

УДК 537.6, 537.86
DOI 10.19110/1994-5655-2019-4-15-19

Д.А. ПЛЕШЕВ*,, Ф.Ф. АСАДУЛЛИН*,**,
И.А. ЧУПРОВ**, В.С. ВЛАСОВ**, Л.Н. КОТОВ**,
В.И. ЩЕГЛОВ*****

**ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ
ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ПРЕЦЕССИИ
НАМАГНИЧЕННОСТИ
В ИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПЛЕНКЕ**

**Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет
им. С.М. Кирова,
г. Санкт-Петербург*

***Сыктывкарский государственный
университет им. Питирима Сорокина,
г. Сыктывкар*

****Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
г. Москва*

dpleshev@gmail.com

D.A. PLESHEV*,, F.F. ASADULLIN*,**,
I.A. CHUROV**, V.S. VLASOV**, L.N. KOTOV**,
V.I. SHCHEGLOV*****

**THE INFLUENCE OF THE ALTERNATING
MAGNETIC FIELD ON THE EQUILIBRIUM
POSITION DYNAMICS
OF THE MAGNETIZATION PRECESSION
IN AN ANISOTROPIC MAGNETIC FILM**

**S.M.Kirov St.Petersburg State Forest
Technical University,
St.Petersburg*

***Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,
Syktyvkar*

****V.A.Kotelnikov Institute
of Radioengineering and Electronics, RAS,
Moscow*

Аннотация

Настоящая работа посвящена выявлению особенностей динамики прецессии второго порядка вектора намагниченности при возбуждении поляризованным по кругу переменным магнитным полем, ориентированным в плоскости пленки. Определены режимы прецессии положения равновесия вектора намагниченности, их амплитудно-частотные характеристики и параметры последовательного перехода между ними, построены параметрические портреты для обнаруженных режимов. Выявлены особенности распределения областей неустойчивости в различных режимах прецессии вектора, а также определена зависимость частоты прецессии положения равновесия от амплитуды переменного магнитного поля.

Ключевые слова:

нелинейные колебания, прецессия намагниченности, ферритовая пластина, ферромагнитный резонанс

Abstract

This work deals with the features of dynamics of the second-order magnetization vector precession excited by a circularly polarized alternating magnetic field in a normally magnetized ferrite plate. Processes of parametric excitation and related losses can be prevented by choosing the normal magnetized plate geometry. The system of the equations was solved numerically by the Runge-Kutta 7-8 orders method with the integration control at every step length. The precession modes of the magnetization vector, amplitude-frequency characteristics of the equilibrium position and parameters of the successive transition between them were determined. Parametric portraits for the precession modes were constructed. Four regimes of the second-order precession that substitute one another in case of the amplitude of the alternating field being increased have also been found. There are the following regimes: regime A - small amplitude circular precession; regime B - precession of equilibrium position without encircling the center; regime C - precession of equilibrium position with encircling the center; regime D - damped precession of equilibrium position. The features of the distribution of instability regions in various modes are revealed. The dependences of the precession frequency on the magnetic field amplitude are determined. The precession frequency of the equilibrium position increases with increasing amplitude of the alternating field up to 800 Oe. After that, the frequency begins to decrease monotonously to the amplitude field of 1050 Oe. However, the precession frequency of the equilibrium position of the magnetization vector increases in the range of amplitudes of the alternating field $1100 \leq h_0 \leq 1650$ Oe. This phenomenon can be explained by occurrence of the oscillations with a combination frequencies caused by the instability region at the doubled disturbance frequency $\omega = 2 \cdot \omega_0$.

Keywords:

nonlinear oscillations, magnetization vector precession, ferrite plate, ferromagnetic resonance

Введение

Исследованию нелинейной динамики магнитной, упругой и магнитоупругой подсистем в ферритовых пленках посвящено значительное количество работ [1–4]. С появлением материалов с высокой добротностью, в первую очередь железоиттриевого граната (ЖИГ) [5], было установлено, что нелинейные явления, имеющие место при крайне малых амплитудах прецессии намагниченности, затрудняют проявление нелинейных процессов, происходящих при больших углах раскрытия конуса прецессии. Данную проблему можно решить путем выбора соответствующей геометрии образца, а именно плоскопараллельной перпендикулярно намагниченной пластиной. При этом частота однородной моды ферромагнитного резонанса приходится на дно спектра обменных спиновых волн, вследствие чего их параметрическое возбуждение становится невозможным.

В работе использована система уравнений, аналогичная представленной в [6] и описывающая электромагнитное нелинейное возбуждение магнитоупругих колебаний в нормально намагниченной пластине, когда параметрическое возбуждение спиновых волн не осуществляется. В работе исследуется только первая упругая мода, а возмущающее переменное поляризованное по кругу поле ориентировано в плоскости пластины.

Геометрия задачи и основные уравнения

В статье рассматривается бесконечная ферритовая пленка, намагниченная по нормали к ее плоскости (см. рис. 1). При этом резонансная частота колебаний намагниченности соответствует дну спектра обменных спиновых волн, что исключает их параметрическое возбуждение. При этом прецессия вектора намагниченности может происходить с отклонением от нормали к плоскости пленки на угол более 10° . Возбуждение колебаний осуществляется посредством приложенного поляризованного по кругу поля, плоскость поляризации которого параллельна плоскости пластины. Задача решается в декартовой системе координат $Oxyz$. Оси координат параллельны ребрам куба кристаллографической ячейки. Центр системы координат O совпадает с центром пластины.

Полагая полную плотность энергии пленки U в поле $\mathbf{H} = \{h_x; h_y; H_0\}$, равной сумме плотностей магнитной, упругой и магнитоупругой энергий, получим

$$U = -M_0 h_x m_x - M_0 h_y m_y - M_0 H_0 m_z + 2\pi M_0^2 m_z^2 + 2c_{44}(u_{xy}^2 + u_{yz}^2 + u_{zx}^2) + 2B_2(m_x m_y u_{xy} + m_y m_z u_{yz} + m_z m_x u_{zx}), \quad (1)$$

где $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_0$ – нормализованный вектор намагниченности, M_0 – намагниченность насыщения пленки, u_{ij} – компоненты тензора деформаций, c_{44} – упругая константа, B_2 – магнитоупругая константа.

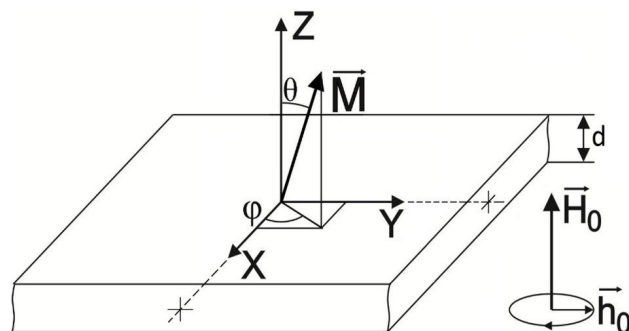


Рис. 1. Геометрия задачи.
Fig. 1. Geometry of the task.

Колебания намагниченности и упругого смещения определяются уравнением Ландау-Лифшица с диссипативным членом в форме Гильберта и уравнением для компонент вектора механических смещений:

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff}] + \alpha \left[\mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u_{xy}}{\partial t^2} = -2\beta \frac{\partial u_{xy}}{\partial t} + \frac{c_{44}}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u_{xy}}{\partial z^2}, \quad (3)$$

где γ – гиромагнитное отношение, α, β – константы затухания для магнитной и упругой подсистем, соответственно.

Эффективные поля определяются следующим образом:

$$\mathbf{H}_{eff} = -\frac{1}{M_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial \mathbf{m}}. \quad (4)$$

Граничные условия:

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

Система уравнений (2–3) с граничным условием (5) решалась численно методом Рунге-Кутты 7–8 порядка с контролем точности на каждом шаге. При расчете использовались параметры материала, типичные для пленки Ni: $M_0 = 440$ Гс, $H_0 = 5500$ Э, параметр затухания магнитной подсистемы равен $\alpha = 0.035$, напряженность компонент переменного поля с круговой поляризацией, лежащей в плоскости Oxy , составила $h_{0x} = h_{0y} = (0 \div 1.5) \cdot 10^3$ Э при частоте переменного поля, равной $\omega_0 = 9 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

Динамика прецессии положения равновесия

На рис. 2 представлены зависимости динамики вектора намагниченности от амплитуды переменного поля для изотропных пленок. Они позволяют выявить четыре основных режима прецессии вектора намагниченности, последовательно сменяющих друг друга с ростом амплитуды переменного магнитного поля. При амплитуде переменного поля $h_0 \rightarrow 0$ реализуется режим А (рис. 2а) – малоамплитудная круговая прецессия, при амплитуде переменного поля ($20 \leq h_0 \leq 950$) Э реализуется режим В (рис. 2б) – прецессия положения равновесия без охвата центра, при ($950 \leq h_0 \leq 1150$) Э – режим С (рис. 2с) – прецессия положения равнове-

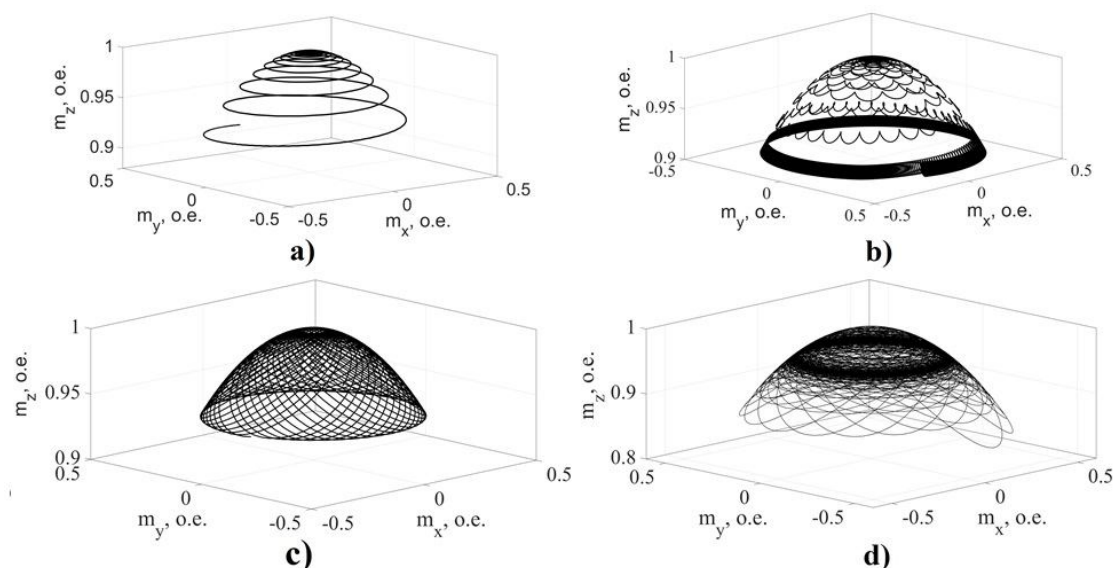


Рис. 2. Режимы прецессии вектора намагниченности: (а) – малоамплитудная круговая прецессия при $h_0 = 1 \text{ Э}$; (б) – прецессия положения равновесия без охвата центра при $h_0 = 75 \text{ Э}$; (с) – прецессия положения равновесия с охватом центра при $h_0 = 10^3 \text{ Э}$; (д) – затухающая прецессия положения равновесия при $h_0 = 1.5 \cdot 10^3 \text{ Э}$.

Fig. 2. Precession modes of the magnetization vector: (a) – low-amplitude circular precession at $h_0 = 1 \text{ Oe}$; (b) – precession of the equilibrium position without the coverage of the center at $h_0 = 75 \text{ Oe}$; (c) – precession of the equilibrium position encompassing the center at $h_0 = 10^3 \text{ Oe}$; (d) – damped precession of the equilibrium position at $h_0 = 1.5 \cdot 10^3 \text{ Oe}$.

сия с охватом центра. Дальнейшее увеличение амплитуды переменного магнитного поля приводит к колебаниям вектора намагниченности в режиме D (рис. 2d) – затухающая прецессия положения равновесия.

Амплитудно-частотные характеристики колебаний вектора намагниченности в указанных режимах представлены на рис. 3. Из него (рис. 3а) видно, что неустойчивость, расположенная в области низких частот, сужена и смещена в нулевую об-

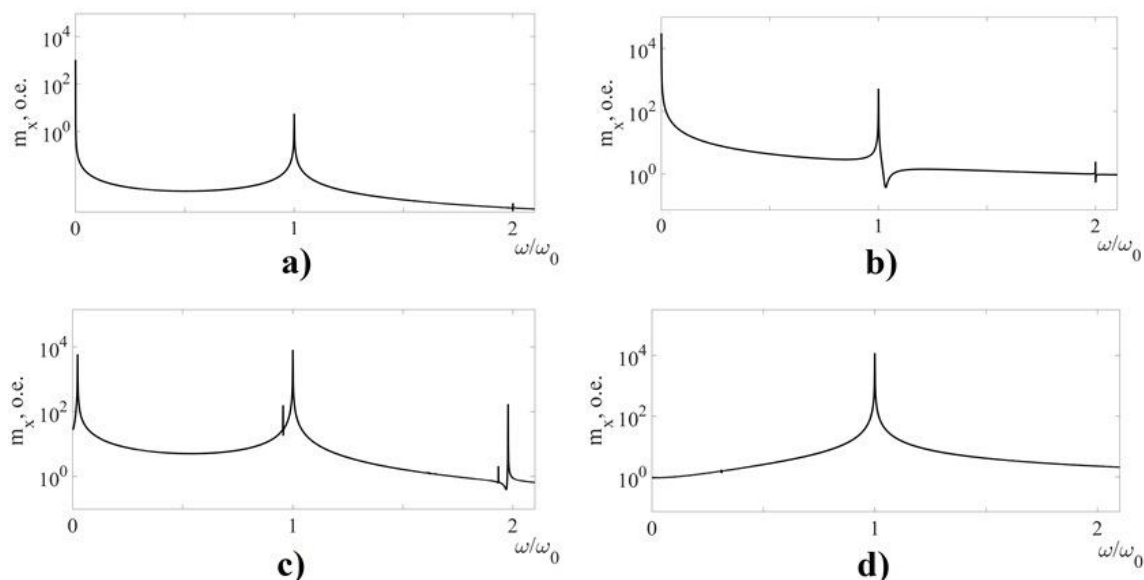


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики режимов прецессии вектора намагниченности: (а) – малоамплитудная круговая прецессия при $h_0 = 1 \text{ Э}$; (б) – прецессия положения равновесия без охвата центра при $h_0 = 75 \text{ Э}$; (с) – прецессия положения равновесия с охватом центра при $h_0 = 10^3 \text{ Э}$; (д) – затухающая прецессия положения равновесия при $h_0 = 1.5 \cdot 10^3 \text{ Э}$.

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics of the precession modes of the magnetization vector: (a) – low-amplitude circular precession at $h_0 = 1 \text{ Oe}$; (b) – precession of the equilibrium position without the coverage of the center at $h_0 = 75 \text{ Oe}$; (c) – precession of the equilibrium position encompassing the center at $h_0 = 10^3 \text{ Oe}$; (d) – damped precession of the equilibrium position at $h_0 = 1.5 \cdot 10^3 \text{ Oe}$.

ласть. Это означает сильное уменьшение частоты осцилляций положения равновесия вектора намагниченности, при этом амплитуда этих колебаний на порядок больше амплитуды колебаний намагниченности на частоте переменного поля ω_0 .

На рис. 3б, представляющем амплитудно-частотную характеристику колебаний компоненты намагниченности m_x в режиме прецессии положения равновесия без охвата центра, видно, что непрерывный спектр в области низких частот незначительно изменяется. Область настойчивости, находящаяся вблизи нулевой отметки, смещается вправо, что говорит об увеличении частоты колебаний прецессии положения равновесия. Амплитуда колебаний на частоте переменного поля резко возрастает на порядок и составляет не менее 10 % амплитуды колебаний на прецессии положения равновесия.

Амплитудно-частотная характеристика прецессии положения равновесия с охватом центра, представленная на рис. 3с, указывает на перераспределение энергии между колебаниями прецессии положения равновесия и колебаниями на частоте переменного поля. При этом в области низких частот спектра пик, соответствующий колебаниям положения равновесия, имеет амплитуду меньшую по величине амплитуды колебаний намагниченности на частоте переменного поля.

Анализ спектров колебаний намагниченности после установления стационарных колебаний в режиме D – затухающая прецессия положения равновесия, представленных на рис. 3д, позволяет сделать вывод о прекращении прецессии положения равновесия за счет затухания колебаний прецессии положения равновесия.

Дальнейшее увеличение амплитуды переменного поля приводит к уменьшению времени достижения стационарного состояния прецессии вектора намагниченности, за счет быстрого затухания прецессии положения равновесия. Прецессионный портрет принимает вид узкого кругового кольца, диаметр которого плавно возрастает по мере увеличения амплитуды переменного поля.

Зависимость частоты прецессии положения равновесия от амплитуды переменного магнитного поля показывает (рис. 4), что с ростом амплитуды переменного поля частота прецессии положения равновесия увеличивается до значения $h_0 = 800$ Э. После чего начинает монотонно уменьшаться до значения переменного поля, равного 1050 Э, что достаточно точно описывает изменения амплитудно-частотных характеристик колебаний вектора намагниченности при смене режимов прецессии и отмечено на рис. 4 областью (I). В области (II) (см. рис. 4), соответствующей затухающей прецессии положения равновесия, наблюдается рост частоты прецессии положения равновесия вектора намагниченности при значениях амплитуды переменного поля в диапазоне ($1100 \leq h_0 \leq 1650$) Э.

В рамках настоящей работы авторы не ставили задачу полностью исчерпывающего исследования описываемых явлений, а старались предста-

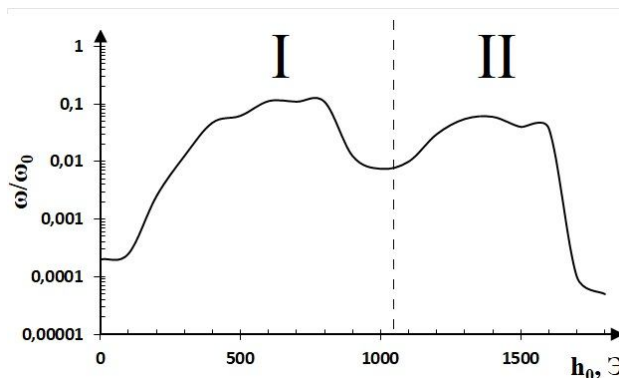


Рис. 4. Зависимость частоты прецессии положения равновесия от амплитуды переменного магнитного поля.

Fig. 4. Dependence of the precession frequency of the equilibrium position on the amplitude of the alternating magnetic field.

вить лишь общую картину в их совокупности. Вопрос причины увеличения частоты прецессии положения равновесия в области (II) авторы оставляют в качестве предмета для дальнейших исследований. Однако в качестве основной причины можно предположить возникновение колебаний с комбинационными частотами, вызванных областью неустойчивости на удвоенной частоте возмущения $\omega = 2 \cdot \omega_0$.

Заключение

В данной работе рассмотрены особенности поведения магнитной подсистемы ферритовой плёнки при воздействии переменного поляризованного по кругу магнитного поля. Получены зависимости развития колебаний вектора намагниченности от амплитуды переменного магнитного поля. Обнаружены колебания намагниченности на частотах прецессии положения равновесия, частоте переменного поля и частоте ФМР во всех режимах при возбуждении пленки переменным магнитным полем, лежащим в плоскости пленки. Определена область амплитуд переменного поля, при которой возможно возбуждение колебаний прецессии положения равновесия. Выявлено смещение частоты колебаний прецессии положения равновесия вектора намагниченности в область высоких частот, обусловленное влиянием удвоенной частоты возбуждения.

Литература

1. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994.
2. Investigation of nonlinear dynamics of magnetoelastic oscillations in normal magnetized ferrite plate / D.A. Pleshev, V.S. Vlasov, L.N. Kotov, F.F. Asadullin, S.M. Polshnikov, V.G. Shavrov, V.I. Shcheglov // Solid State Phenomena. 2015. Vol. 233–234. P. 471–475.
3. Hypersound excitation in the ferrite plate by impulse magnetization reversal / V.S. Vlasov, D.A. Pleshev, L.N. Kotov, V.G. Shavrov, V.I. Shcheglov, F.F. Asadullin, S.M. Polshnikov//

Solid State Phenomena. 2015. Vol. 233–234. P. 480–484.

4. Плесев Д.А., Власов В.С., Асадуллин Ф.Ф., Котов Л.Н. Магнитоупругая нелинейная динамика в ферритовой пластине // Вестник Челябинского государственного университета. Физика. 2015. № 22(377). С. 58–67.
5. LeCraw R.C., Spencer E.G., Porter C.S. Phys. Rev. 1958. Vol. 110. № 6. P. 1311.
6. *Second order precession* in the plate with cubic anisotropy and magnetoelastic properties/ M.S. Kirushev, V.S. Vlasov, D.A. Pleshev, F.F. Asadullin, L.N. Kotov, V.G. Shavrov, V.I. Shcheglov. // Solid State Phenomena. 2015. Vol. 233–234. P. 73–78.

References

1. Gurevich A.G., Melkov G.A. Magnitnyye kolebaniya i volny [Magnetic oscillations and waves] // Moscow: Fizmatlit, 1994. P. 464
2. *Investigation of nonlinear* dynamics of magnetoelastic oscillations in normal magnetized ferrite plate/ D.A. Pleshev, V.S. Vlasov, L.N. Kotov, F.F. Asadullin, S.M. Poleshikov, V.G. Shavrov, V.I. Shcheglov. // Solid State Phenomena. 2015. Vol. 233–234. P. 471–475.

3. *Hypersound excitation* in the ferrite plate by impulse magnetization reversal / V.S. Vlasov, D.A. Pleshev, L.N. Kotov, V.G. Shavrov, V.I. Shcheglov, F.F. Asadullin, S.M. Poleshikov // Solid State Phenomena. 2015. Vol. 233–234. P. 480–484.

4. Pleshev D.A., Vlasov V.S., Asadullin F.F., Kotov L.N. Magnitouprugaya nelineynaya dinamika v ferritovoy plastine [Magnetoelastic nonlinear dynamics in ferrite plate] // Bull. of Chelyabinsk State Univ. Physics. 2015. No. 22(377). P. 58–67.
5. LeCraw R.C., Spencer E.G., Porter C.S. Phys. Rev. 1958. Vol. 110. № 6. P. 1311.
6. *Second order precession* in the plate with cubic anisotropy and magnetoelastic properties/ M.S.Kirushev, V.S.Vlasov, D.A.Pleshev, F.F. Asadullin, L.N.Kotov, V.G.Shavrov, V.I.Shcheglov // Solid State Phenomena. 2015. Vol. 233–234. P. 73–78.

Статья поступила в редакцию 12.09.2019