянного поля, то есть при его отклонении от нормали к плоскости пластины. Показано, что возникающая при этом поперечная составляющая переменной намагниченности, складываясь с действием исходного переменного поля, приводит к резкому увеличению эффективности процесса детектирования (на порядок и более).

Рассмотрим, как наличие поперечной составляющей постоянного поля сказывается на амплитудно-частотных характеристиках магнитных и упругих колебаний. Для соблюдения преемственности с работой [12], возьмем те же параметры, что были приняты в ней при построении рис.9. То есть поперечную составляющую постоянного поля положим равной 50 Э и направим ее вдоль оси  $Ox$ . Согласно [12], в этом случае отклонение суммарного постоянного поля от нормали к плоскости пластины составляет около одного градуса. С целью полноты картины амплитудно-частотные характеристики рассмотрим во всех трех режимах возбуждения. Полученные результаты для магнитных и упругих колебаний представлены на рис.9. Здесь тонкие сплошные линии соответствуют направлению поля точно по нормали к плоскости пластины, а утолщенные – его отклонению от этой нормали. При этом рис.9а,б соответствует возбуждению в режиме №1, рис.9в,г – возбуждению в режиме №2 и рис.9д,е – в режиме №3.

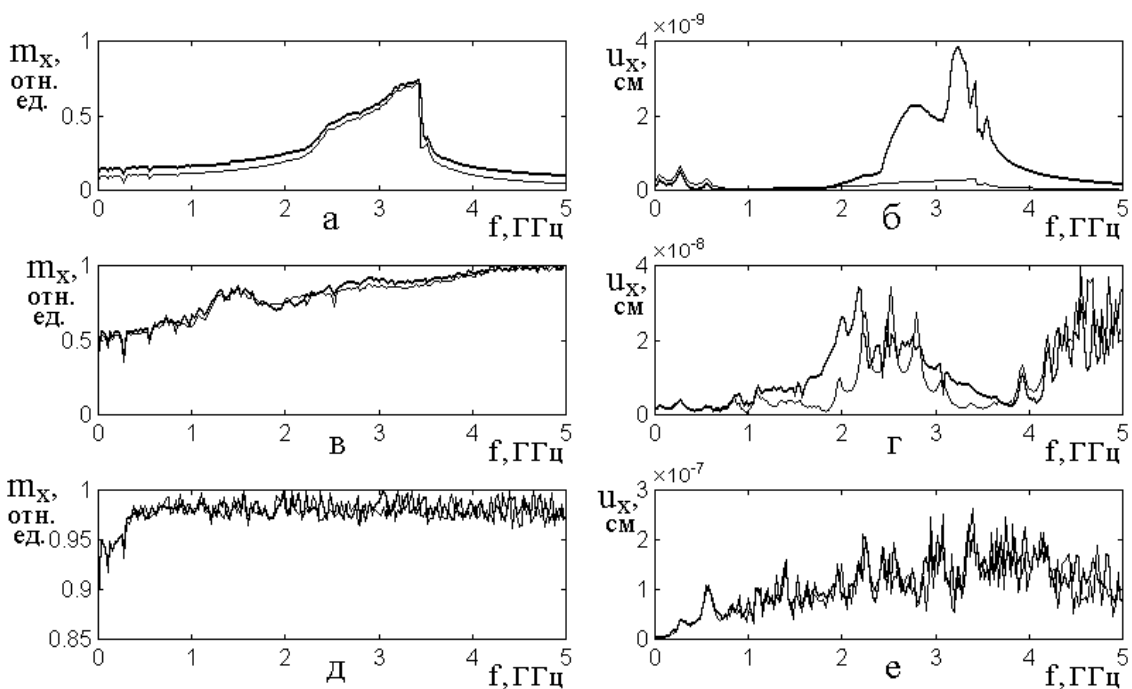


Рис.9. Амплитудно-частотные характеристики магнитных (левый столбец) и упругих (правый столбец) колебаний при отсутствии поперечной компоненты постоянного поля (тонкие линии) и при ее наличии, равной 50Э (утолщенные линии) в условиях различных уровней переменного поля: а, б – 50 Э; в, г – 400 Э; д, е – 3200 Э.

Остальные параметры – те же, что на рис.4.

Из левого столбца рисунка видно, что амплитудно-частотные характеристики для магнитных колебаний во всех трех режимах при включении поперечного поля практически не меняются. Некоторое увеличение наблюдается лишь в режиме №1 (рис.9а), однако оно составляет единицы процентов, то есть является весьма незначительным.

Однако для упругих колебаний, амплитудно-частотные характеристики для которых представлены в правом столбце, в режиме №1 наблюдается сильное увеличение характеристики в области от 2 до 4 ГГц, которая соответствует сильно нелинейному ферромагнитному резонансу. Увеличение превышает порядок и достигает 15-20 раз, причем, в отличие от характеристики при нормальном поле (тонкая линия), наблюдается слегка искаженная трехлепестковая структура, соответствующая несущей частоте с двумя боковыми частотами.

В режиме №2 (рис.9г) амплитудно-частотная характеристика при наличии поперечного поля (утолщенная линия) в области ферромагнитного резонанса также, в основном, проходит выше характеристики, соответствующей отсутствию поперечного поля (тонкая линия), однако здесь такое превышение выражено значительно слабее и составляет не более двух-трех раз. Заметим, что сильная изрезанность обеих характеристик мешает сделать более четкий количественный вывод, однако тенденция превышения утолщенной линии над тонкой прослеживается вполне явно.

В режиме №3 (рис.9е) обе характеристики сильно изрезаны, однако довольно четко видно, что в среднем они идут примерно одинаково, то есть рост характеристики в случае включения поперечного поля здесь полностью отсутствует.

Такое поведение амплитудно-частотных характеристик вполне соответствует приведенной на рис.10 в работе [12] зависимости размаха колебаний упругого смещения на частоте модуляции от амплитуды переменного поля при различных значениях поперечной составляющей постоянного поля. Из этого рисунка видно, что увеличение размаха колебаний при включении поперечного поля наиболее сильно проявляется при амплитудах переменного поля от 10 до 300-400 Э, то есть в режиме №1 и частично в режиме №2, после чего плавно спадает и в полях порядка 800 Э, то есть при переходе к режиму №3, полностью пропадает, скрываясь в хаотичности колебаний.

Таким образом, можно полагать, что поведение амплитудно-частотных характеристик упругих колебаний при включении поперечного поля в полной степени отражает развитие таких колебаний во времени, рассмотренное в работе [12].

**Замечание.** В работе [12] при анализе развертки колебаний во времени отмечена сильная зависимость размаха упругого смещения от величины поперечной компоненты постоянного поля при различных значениях амплитуды переменного поля (рис.11). Показано, что в интервале амплитуды

поля от 100 до 600 Э на этой зависимости наблюдаются резкие подъемы и падения, характер которых при различной величине поперечного постоянного поля сильно меняется. Отмечено, что причиной столь немонотонного поведения такой зависимости может быть сложный характер векторного взаимодействия компонент намагниченности с компонентами упругого смещения. Можно полагать, что характер поведения амплитудно-частотных характеристики в этих условиях также окажется достаточно сложным. Подробное выяснение этого вопроса, а также построение соответствующей векторной модели авторы оставляют в качестве задачи для отдельного исследования.

## **11. Особенности амплитудно-частотных характеристик при изменении частоты модуляции**

В работе [12] рассмотрены особенности процесса детектирования в случае относительной расстройки между частотой возбуждения и частотой собственного упругого резонанса пластины. Исследование выполнено в режиме №2. Показано, что при точном совпадении частоты модуляции с частотой собственного резонанса упругой системы упругие колебания происходят точно на частоте модуляции и имеют синусоидальный характер. При отстройке частоты модуляции от частоты упругого резонанса на единицы процентов период упругих колебаний возрастает в несколько раз и форма их сильно отличается от синусоидальной, принимая вид многократно чередующихся максимумов и минимумов различной амплитуды. Исследованы Фурье-спектры разверток колебаний во времени для случаев отсутствия и наличия расстройки. Показано, что отстройка частоты модуляции от частоты резонанса упругой системы на единицы процентов приводит к падению амплитуды упругих колебаний на частоте модуляции более чем на порядок и многократному росту амплитуды таких колебаний на комбинационных частотах.

Столь сильные изменения характера и частотного спектра упругих колебаний при отстройке частоты модуляции от частоты упругого резонанса

побуждают выполнить исследование амплитудно-частотных характеристик в тех же условиях.

Предварительное исследование показывает, что характеристики колебаний намагниченности при этом меняются мало, так что здесь основное внимание уделим упругим колебаниям. Для соблюдения преемственности с работой [12], возьмем те же параметры, что были приняты в ней при построении рис.14 и рис.15. Несколько увеличим лишь величину отстройки частоты модуляции от частоты упругого резонанса (с 10 до 20 МГц), что, не меняя результатов работы [12], обеспечит несколько большую наглядность рассматриваемых далее амплитудно-частотных характеристик.

Итак, обратимся к рис.10, где показаны амплитудно-частотные характеристики упругих колебаний при различных значениях частоты модуляции – ниже (а), равной (б) и выше (в) частоты упругого резонанса.

Из рисунка можно видеть, что во всех трех случаях амплитудно-частотные характеристики сильно изрезаны, причем как характер изрезанности, так и максимальные амплитуды пиков близки друг к другу. Можно считать, что во всех случаях в значительной степени проявляется трехлепестковый характер кривых, однако кроме основных трех лепестков на гряях появляются дополнительные лепестки меньшей амплитуды. Расстояние между лепестками близко к частоте модуляции (точное значение установить трудно из-за сильной изрезанности характеристик). При этом центральный пик имеет некоторую раздвоенность, причем частота его заметно отклонена от частоты ферромагнитного резонанса (2,8 ГГц) в низшую сторону.

Рис.10б соответствует эпюре бб на рис.5, то есть случаю, когда расстройка отсутствует. Из сравнения этого рисунка с двумя другими можно видеть, что расстройка приводит к определенному сдвигу всей характеристики вверх или вниз, сопровождающемуся заметным ее искажением, причем увеличение частоты модуляции (от рис.10а к рис.10в) приводит к сдвигу характеристики по частоте вниз. Сдвиг довольно невелик, так, на рис.10а (отстройка вниз на 20 МГц) частота расщепления основного пика составляет 2,6

ГГц, на рис.10б, где расстройка отсутствует, частота того же расщепления составляет 2,5 ГГц, а на рис.10в (отстройка вверх на 20 МГц) – равняется 2,4 ГГц.

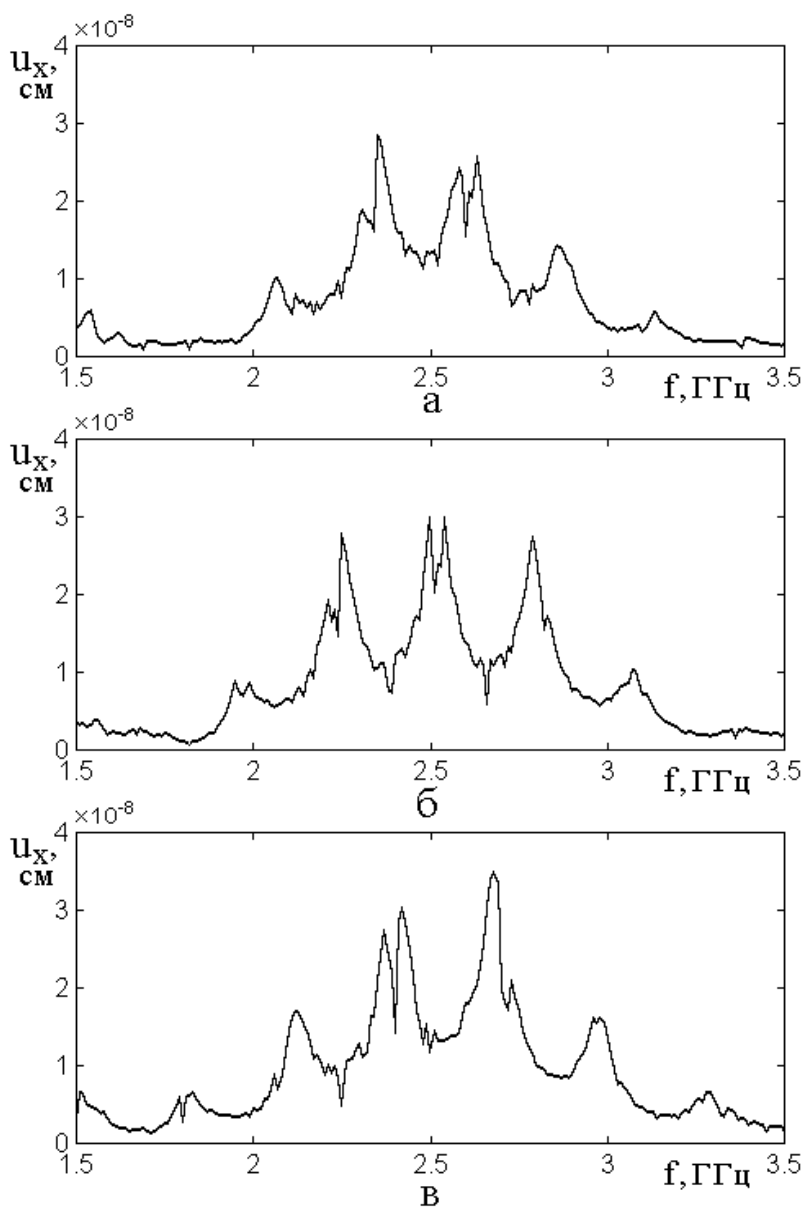


Рис.10. Амплитудно-частотные характеристики упругих колебаний при различных значениях частоты модуляции: а – 260 МГц; б – 280 МГц; в – 300 МГц. Частота упругого резонанса пластины равна 280 МГц. Амплитуда возбуждения – 400 Э (режим №2). Постоянное поле в плоскости отсутствует. Остальные параметры – те же, что приведены в разделе 1.

Из общей картины, представленной на рис.10, можно сделать вывод, что отстройка частоты модуляции от частоты упругого резонанса не приводит к столь разительным изменениям амплитудно-частотных характеристик, как изменения характера развертки колебаний во времени и их спектра при той же



отстройке. То есть амплитудно-частотные характеристики к изменению частоты модуляции значительно менее чувствительны, чем сами колебания и их спектры.

**Замечание.** В настоящей работе, а также в работе [12], рассмотрен только один вид расстройки между частотой модуляции и частотой упругого резонанса пластины, то есть меняется только частота модуляции, тогда как частота упругого резонанса остается неизменной. Естественно полагать, что при неизменной частоте модуляции и изменении частоты упругого резонанса путем изменения толщины пластины, изменения свойств упругих колебаний должны быть одинаковыми. Однако предварительная проверка показывает, что оба эти случая эквивалентными не являются. Различие проявляется прежде всего в том, что искажение формы развертки колебаний во времени и соответствующее изменение спектра колебаний, происходящее при изменении толщины пластины на пропорциональную расстройке величину, значительно менее выражено, чем при неизменной толщине и изменении частоты модуляции. Можно полагать, что изменение амплитудно-частотных характеристик в обоих этих случаях также не будет эквивалентным. С другой стороны, возбуждение колебаний в других режимах (кроме рассмотренного здесь и в работе [12] режима №2, также в режимах №1 и №3) в свою очередь также может привести к изменению как разверток во времени, так и амплитудно-частотных характеристик колебаний в условиях расстройки частот. Ввиду высокой сложности вопроса о расстройке во всей его совокупности, авторы оставляют его рассмотрение в качестве задачи для отдельной работы.

## **12. Некоторые задачи, требующие разрешения**

В рамках настоящей работы авторы не ставили задачу полностью исчерпывающего исследования описываемых явлений, а старались представить лишь общую картину в их совокупности. Поэтому во многих местах текста отмечены нерешенные вопросы, требующие отдельного исследования. Приведем здесь краткую сводку таких вопросов, в основном, следуя их появлению по ходу текста.

1. Выполненное в настоящей работе исследование амплитудно-частотных характеристик, как и приведенное в работе [12] исследование развития колебаний во времени, относится к случаю распространения по толщине пластины поперечной упругой волны. Однако уже в работе [12] было отмечено, что рассмотрение в той же геометрии развития во времени колебаний для продольной упругой волны может привести к существенно отличным физическим эффектам. То же относится к амплитудно-частотным характеристикам, то есть отдельной задачей является рассмотрение их формирования на основе продольных упругих колебаний по толщине пластины.

2. В разделе 4 отмечено, что даже в линейном режиме имеет место поворот осей эллипса параметрического портрета упругих колебаний относительно поляризации возбуждающего поля на 90 градусов. Там же проведена аналогия с подобным поворотом сгущения малых колец параметрического портрета в случае прецессии положения равновесия. В работе [12] подобный поворот, сопровождающийся раздвоением параметрического портрета, отмечен для магнитных колебаний в случае сильно нелинейного режима (раздел 9, рис.6г, а также раздел 10, рис.7). В плане развития настоящей работы представляет интерес, во-первых, проследить, как отмеченные свойства параметрического портрета сказываются на амплитудно-частотных характеристиках магнитных и упругих колебаний и, во-вторых, дать наглядную интерпретацию этих явлений на основе векторной и энергетической моделей.

3. В разделе 6 выявлено значительное разнообразие вида амплитудно-частотных характеристик в трех основных режимах возбуждения – линейном (№1), умеренно нелинейном (№2) и сильно нелинейном (№3). В работе [12] рассмотрено развитие колебаний во времени в тех же режимах, причем исследования выполнены только на одной частоте (2,8 ГГц), соответствующей частоте ферромагнитного резонанса в линейном режиме. Однако разнообразие характеристик, приведенных здесь на рис.4 и рис.5, свидетельствует в пользу сильного отличия характера колебаний на других частотах. В этом плане

представляет интерес исследование развития во времени и соответствующих параметрических портретов как магнитных, так и упругих колебаний в возможно более широком диапазоне частот.

4. В разделе 7 отмечен сильно нестационарный, близкий к хаотическому вид амплитудно-частотных характеристик как для магнитных, так и для упругих колебаний, имеющий место в условиях сильно нелинейного возбуждения (режим №3). В разделе 8 отмечен их фрактальный характер, а в разделе 9 выявлена решающая роль сигнала модуляции в формировании амплитудно-частотных характеристик. Все эти положения в значительной степени носят описательный характер, то есть приведены только данные расчетов без их достаточной не только количественной, но и качественной интерпретации. Таким образом, здесь первейшей задачей является подробное установление физики явлений с возможным построением моделей векторного, энергетического или какого-то другого характера, требуемого конкретными свойствами этих явлений.

5. В разделе 10 отмечено сильное влияние поперечного постоянного поля на вид амплитудно-частотных характеристик, проявляющееся в значительном росте их амплитуды, особенно сильно заметном в линейном и умеренно нелинейном режимах. Установлена связь такого роста с увеличением амплитуды разверток колебаний во времени в тех же условиях. Однако характер подобного изменения в зависимости от величины переменного поля, судя по разверткам во времени (рис.11 в работе [12]) имеющий довольно сложный характер, не исследован. Таким образом, задачей является как подробное исследование характера подобной зависимости, так и ее интерпретация на основе векторной и энергетической моделей.

6. В разделе 11 при исследовании влияния расстройки между частотой модуляции и резонансной частотой упругой системы на вид амплитудно-частотных характеристик отмечена неэквивалентность между изменением частоты модуляции и изменением толщины пластины. Задачей является более подробное исследование, а также выяснение причины и механизма такой

неэквивалентности относительно как амплитудно-частотных характеристик, так и развития колебаний во времени.

7. Все приведенные в настоящей работе результаты касаются только общего вида амплитудно-частотных характеристик магнитных и упругих колебаний. В то же время, в работе [12] показано, что довольно мощным инструментом исследования разверток колебаний во времени является их спектральный анализ на основе разложения в ряд Фурье (раздел 20 работы [12]). Можно полагать, что применение подобного анализа к амплитудно-частотным характеристикам, особенно в режимах умеренной и сильной нелинейности, приведет к установлению количественных соотношений между их спектральными составляющими, обладающими дополнительной информативностью, в том числе для модельной интерпретации описываемых явлений.

8. Расчет амплитудно-частотных характеристик по предложенной здесь схеме (раздел 2), особенно в широком диапазоне частот (раздел 7), занимает довольно много машинного времени (десятки минут и часы), поэтому важной задачей является совершенствование и оптимизация машинного алгоритма с целью обеспечения возможности расчета достаточно сложной амплитудно-частотной характеристики за приемлемый промежуток времени.

## **Заключение**

Рассмотрены колебания намагниченности в нормально намагниченной тонкой пластине, обладающей магнитоупругими свойствами, происходящие под воздействием амплитудно модулированного переменного поля. В качестве главного предмета рассмотрения избраны амплитудно-частотные характеристики магнитных и упругих колебаний в широком диапазоне частот.

Приведено выражение для плотности энергии, содержащее магнитную, упругую и магнитоупругую составляющие. На его основе получены уравнения движения для намагниченности и упругого смещения, а также граничные условия на поверхностях пластины. Приведен закон изменения во времени переменного поля, амплитуда которого модулирована синусоидальным

сигналом с заданным коэффициентом модуляции. Выполнено решение полученной системы уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка, в результате чего получено развитие колебаний во времени в промежутке, значительно превышающем времена релаксации колебаний магнитной и упругой систем.

Путем пошаговой регистрации амплитуды колебаний заданной частоты в установившемся во времени режиме, построены амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности и упругого смещения в широком диапазоне частот.

Рассмотрена общая структура амплитудно-частотных характеристик магнитных и упругих колебаний в линейном режиме возбуждения. Показано, что в условиях модуляции характеристики тех и других колебаний имеют трехлепестковый вид, представляющий собой совокупность максимума на центральной (несущей) частоте и двух боковых максимумов, отстоящей от основного на частоту модуляции, причем амплитуда боковых максимумов равна половине амплитуды центрального. Отмечено полное соответствие вида характеристик структуре амплитудно модулированного сигнала, известного в классической радиотехнике. Наблюдаемый обратный характер структуры амплитудно-частотных характеристик обусловлен тем, что в процессе плавного изменения частоты модулированного сигнала сначала на частоту резонансной системы попадает одна боковая частота, затем несущая, после чего – вторая боковая частота. При этом каждое такое «попадание» сопровождается резким увеличением амплитуды вынужденных колебаний за счет упругого резонанса, так что получающаяся амплитудно-частотная характеристика повторяет частотный спектр падающего сигнала.

Отмечено некоторое влияние магнитного резонанса на упругий, тогда как обратное влияние отсутствует. Такое невзаимное влияние объяснено непосредственным достаточно сильным возбуждением упругих колебаний за счет магнитных, тогда как возбуждение магнитных колебаний за счет упругих

значительно ослаблено двухступенчатым вступлением в игру магнитоупругого взаимодействия.

Рассмотрено соотношение амплитуд магнитных и упругих колебаний в случае круговой и линейной поляризации переменного поля. Отмечено, что в случае линейной поляризации амплитуда магнитных колебаний, по сравнению со случаем круговой поляризации, падает в два раза, причем падение по обеим координатам является одинаковым, однако амплитуда упругих колебаний по одной из координат превышает амплитуду колебаний по другой координате в два раза, то есть колебания являются эллиптическими, причем эллипс оказывается повернутым относительно исходной поляризации на 90 градусов. Высказано предположение, что такой поворот большой оси эллипса относительно большей компоненты переменного поля происходит благодаря сочетанию магнитной гиротропии среды с анизотропным характером ее упругой и магнитоупругой составляющих.

Рассмотрено изменение амплитудно-частотных характеристик магнитных и упругих колебаний при изменении толщины магнитной пластины. Показано, что в линейном режиме резонансные колебания намагниченности выделяют упругие колебания, приводя к увеличению их амплитуды при совпадении резонансных частот тех и других колебаний. Обратное воздействие упругих колебаний на магнитные отсутствует, тогда как прямое воздействие магнитных на упругие имеет место всегда, даже при несовпадении резонансных частот тех и других колебаний. Частота упругого резонанса пластины зависит от ее толщины обратно пропорциональным образом, что полностью соответствует классическим представлениям.

Рассмотрены амплитудно-частотные характеристики магнитных и упругих колебаний в трех установленных ранее в работе [12] основных режимах амплитуды возбуждения: линейном (№1), умеренно нелинейном (№2) и сильно нелинейном (№3).

Показано, что геометрически правильный трехлепестковый характер тех и других характеристик имеет место только в режиме линейных колебаний

(режим №1-1), тогда как уже при невысоком уровне нелинейности (режим №1-2) характеристика магнитных колебаний приобретает вид скошенного треугольника с обрывом в области высоких частот и вершиной, стремящейся к единице, а характеристика упругих колебаний приобретает изрезанный вид, представляющий собой чередование максимумов и минимумов меняющейся амплитуды. При среднем уровне возбуждения (режим №2) характеристика упругих колебаний, кроме основного максимума на частоте в окрестности ферромагнитного резонанса, приобретает дополнительный максимум, лежащий по частоте примерно вдвое выше и имеющий амплитуду того же порядка, что и основной. При высоком уровне возбуждения (режим №3) характеристики как магнитных, так и упругих колебаний приобретают сильно изрезанный близкий к хаотическому вид, причем ограничение их по частоте отсутствует вплоть до частот, на порядок и более превышающих частоту ферромагнитного резонанса.

Отмечено, что в режиме умеренного и сильного возбуждения степень изрезанности характеристик как магнитных, так и упругих колебаний при изменении шага по частоте не меняется, что говорит об их четко выраженном фрактальном характере.

Отмечена решающая роль сигнала модуляции в формировании амплитудно-частотных характеристик. В рамках режима умеренной нелинейности (режим №2) выполнено сравнение характеристик для магнитных и упругих колебаний в отсутствие модуляции и при ее наличии. Показано, что в отсутствие модуляции характеристика для магнитных колебаний имеет вид скошенного треугольника с плавной огибающей. В этом случае характеристика упругих колебаний имеет только один сильно выраженный пик на частоте упругого резонанса, а в остальной части повторяет характеристику магнитной системы с амплитудой, уменьшенной по сравнению с амплитудой резонансного пика более чем на порядок. При наличии модуляции характеристика для магнитных колебаний, оставаясь в форме скошенного треугольника, во всем диапазоне частот возрастает на 20% и более, приближаясь в своей верхней части к единице. При этом на характеристике упругих колебаний появляются

два сильно изрезанных подъема, первый из которых имеет трехлепестковый характер и располагается в окрестности частоты ферромагнитного резонанса, а второй – на частоте примерно в два раза более высокой, причем амплитуды обоих подъемов превышают амплитуду в отсутствие модуляции на два порядка. В присутствии модуляции как магнитная, так и упругая характеристики приобретают сильную изрезанность хаотического вида, по намагниченности достигающую 10%, а по упругости, особенно в районе второго пика, до 30% от основной амплитуды.

Рассмотрено влияние поперечной составляющей постоянного поля на амплитудно-частотные характеристики магнитных и упругих колебаний. Показано, что амплитудно-частотные характеристики для магнитных колебаний во всех трех режимах при включении поперечного поля практически не меняются. При этом амплитудно-частотные характеристики для упругих колебаний при включении поперечного поля в режиме линейного (режим №1) и частично в режиме умеренно нелинейного (режим №2) возбуждения возрастают на порядок и более. Отмечено, что такое увеличение соответствует выявленному ранее в работе [12] увеличению амплитуды упругих колебаний во времени в тех же условиях. Рассмотрение амплитудно частотных характеристик в режиме сильно нелинейного возбуждения (режим №3), где их вид приобретает хаотический характер, изменения амплитуды характеристик не выявило, однако было отмечено заметное изменение структуры хаотических пиков.

Рассмотрено влияние расстройки между частотой модуляции и частотой упругого резонанса пластины, приводящее, как установлено ранее в работе [12], к существенному изменению структуры и частотного спектра упругих колебаний при их развитии во времени. Показано, что характеристики колебаний намагниченности при расстройке до полутора раз меняются мало, однако некоторое изменение характеристик упругих колебаний имеет место, причем увеличение частоты модуляции относительно частоты упругого резонанса приводит к сдвигу характеристики по частоте вниз, а уменьшение – к



подобному же сдвигу характеристики вверх. Наблюдаемый сдвиг довольно невелик, так, при изменении частоты модуляции на 7% (что согласно работе [12] приводит к резкому преобладанию третьей гармоники) он составляет всего около 4% от частоты основного резонанса, то есть амплитудно-частотные характеристики к изменению частоты модуляции значительно менее чувствительны, чем сами колебания и их спектры.

Кратко перечислены основные задачи, следующие из проведенного рассмотрения, могущие составить предмет для дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

### Литература

1. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. М.: Мир. 1972.
2. Голямина И.П. // Магнитострикционные излучатели из ферритов. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука. Кн.1. Источники мощного ультразвука. М.: Наука. 1967.
3. Ле-Кроу Р., Комсток Р. Магнитоупругие взаимодействия в ферромагнитных диэлектриках. // В кн.: У. Мэзон (ред.): Физическая акустика. Т.3Б. Динамика решетки. М.: Мир. 1968. С.156.
4. Schlömann E. Generation of spin waves in nonuniform magnetic fields. I. Conversion of electromagnetic power into spin-wave power and vice versa. // JAP. 1964. V.35. №1. P.159.
5. Schlömann E., Joseph R.I. Generation of spin waves in nonuniform dc magnetic fields. II. Calculation of the coupling length. // JAP. 1964. V.35. №1. P.167.
6. Schlömann E., Joseph R.I. Generation of spin waves in nonuniform magnetic fields. III. Magneto-elastic interaction. // JAP. 1964. V.35. №8. P.2382.
7. Schlömann E., Joseph R.I., Kohane T. Generation of spin waves in nonuniform magnetic fields, with application to magnetic delay line. // Proc. IEEE. 1965. V.53. №10. P.1495.

8. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Нелинейное возбуждение гиперзвука в ферритовой пластине при ферромагнитном резонансе. // РЭ. 2009. Т.54. №7. С.863.

9. Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Нелинейное возбуждение гиперзвука в двухслойной ферритовой структуре. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb13/10/text.pdf>.

10. Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Комбинационное возбуждение гиперзвука в двухслойной ферритовой структуре. // Сборник трудов XXI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». М.: НИУ МЭИ. 2013. С.164.

11. Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Нелинейное возбуждение гиперзвука в двухслойной ферритовой структуре при ферромагнитном резонансе. // РЭ. 2014. Т.59. №5. С.482.

12. Власов В.С., Плешев Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Нелинейное детектирование магнитоупругих колебаний в режиме амплитудной модуляции. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/7/text.pdf>.

13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука. 1973.

14. Харкевич А.А. Основы радиотехники. М.: Физматлит. 2007.

15. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио. 1964.

16. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь. 1986.

17. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Ферромагнитный резонанс в условиях ориентационного перехода. М.: Физматлит. 2018.

18. Власов В.С., Кирушев М.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Вынужденная нелинейная прецессия намагниченности второго порядка в среде с магнитоупругими свойствами. // РЭ. 2019. Т.64. №1. С.54.

19. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1972.
20. Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. М.: Гос.Изд. физ.-мат.лит. 1960.
21. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука. 1973.
22. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит. 1994.
23. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order. // *Rev. Mod. Phys.* 2010. V.82. №3. P.2731.
24. Bigot J.V., Vomir M. Ultrafast magnetization dynamics of nanostructures. // *Ann. Phys. (Berlin)*. 2013. V.525. №1-2. P.2.
25. Jäger J.V., Scherbakov A.V., Linnik T.I., Yakovlev D.R., Wang M., Wadley P., Holy V., Cavill S.A., Akimov A.V., Rushforth A.W., Bayer M. Picosecond inverse magnetostriction in garfenol thin films. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V.103. №3. P.032409(5).
26. Walowski J., Münzenberg M. Perspective: Ultrafast magnetism and THz spintronics. // *J. Appl. Phys.* 2016. V.120. №14. P.140901(16).
27. Janusonis J., Chang C.L., Jansma T., Gatilova A., Vlasov V.S., Lomonosov A.M., Temnov V.V., Tobey R.I. Ultrafast magnetoelastic probing of surface acoustic transients. // *Phys. Rev. B.* 2016. V.94. №2. P.024415(7).
28. Чернов А.И., Кожаев М.А., Ветошко П.М., Додонов Д.В., Прокопов А.Р., Шумилов А.Г., Шапошников А.Н., Бержанский В.Н., Звездин А.К., Белотелов В.И. Локальное зондирование магнитных пленок с помощью оптического возбуждения магнитостатических волн. // *ФТТ*. 2016. Т.58. №6, С.1093.
29. Власов В.С., Макаров П.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Ориентационные характеристики возбуждения магнитоупругих волн фемтосекундным импульсом света. // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/5/text.pdf>.

30. Власов В.С., Макаров П.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Колебания намагниченности в магнитоупругой среде при ударном воздействии упругого смещения. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr18/3/text.pdf>.

**Для цитирования:**

В. С. Власов, Д. А. Плешев, В. Г. Шавров, В. И. Щеглов. Амплитудно-частотные характеристики магнестрикционного преобразователя в режиме амплитудной модуляции. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/9/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.9