

Электроника СВЧ

УДК 537.87 УДК 534.014.2; 537.622.4

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-5-63-70>

## Нелинейные колебания намагниченности в касательно намагниченном пленочном ферромагнитном резонаторе

Р. В. Гапончик<sup>1✉</sup>, Э. Лахдеранта<sup>2</sup>, А. Б. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ЛТУ-Университет, Лаппеенранта, Финляндия

✉ferumno33@gmail.com

### Аннотация

**Введение.** Резонаторы на основе эпитаксиально выращенных монокристаллических пленок железомитриеевого граната находят применение в сверхвысокочастотной электронике. Известно, что с ростом падающей на резонатор СВЧ-мощности начинают проявляться различные нелинейные эффекты: эффект бистабильности, нелинейный сдвиг частоты, нелинейное затухание и др. В настоящее время перечисленные нелинейные эффекты достаточно хорошо экспериментально исследованы. Ранее при описании колебаний различных динамических систем нелинейное затухание и нелинейный сдвиг частоты обычно рассматривались по отдельности. Известно, что эти эффекты могут возникать одновременно в пленочных ферромагнитных резонаторах с ростом амплитуды колебаний намагниченности.

**Цель работы.** Построение модели вынужденных колебаний в слабонелинейных системах с учетом нелинейного сдвига частоты и нелинейного затухания, а также ее экспериментальное обоснование на примере пленочного ферромагнитного резонатора.

**Материалы и методы.** Построение модели проводилось методом медленно меняющихся амплитуд. Экспериментальное исследование проводилось на макете пленочного ферромагнитного резонатора. Использовался векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZVA 40. Измерялась частотная зависимость коэффициента отражения СВЧ-сигнала от резонатора.

**Результаты.** Модель нелинейных колебаний намагниченности с одновременным учетом нелинейного сдвига частоты и нелинейного затухания. Экспериментально измерены резонансные кривые при различных уровнях падающей на резонатор СВЧ-мощности. Показано, что нелинейное затухание ограничивает нелинейный сдвиг частоты колебаний намагниченности в касательно намагниченном пленочном ферромагнитном резонаторе.

**Заключение.** Построенная модель адекватно описывает поведение резонансных кривых пленочных ферромагнитных резонаторов при повышенных уровнях СВЧ-мощности. Нелинейное затухание приводит к расширению резонансных кривых, тем самым увеличивая потери. Этот эффект также увеличивает коэффициент отражения СВЧ-сигнала от резонатора.

**Ключевые слова:** пленочный ферромагнитный резонатор, железомитриеевый гранат, спиновые волны, нелинейные колебания

**Для цитирования:** Гапончик Р. В., Лахдеранта Э., Устинов А. Б. Нелинейные колебания намагниченности в касательно намагниченном пленочном ферромагнитном резонаторе // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 5. С. 63–70. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-63-70

**Источник финансирования.** Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант №0788-2020-0005).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.08.2020; принята к публикации после рецензирования 11.09.2020; опубликована онлайн 25.11.2020

© Гапончик Р. В., Лахдеранта Э., Устинов А. Б., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

## Nonlinear Oscillations of Magnetization in a Tangentially Magnetized Ferromagnetic Film Resonator

Roman V. Haponchyk<sup>1✉</sup>, Erkki Lähderanta<sup>2</sup>, Alexey B. Ustinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>LUT–University, Lappeenranta, Finland

✉ferumno33@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Resonators based on epitaxially grown single-crystal films of yttrium iron garnet are used in various applications of microwave electronics. It is known that with increasing of microwave power incident on a resonator, various nonlinear effects begin to manifest themselves. There are: bistability effect, nonlinear frequency shift, nonlinear damping, etc. By now, the listed nonlinear effects have been quite good studied experimentally. Previously, when describing oscillations of various dynamical systems, the nonlinear damping and the nonlinear frequency shift were usually considered separately. At the same time, it was known that, when studying nonlinear magnetization oscillations in ferromagnetic film resonators with an increase in oscillation amplitude, these effects could occur simultaneously.

**Aim.** Development of a model of magnetization oscillations taking into account the nonlinear frequency shift and nonlinear damping, as well as its experimental justification for a ferromagnetic film resonator.

**Materials and methods.** The development of the model was carried out by the method of slowly varying amplitudes. An experimental study was carried out with a ferromagnetic film resonator. For the measurements, we used Rohde & Schwarz ZVA 40 vector network analyzer. We measured the frequency dependence of the reflection coefficient of the microwave signal from the resonator.

**Results.** A model of nonlinear magnetization oscillations was developed taking into account both a nonlinear frequency shift and a nonlinear attenuation. The resonance curves were experimentally measured at various levels of the microwave power incident on the resonator. It was shown that nonlinear damping limits the nonlinear frequency shift of the magnetization oscillations in a tangentially magnetized ferromagnetic film resonator.

**Conclusion.** The developed model adequately describes behavior of the resonance curves of ferromagnetic film resonators at high microwave power levels. The nonlinear damping leads to broadening of the resonance curves, thereby increasing losses. This effect also increases the reflection coefficient of the microwave signal from the resonator.

**Keywords:** ferromagnetic film resonator, yttrium iron garnet, spin waves, nonlinear oscillations

**For citation:** Haponchyk R. V., Lähderanta E., Ustinov A. B. Nonlinear Oscillations of Magnetization in a Tangentially Magnetized Ferromagnetic Film Resonator. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 5, pp. 63–70. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-63-70

**Source of financing.** The work was supported by the Ministry of Science and higher education of the Russian Federation (project "Goszadanie", grant no. 0788-2020-0005).

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

Submitted 04.08.2020; accepted 11.09.2020; published online 25.11.2020

**Введение.** Резонаторы на основе эпитаксиально выращенных монокристаллических пленок железиттриевого граната находят различное применение в сверхвысокочастотной электронике [1–5]. Известно, что с ростом падающей на резонатор СВЧ-мощности начинают проявляться различные нели-

нейные эффекты: эффект бистабильности [6–17], нелинейный сдвиг частоты [18–20], нелинейное затухание [18, 21], параметрическая регенерация колебаний [20] и др. К настоящему времени перечисленные нелинейные эффекты достаточно хорошо экспериментально исследованы.

Ранее при описании колебаний различных динамических систем нелинейное затухание и нелинейный сдвиг частоты обычно рассматривались по отдельности (см., например, [16]). Вместе с тем известно, что эти эффекты могут возникать одновременно в пленочных ферромагнитных резонаторах с ростом амплитуды колебаний намагниченности [18].

Целью настоящей статьи является построение модели вынужденных колебаний в слабонелинейных системах с учетом нелинейного сдвига частоты и нелинейного затухания, а также ее экспериментальное обоснование на примере пленочного ферромагнитного резонатора.

**Модель вынужденных нелинейных колебаний.** Из теории колебаний известно, что вынужденные колебания в линейных диссипативных системах описываются уравнением

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

где  $x$  – нормальная координата;  $\delta$  – параметр релаксации;  $\omega_0$  – резонансная частота свободных колебаний;  $P$  – амплитуда вынуждающей силы;  $p$  – частота вынуждающей силы. При воздействии на такую систему периодической внешней силы, варьируя ее частоту, можно наблюдать известное явление резонанса.

При одновременном учете нелинейного затухания и нелинейного сдвига частоты уравнение колебаний приобретает вид

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

где  $\beta, \gamma$  – коэффициенты нелинейного затухания и нелинейного сдвига частоты соответственно. Перечисленные параметры являются феноменологическими. Они возникают в результате разложения параметра диссипации и частоты в степенной ряд.

Уравнение (1) будем решать методом медленно меняющихся амплитуд [21]. Сначала приведем уравнение к виду

$$\ddot{x} + x = \mu f(x, \dot{x}, t), \quad (2)$$

где  $\mu \ll 1$  – коэффициент, показывающий малость правой части (2) и не участвующий в расчетах. Будем искать решение (2) в виде

$$x = A(\tau) \cos[\tau + \vartheta(\tau)], \quad (3)$$

где  $A(\tau)$  и  $\vartheta(\tau)$  – функции, с течением времени  $\tau = pt$  изменяющиеся медленно.

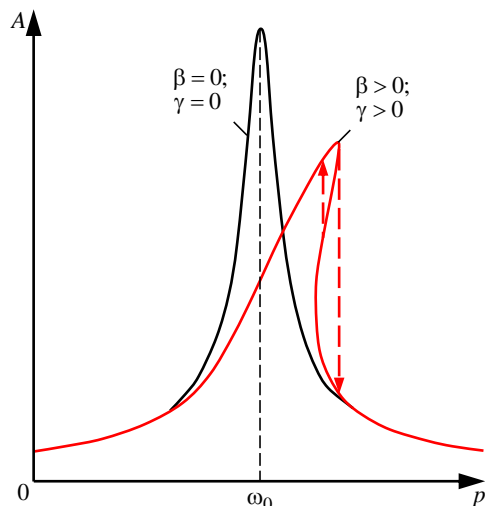


Рис. 1. Резонансные кривые при нулевых и ненулевых коэффициентах нелинейного затухания и нелинейного сдвига частоты

Fig. 1. Resonant curves for zero and nonzero coefficients of nonlinear damping and frequency shift

После ряда математических преобразований получим выражение, описывающее резонансную кривую нелинейного осциллятора:

$$p^2 = \omega_0^2 N - 2\delta^2 D^2 \pm \sqrt{\left(P^2/A^2\right) + \left(2\delta^2 D^2 - \omega_0^2 N\right)^2 - \omega_0^2 N^2}, \quad (4)$$

где  $N = 1 + 3/(4\gamma A^2)$ ;  $D = 1 + 3/(4\beta A^2)$ .

На рис. 1 показаны качественные теоретические зависимости, рассчитанные по (4) для резонансной частоты  $\omega_0$  при линейных колебаниях ( $\beta=0, \gamma=0$ ) и в случае нелинейных колебаний ( $\beta>0, \gamma>0$ ). Из графиков видно, что полученное выражение одновременно учитывает нелинейный сдвиг частоты и нелинейное затухание. Нелинейное затухание приводит к расширению резонансной кривой и к уменьшению амплитуды колебаний, а нелинейный сдвиг частоты вызывает сдвиг максимума амплитуды колебаний и появление бистабильности.

**Эксперимент.** Экспериментальное исследование проводилось с целью изучения режима нелинейных колебаний намагниченности в пленочном ферромагнитном резонаторе (ПФР). Резонатор был изготовлен из пленки железоиттриевого граната (ЖИГ). Образец ПФР (рис. 2) имел в плоскости квадратную форму с размерами сторон  $a = b = 1$  мм. Толщина пленки составляла  $L = 7$  мкм. Намагниченность насыщения  $M_0 = 0.175$  Тл. Резонатор был намагничен в плоскости полем  $H_0 = 14 \cdot 10^4$  А/м (рис. 2).

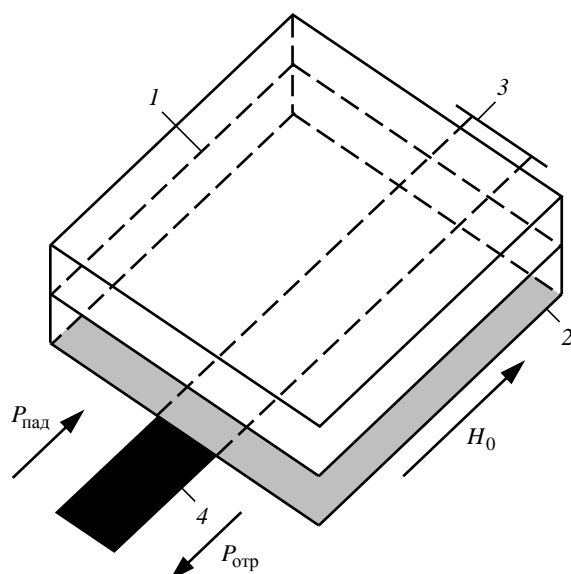


Рис. 2. Схематическое изображение макета резонатора: 1 – подложка из галлий-гадолиниевого граната, 2 – пленка ЖИГ, 3 – короткое замыкание, 4 – микрополосковая антенна

Fig. 2. Schematic diagram of the resonator layout: 1 – GGG substrate, 2 – yttrium iron garnet film resonator, 3 – short circuit, 4 – microstrip antenna

Исследование резонансных кривых пленочно-го ферромагнитного резонатора проводилось на экспериментальной установке, состоявшей из векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA 40, экспериментального макета резонатора и постоянного магнита. Характеристики резонатора на пленке ЖИГ измерялись в диапазоне частот от 5.1 до 5.3 ГГц. Определялся коэффициент отражения СВЧ-сигнала от резонатора как функция частоты:  $S_{11} = 10 \log [P_{\text{отр}} / P_{\text{пад}}]$ , где  $P_{\text{отр}}$  и  $P_{\text{пад}}$  – отраженная и падающая СВЧ-мощности соответственно.

**Результаты.** На рис. 3, а изображены зависимости коэффициента отражения СВЧ-сигнала от резонатора  $S_{11}$ , показывающие резонансные кривые, соответствующие колебаниям низшего типа. Измерения проведены при падающей мощности в диапазоне от 0.01 до 10 мВт. На рис. 3, б изображены зависимости нормированной поглощенной мощности  $P_{\text{погл}}$  от частоты, полученные пересчетом зависимостей  $S_{11}(f)$  по формулам  $S_{11} = 10 \log [P_{\text{отр}} / P_{\text{пад}}]$  и  $P_{\text{погл}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}}$ .

**Обсуждение.** Для теоретического описания характеристик исследуемого резонатора используем модель вынужденных нелинейных колебаний, рассмотренную ранее. При рассмотрении

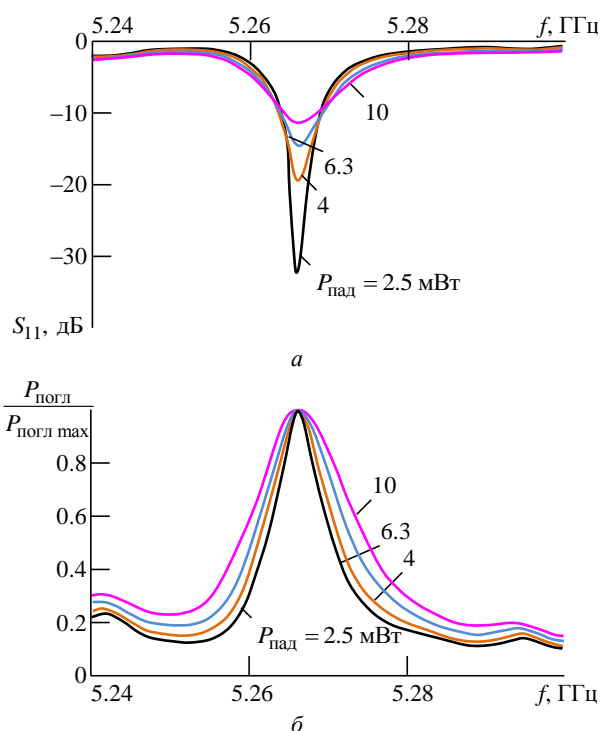


Рис. 3. Зависимости коэффициента отражения (а) и поглощенной мощности (б) пленочного ЖИГ-резонатора от частоты

Fig. 3. Frequency dependences of the reflection coefficient (a) and absorbed power (б) of the YIG film resonator

колебаний намагниченности за переменную возьмем проекцию вектора переменной намагниченности  $m$  на ось  $x$ . Тогда (3) примет вид

$$m_x = |m(\tau)| \cos[\tau + \vartheta(t)].$$

Запишем параметр релаксации с учетом влияния амплитуды колебаний намагниченности в следующем виде:

$$\omega_r (|U|^2) = 2\delta (1 + \beta \omega_0^2 |U|^2),$$

где  $|U| = |m| / (\sqrt{2}M)$  – нормированная амплитуда колебаний намагниченности [10].

Значения  $2\delta$  и  $\beta$  получены по результатам эксперимента. В эксперименте, выполненном при низком уровне мощности, получено  $2\delta = 3.32$  МГц. Значение параметра нелинейного затухания, определенное из условия совпадения эксперимента и теории, составило  $\beta = 3.7 \cdot 10^{-15} \text{ Гц}^{-2}$ .

По результатам обработки измерений резонансных кривых (рис. 3) получена экспериментальная зависимость частоты релаксации колебаний намагниченности от значения поглощенной пленочным ЖИГ-резонатором мощности (рис. 4).

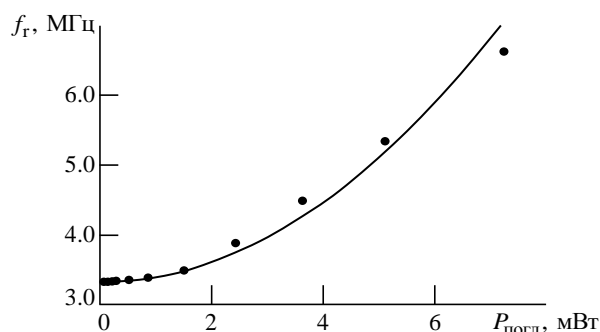


Рис. 4. Зависимость частоты релаксации колебаний намагниченности пленочного ЖИГ-резонатора от поглощенной мощности. Маркеры – экспериментальные данные, линия – результат теоретических расчетов

Fig. 4. Dependence of the relaxation frequency of magnetization oscillations of a YIG film resonator on the absorbed power. Markers – experimental data, line – the result of theoretical calculations

Из нее следует, что с ростом поглощаемой мощности растет и частота релаксации. Эта зависимость проявляется в уширении резонансных кривых. Отсюда можно сделать вывод, что развитие нелинейных процессов уменьшает нагруженную добротность резонаторов и увеличивает вносимые в систему потери, что необходимо учитывать при разработке приборов на основе таких резонаторов.

Резонансную частоту и ее нелинейный сдвиг определим с помощью дисперсионного уравнения, в котором учтена зависимость частоты спиновых волн от квадрата их нормированной амплитуды. Это уравнение имеет вид

$$\omega^2(|U|^2) = \left[ \omega_H + \omega_{M_0} (1 - |U|^2) \left( \frac{1 - e^{-kL}}{kL} \right) \right] \times \left[ \omega_H + \omega_{M_0} (1 - |U|^2) \left( \frac{k_y}{k} \right) \left( 1 - \frac{1 - e^{-kL}}{kL} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\omega_H = 2\pi\gamma H_0$ ;  $\omega_{M_0} = 2\pi\gamma M_0$ ;  $k = \sqrt{k_y^2 + k_z^2}$ , причем  $k_y = n\pi/a$ ;  $k_z = m\pi/a$  ( $m$  и  $n$  – целые числа, определяющие моду колебаний);  $\gamma = 0.035 \frac{\text{МГц} \cdot \text{м}}{\text{А}}$  – гиромагнитное отношение.

В теории используются обозначения циклической частоты  $\omega$ , которая связана с частотой  $f$  известным соотношением  $\omega = 2\pi f$ .

Зависимость амплитуды колебаний намагниченности от мощности можно записать в виде

$$U = \frac{\sqrt{P_{\text{полг}}/B}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_r \omega)^2}}, \quad (6)$$

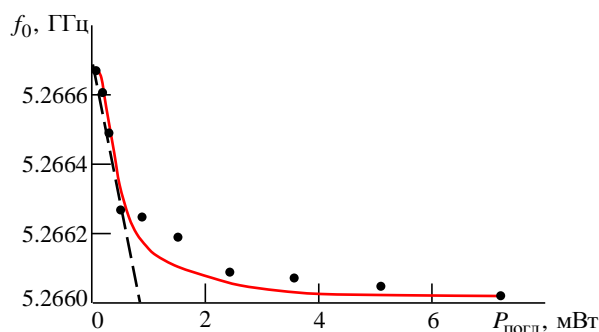


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты резонатора от поглощенной мощности. Маркеры – экспериментальные данные, сплошная линия – результат теоретических расчетов, штриховая линия – построение для определения коэффициента связи

Fig. 5. Dependence of the resonant frequency of the resonator on the absorbed power. Markers – experimental data, solid line – the result of theoretical calculations, dashed line – plot for determine of the coupling coefficient

где  $B$  – коэффициент связи между поглощенной мощностью и амплитудой собственных колебаний ферритового резонатора. При совпадении частоты вынужденных колебаний с собственной частотой резонатора из (6) имеем:

$$U = \frac{\sqrt{P_{\text{полг}}/B}}{2\omega_r \omega}. \quad (7)$$

Коэффициент  $B$  введен для сопоставления теоретической и экспериментальной зависимостей резонансной частоты от поглощенной мощности. Он связывает поглощенную мощность и квадрат амплитуды колебаний намагниченности:

$$P_{\text{полг}} = B|U_0|^2. \quad (8)$$

Значение коэффициента было определено сопоставлением экспериментальной и теоретической зависимостей резонансной частоты от поглощенной мощности на начальном линейном участке (рис. 5, штриховая линия). Используя (7) и (8), получено  $B = 2185 \text{ Вт}$ . После этого теоретическая зависимость резонансной частоты от поглощенной мощности была рассчитана по (5) (рис. 5, сплошная линия).

**Заключение и выводы.** Хорошее совпадение экспериментальных (рис. 5, маркеры) и теоретических (рис. 5, сплошная линия) результатов позволяет сделать вывод о том, что метод медленно меняющихся амплитуд применим для описания нелинейных колебаний намагниченности с учетом как нелинейного сдвига частоты, так и нелинейного затухания. Нелинейное затухание

приводит к уширению резонансных кривых, тем самым увеличивая потери. Этот эффект также увеличивает коэффициент отражения СВЧ-сигнала от резонатора. Наличие нелинейного затухания позволяет существенно ограничить влияние нелинейного сдвига частоты колебаний намагниченности в ПФР.

На основе исследованных нелинейных эффектов возможно создание различных приборов для обработки и генерации СВЧ-сигналов. В качестве примера приведем СВЧ-ограничители и шумоподавители.

### Список литературы

1. Ishak W. S., Chang K-W. Tunable Microwave Resonators using Magnetostatic Wave in YIG films // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1986. Vol. 34, № 12. P. 1383–1393. doi: 10.1109/TMTT.1986.1133553
2. Ferrite Devices and Materials / J. D. Adam, L. E. Davis, G. F. Dionne, E. F. Schloemann, S. N. Stitzer // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, № 3. P. 721–737. doi: 10.1109/22.989957
3. Ustinov A. B., Srinivasan G., Fetisov Y. K. Microwave Resonators based on Single-crystal Yttrium-Iron Garnet and Single-crystal Lead Magnesium Niobate-lead Titanate Layered Structures // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103, № 6. Art. 063901. 6 p.
4. Dual Tunable Thin-film Ferrite-ferroelectric Slotline Resonator / A. A. Semenov, P. Yu. Beljavski, A. A. Nikitin, S. F. Karmanenko, B. A. Kalinikos, G. Srinivasan // Electronics Lett. 2008. Vol. 44, № 24. P. 1406–1407. doi:10.1049/el:20082122
5. Fetisov Y. K., Patton C. E. Thermal Microwave Foldover and Bistability in Ferromagnetic Resonance // IEEE Trans. on Magnetics. 2004. Vol. 40, № 2. P. 473–482. doi: 10.1109/TMAG.2004.824132
6. Microwave Bistability in Active Ring Resonators with Dual Spin-wave and Optical Nonlinearities / V. V. Vitko, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos // IEEE Magnetics Lett. 2018. Vol. 9. Art. 3506304. doi: 10.1109/LMAG.2018.2870060
7. Fetisov Y. K., Patton C. E., Synogach V. T. Nonlinear Ferromagnetic Resonance and Foldover in Yttrium Iron Garnet Thin Films-inadequacy of the Classical Model // IEEE Trans. on Magnetics. 1999. Vol. 35, № 6. P. 4511–4521. doi: 10.1109/20.809144
8. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
9. Zhang Y. T., Patton C. E., Kogekar M. Ferromagnetic Resonance Foldover in Single Crystal YIG Films – Sample Heating or Suhl Instability // IEEE Trans. on Magnetics. 1986. № 5. P. 993–995. doi: 10.1109/TMAG.1986.1064446
10. Gui Y. S., Wirthmann A., Hu C.-M. Foldover Ferromagnetic Resonance and Damping in Permalloy Microstrips // Physical Review B. 2009. Vol. 80. Art. 184422. 13 p. doi: 10.1103/PhysRevB.80.184422
11. Zhang Y. T., Patton C. E., Srinivasan G. Spinwave Instability and "true" Foldover in Single Crystal YIG Films // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63. P. 13–18.
12. Praveen-Janantha P. A., Kalinikos B. A., Wu M. Foldover of Nonlinear Eigenmodes in Magnetic Thin Film based Feedback Rings // Physical Review B. 2017. № 95, № 6. Art. 0644225 p. doi: 10.1103/PhysRevB.95.064422
13. Direct Measurement of Foldover in Cavity Magnon-polariton Systems / P. Hyde, B. M. Yao, Y. S. Gui, G.-Q. Zhang, C.-M. Hu, J. Q. You, C.-M. Hu // Physical Review B. 2018. № 95. Art. 174423. 9 p. doi:10.1103/PhysRevB.98.174423
14. Ferromagnetic Resonance Foldover and Spin-wave Instability in Single-crystal YIG Films / M. Chen, C. E. Patton, G. Srinivasan, Y. T. Zhang // IEEE Trans. on Magnetics. 1989. Vol. 25, № 5. P. 3485–3487. doi: 10.1109/20.42343
15. Seagle D. J., Charap S. H., Artman J. O. Foldover in YIG // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57, № 8. P. 3706–3708.
16. Дроздовский А. В., Устинов А. Б. Нелинейный отклик пленочного ферромагнитного резонатора в условиях нелинейного затухания колебаний намагниченности // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 18. С. 10–18.
17. Yan H., Wang Q., Awai I. Resonant frequency shift in a MSSW-SER with excitation power // Electronics Lett. 1996. Т. 32, № 19. С. 1787–1789.
18. Львов В. С. Нелинейные спиновые волны. М.: Наука, 1987. 270 с.
19. Nonlinear Damping of High-power Magnetostatic Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films / M. M. Scott, C. E. Patton, M. P. Kostylev, B. A. Kalinikos // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95, № 11. P. 6294–6301.
20. Калиникос Б. А., Ковшиков Н. Г., Оспанов Е. А. Параметрическая регенерация спиновых колебаний пленочного ферромагнитного резонатора сверхвысокочастотной накачкой // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, № 16. С. 82–84.
21. Основы теории колебаний / В. В. Мигулин, В. И. Медведев, Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. М.: Наука, 1988. 392 с.

### Авторский вклад

**Гапончик Роман Валерьевич** – разработка теории; проведение экспериментальных измерений и математических расчетов; подготовка статьи.

**Лахдеранта Эрки** – обсуждение результатов; руководство научными исследованиями.

**Устинов Алексей Борисович** – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

### Author's contribution

**Roman V. Haponchyk**, development of the theory; carrying out the measurements and calculations; preparation of the paper text.

**Erkki Lähderanta**, discussion of the results; management of the work.

**Alexey B. Ustinov**, formulation of the problem; discussion of the results; management of the work; preparation of the paper text.

### Информация об авторах

**Гапончик Роман Валерьевич** – бакалавр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2018), студент 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов: нелинейные колебания, резонаторы, бистабильность, спиновые волны, радиофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: ferumno33@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8764-7100>

**Эрkki Лахдеранта** – доктор философии (физика твердого тела) (1993), профессор физики (2004) Школы технических наук ЛТУ-Университета (Лаппеенранта, Финляндия). Автор более 300 научных публикаций. Сфера научных интересов: спинтроника, магнитные материалы, сверхпроводимость, дендримеры.

Адрес: LUT-University, 34 Yliopistonkatu, Lappeenranta, 53850, Finland

E-mail: [erkki.lahderanta@lut.fi](mailto:erkki.lahderanta@lut.fi)

<https://orcid.org/0000-0002-1596-2849>

**Устинов Алексей Борисович** – доктор физико-математических наук (2012), доцент (2010) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных публикаций. Сфера научных интересов: линейные и нелинейные колебания и волны в магнитных пленках и слоистых структурах, СВЧ-электроника, радиофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: [Ustinov\\_rus@yahoo.com](mailto:Ustinov_rus@yahoo.com)

<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

### References

1. Ishak W. S., Chang K-W. Tunable Microwave Resonators using Magnetostatic Wave in YIG films. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1986, vol. 34, no. 12, pp. 1383–1393. doi: 10.1109/TMTT.1986.1133553
2. Adam J. D., Davis L. E., Dionne G. F., Schloemann E. F., Stitzer S. N. Ferrite Devices and Materials. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2002, vol. 50, no. 3, pp. 721–737. doi: 10.1109/22.989957
3. Ustinov A. B., Srinivasan G., Fetisov Y. K. Microwave Resonators based on Single-crystal YttriumIron Garnet and Single-crystal Lead Magnesium Niobate-lead Titanate Layered Structures. J. Appl. Phys. 2008, vol. 103, no. 6, art. 063901, 6 p.
4. Semenov A. A., Beljavski P. Yu., Nikitin A. A., Karmanenko S. F., Kalinikos B. A., Srinivasan G. Dual Tunable Thin-film Ferrite-ferroelectric Slotline Resonator. Electronics Lett. 2008, vol. 44, no. 24, pp. 1406–1407. doi: 10.1049/el:20082122
5. Fetisov Y. K., Patton C. E. Thermal Microwave Foldover and Bistability in Ferromagnetic Resonance. IEEE Trans. on Magnetism. 2004, vol. 40, no. 2, pp. 473–482. doi:10.1109/TMAG.2004.824132
6. Vitko V. V., Nikitin A. A., Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Microwave Bistability in Active Ring Resonators with Dual Spin-wave and Optical Nonlinearities. IEEE Magnetics Lett. 2018, vol. 9, art. 3506304. doi: 10.1109/LMAG.2018.2870060
7. Fetisov Y. K., Patton C. E., Synogach V. T. Nonlinear Ferromagnetic Resonance and Foldover in Yttrium Iron Garnet Thin Films-inadequacy of the Classical Model. IEEE Trans. on Magnetism. 1999, vol. 35, no. 6, pp. 4511–4521. doi: 10.1109/20.809144
8. Gurevich A. G., Melkov G. A. Magnetic vibrations and waves. M.: Fizmatlit, 1994, 464 p. (In Russ.)
9. Zhang Y. T., Patton C. E., Kogekar M. Ferromagnetic Resonance Foldover in Single Crystal YIG Films – Sample Heating or Suhl Instability. IEEE Trans. on Magnetism. 1986, no. 5, pp. 993–995. doi: 10.1109/TMAG.1986.1064446
10. Gui Y. S., Wirthmann A., Hu C.-M. Foldover Ferromagnetic Resonance and Damping in Permalloy Microstrips. Physical Review B. 2009, vol. 80, art. 184422, 13 p. doi: 10.1103/PhysRevB.80.184422
11. Zhang Y. T., Patton C. E., Srinivasan G. Spinwave



- Instability and "true" Foldover in Singlecrystal YIG Films. J. Appl. Phys. 1988, vol. 63, pp. 13–18.
12. Praveen-Janantha P. A., Kalinikos B. A., Wu M. Foldover of Nonlinear Elgenmodes in Magnetic Thin Film based Feedback Rings. Physical Review B. 2017, no. 95, no. 6, art. 064422, 5 p. doi: 10.1103/PhysRevB.95.064422
13. Hyde P., Yao B. M., Gui Y. S., Zhang G.-Q., Hu C.-M., You J. Q., Hu C.-M. Direct Measurement of Foldover in Cavity Magnon-polariton Systems. Physical Review B. 2018, no. 95, art. 174423, 9 p. doi:10.1103/PhysRevB.98.174423
14. Chen M., Patton C. E., Srinivasan G., Zhang Y. T. Ferromagnetic Resonance Foldover and Spin-wave Instability in Single-crystal YIG Films. IEEE Trans. on Magnetics. 1989, vol. 25, no. 5, pp. 3485–3487. doi: 10.1109/20.42343
15. Seagle D. J., Charap S. H., Artman J. O. Foldover in YIG. J. Appl. Phys. 1985, vol. 57, no. 8, pp. 3706–3708.
16. Drozdovsky A. V., Ustinov A. B. Nonlinear response of a film ferromagnetic resonator under conditions of non-linear attenuation of magnetization oscillations. Lett. in ZhTF. 2010, vol. 36, no. 18, pp. 10–18. (In Russ.)
17. Yan H., Wang Q., Awai I. Resonant frequency shift in a MSSW-SER with excitation power. Electronics Lett. 1996, vol. 32, no. 19, pp. 1787–1789.
18. Lviv V. S. nonlinear spin waves. M.: Nauka, 1987, 270 p. (In Russ.)
19. Scott M. M., Patton C. E., Kostylev M. P., Kalinikos B. A. Nonlinear Damping of High-power Magneto-static Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films. J. Appl. Phys. 2004, vol. 95, no. 11, pp. 6294–6301.
20. Kalinikos B. A., Kovshikov N. G., Ospanov E. A. Parametric regeneration of spin vibrations of a film ferromagnetic resonator by ultrahigh-frequency pumping. Lett. in ZhTF. 1997, vol. 23, no. 16, pp. 82–84. (In Russ.)
21. Migulin V. V., Medvedev V. I., Mustel E. R., Parygin V. N. Fundamentals of the theory of vibrations. M.: Nauka, 1988, 392 p. (In Russ.)

### Information about the authors

**Roman V. Haponchyk**, Bachelor's degree in electronic and nanoelectronics (2018), the 2h year master degree student of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: nonlinear oscillators, resonators, bistability, spin waves, microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: ferumno33@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-8764-7100>

**Erkki Lähderanta**, Dr. Phil. (Solid State Physics) (1993), Professor in Physics (2004) of LUT School of Engineering Science of LUT-University. The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: spintronics, magnetic materials, superconductivity, dendrimers.

Address: LUT-University, 34 Yliopistonkatu, Lappeenranta 53850, Finland  
E-mail: [erkki.lahderanta@lut.fi](mailto:erkki.lahderanta@lut.fi)  
<https://orcid.org/0000-0002-1596-2849>

**Alexey B. Ustinov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (2012), Associate Professor (2010) of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: linear and non-linear properties of magnetic oscillations and waves in ferromagnetic films and layered structures on their basis; microwave devices, microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: [Ustinov\\_rus@yahoo.com](mailto:Ustinov_rus@yahoo.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

---