

## Расчет и экспериментальное измерение спектров собственных колебаний ферритовых резонаторов невзаимных волноводных устройств СВЧ и КВЧ

А.А. Солдатов, Л.Н. Трифонова, А.А. Кузьменко

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
443010, Россия, г. Самара,  
ул. Л. Толстого, 23

*Аннотация* – В предлагаемой работе в приближении магнитных стенок получено уравнение для определения собственных частот резонатора, которое может быть использовано при проектировании как Е-, так и Н-плоскостных устройств. Выявлены основные закономерности спектров собственных колебаний ферритовых резонаторов и их влияние на электродинамические параметры невзаимных устройств. Приводятся и обсуждаются экспериментальные результаты для Е- и Н-плоскостных циркуляторов. Описана оптимальная процедура настройки невзаимных ферритовых устройств.

*Ключевые слова* – ферромагнитный резонанс, ферритовый резонатор, невзаимные волноводные устройства (вентили и циркуляторы), спектры собственных колебаний.

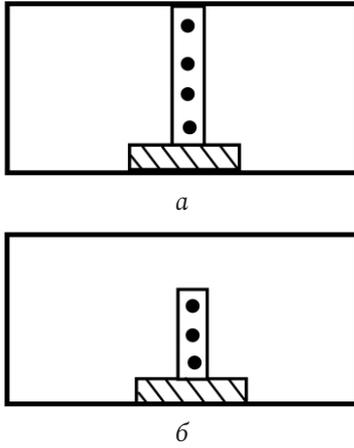
### Введение

В коротковолновой части СВЧ-диапазона особый интерес представляет собой излучение невзаимных устройств с высотой ферритового элемента, меньшей высоты волновода. Наличие воздушного зазора между ферритом и стенкой волновода приводит к возникновению неоднородности поля вдоль оси ферритового цилиндра, что значительно усложняет электродинамический анализ устройств. По этой причине в настоящее время, с одной стороны, отсутствует теория, достаточно хорошо описывающая экспериментальные дисперсионные характеристики ферритовых устройств в широком диапазоне частот. Существует лишь небольшое количество работ, в которых исследуется феррито-диэлектрические резонаторы с высотой, меньшей высоты волновода (см., например, [1]). С другой стороны, в последнее время в научно-технической литературе появились сообщения о разработке достаточно широкополосных циркуляторов, функционирующих на высших типах колебаний ферритовых резонаторов (резонаторов увеличенных размеров) в коротковолновой части СВЧ-диапазона. Например, в [2] говорится о создании циркулятора в полосе частот от 92,5 ГГц до 100,6 ГГц (к сожалению, в этой работе не определены геометрические размеры резонатора). Все это говорит о необходимости исследований спектров собственных колебаний намагниченных феррито-диэлектрических резонаторов, без знания которых невозможна оптимизация ферритовых устройств.

В данной работе приводятся и обсуждаются экспериментальные и теоретические результаты исследований спектра собственных колебаний ферритовых резонаторов с высотой феррита меньше размера волновода. В приближении магнитных стенок получено уравнение для определения собственных частот резонатора. Полученное соотношение является унифицированным. Оно справедливо как для Е-, так и для Н-плоскостных устройств. Кроме того, рассматриваются и вопросы оценки рабочей полосы частот ферритовых приборов.

### 1. Математическая модель ферритового резонатора. Уравнение для определения собственных частот

В целях достаточно максимальной общности рассмотрим ферритовый резонатор с граничными условиями  $E_X = E_Y = 0$  при  $z = 0, H$  (на рис. 1, а показана его геометрия,  $H$  – высота резонатора). Так как ферритовый цилиндр намагничен вдоль своей оси (вдоль оси  $z$ ), то собственные колебания в структуре распадаются на две невзаимные группы, причем для одной группы колебаний в плоскости  $z = H/2$  справедливо граничное условие  $E_X = E_Y = 0$  (электрическая стенка), а для другой –  $H_X = E_Y = 0$  (магнитная стенка). Очевидно, что в устройствах с ферритовым элементом, высота которого равна размеру волновода, возбуждаются колебания обоих типов. Если высота ферритового элемента меньше высоты волновода (рис. 1, б),



**Рис. 1.** Геометрия резонаторов: *a* – резонатор с высотой феррита, равной размеру узкой стенки волновода; *b* – резонатор с частичным заполнением феррита (высота феррита меньше размера волновода)

**Fig. 1.** The geometry of the resonators: *a* – a resonator with a ferrite height equal to the size of the narrow waveguide wall; *b* – a resonator with partial filling of ferrite (the height of the ferrite is less than the size of the waveguide)

то при достаточно больших значениях диэлектрической проницаемости  $\xi$  ( $\xi > 10$ ) и размерах зазора  $S$  между верхним основанием цилиндра и стенкой волновода, когда под влиянием верхней стенки волновода, можно пренебречь, на верхнем основании ферритового цилиндра можно положить граничное условие  $\vec{H}_\tau = 0$  [3]. Поэтому собственные колебания ферритового резонатора с неполным заполнением (рис. 1, б) и ферритового резонатора, геометрия которого показана на рис. 1, а с дополнительным условием  $\vec{H}_\tau = 0$  при  $z = H/2$ , совпадают. Таким образом, модель ферритового резонатора (рис. 1, а) может быть использована при проектировании Н- и Е-плоскостных невзаимных устройств как с ферритовым элементом, высота которого меньше высоты волновода, так и с полным заполнением.

Гиротропный цилиндр (рис. 1, а) будем характеризовать тензором магнитной проницаемости.

$$\hat{\mu} = \mu_{11}\bar{x}_0\bar{x}_0 + \mu\bar{y}_0\bar{y}_0 + i\mu_a\bar{y}_0\bar{z}_0 - i\mu_a\bar{y}_0\bar{z}_0 + \mu\bar{z}_0\bar{z}_0, \quad (1)$$

где  $\bar{x}_0$ ,  $\bar{y}_0$ ,  $\bar{z}_0$  – единичные вектора декартовой системы координат. С учетом периодичности поля, т. е. сохранения значений для составляющих поля при изменении угла  $\varphi$  на  $2\pi$  можно принять, что поле

$$\vec{E}, \vec{H} \sim e^{in\varphi}, \quad (2)$$

где число  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Кроме того, из граничных условий  $\vec{E}_\tau = 0$  при  $z = 0, H$  следует, что

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \vec{E} = -\beta_m^2 \vec{E}, \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} \vec{H} = -\beta_m^2 \vec{H}, \quad (3)$$

где  $\beta_m = m\pi/H$ , число  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Для получения уравнения для определения собственных частот резонатора (рис. 1, а) обратимся к модели резонатора с магнитными стенками  $H_\varphi = H_z = 0$  на боковой поверхности ферритового цилиндра [3] и воспользуемся выражениями для составляющих электромагнитного поля в гиротропной среде из монографии [4]. В результате трудно записать следующее уравнение:

$$\varphi_1 I'_n(\chi_1 R)(\gamma_2 - F_2 \alpha_2) - I_n(\chi_2 R)(\varphi_1 \gamma_1 - \alpha_1) = 0, \quad (4)$$

где

$$\alpha_i = k\varepsilon \left[ (k^2 \varepsilon \mu - \beta_m^2) I'_n(\chi_i R) + \frac{\mu_a n k \varepsilon}{R} I_n(\chi_i R) \right],$$

$$\gamma_i = \beta_m \left[ \frac{n}{R} (k^2 \varepsilon \eta - \beta_m^2) I_n(\chi_i R) + \mu_a k^2 \varepsilon I'_n(\chi_i R) \right],$$

$$\chi_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{n}{R} (\mu_\perp - \mu_{11}) - \left( 1 + \frac{\mu_{11}}{\mu} \right) \beta_m^2 \right] \pm$$

$$\pm \sqrt{\frac{1}{4} \left[ k^2 \varepsilon (\mu_\perp - \mu_{11}) - \left( 1 - \frac{\mu_{11}}{\mu} \right) \beta_m^2 \right]^2 + \beta_m k^2 \varepsilon \mu_{11} \left( \frac{\mu_a}{\mu} \right)^2},$$

$$\varphi_1 = - \frac{\mu_a k \varepsilon \beta_m}{\mu \left( k^2 \varepsilon \mu_{11} - \frac{\mu_{11}}{\mu} \beta_m^2 - \chi_1^2 \right)},$$

$$F_2 = - \frac{\mu_a k \mu_{11} \beta_m}{\mu \left( k^2 \varepsilon \mu_\perp - \beta_m^2 - \chi_2^2 \right)},$$

$$\mu_\perp = \mu - \frac{\mu_a^2}{\mu},$$

$$I'_n(\chi_i R) = \frac{\partial}{\partial \rho} I_n(\chi_i \rho) \text{ при } \rho = R,$$

$I_n(x)$  – функции Бесселя первого рода,  $k = 2\pi f/c$  – волновое число.

Рассмотрим частные случаи. При  $\frac{\partial}{\partial z} \equiv 0$  ( $m = 0$ ) уравнение (4) принимает вид

$$I'_n(kR\sqrt{\varepsilon\mu_\perp}) + \frac{\mu_a n}{\mu R} I_n(kR\sqrt{\varepsilon\mu_\perp}) = 0. \quad (5)$$

При предельном переходе к изотропному случаю ( $\mu_a \rightarrow 0, \mu_{11} \rightarrow \mu$ ) из уравнения (4) следует простая формула:

$$R = \chi_{ni} \left[ \left( \frac{2\pi f}{c} \right)^2 \varepsilon \mu - \left( \frac{m\pi}{H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где  $\chi_{ni} - i$  корень уравнения  $I'_n(x) = 0$ .

Очевидно, что спектр собственных колебаний намагниченного феррита тесно связан со спек-

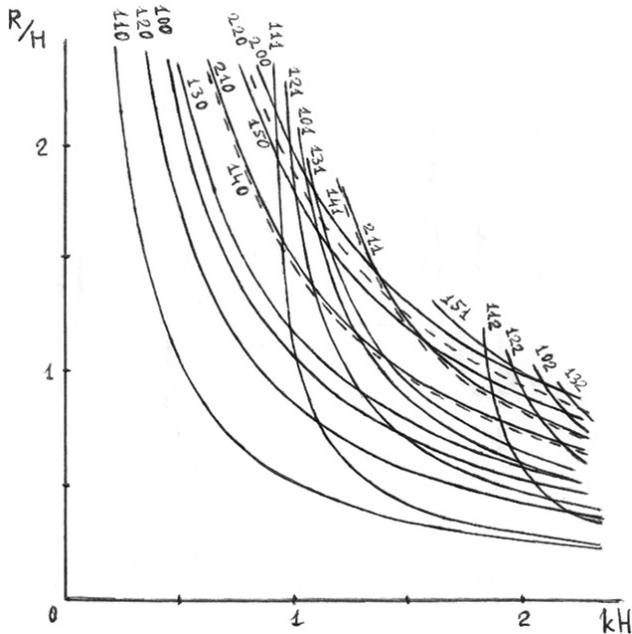


Рис. 2. Спектр собственных колебаний немагнитизированного ферритового резонатора ( $\xi = 12,5$ )  
 Fig. 2. The spectrum of natural vibrations of a non-magnetized ferrite resonator ( $\xi = 12,5$ )

тром немагнитизированного резонатора. Поэтому прежде всего рассмотрим основные закономерности спектра колебаний немагнитизированного резонатора.

Будем классифицировать собственные колебательные структуры (рис. 1, а) тремя целыми числами ( $i, n, m$ ), где  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) – характеризует вариацию поля вдоль координаты  $\rho$ ,  $n$  ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) определяет вариацию поля вдоль координаты  $\varphi$ , а параметр  $m$  ( $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) – число вариаций поля вдоль оси  $z$ .

На рис. 2 представлены результаты расчета спектра собственных колебаний немагнитизированного ферритового резонатора с  $\xi = 12,5$ . Представленные зависимости  $R/H$  от величины  $kH$  имеют универсальный характер и несут большое количество информации. Действительно, эти результаты могут быть использованы как при проектировании Н-плоскостных устройств ( $R/H < 1,5$ ), так и при конструировании Е-плоскостных устройств ( $R/H > 1,5$ ). Знание спектра собственных колебаний резонатора позволяет и более четко представить физические аспекты работы невзаимных ферритовых устройств. Тем более что в литературе принцип работы волновых циркуляторов, как правило, объясняется с помощью одного колебания. Из рис. 2 следует, что при определенных размерах  $R, H$  в рабочей полосе устройства может возникнуть сразу несколько колебаний, в том числе и нежеланных. Картина спектра собственных

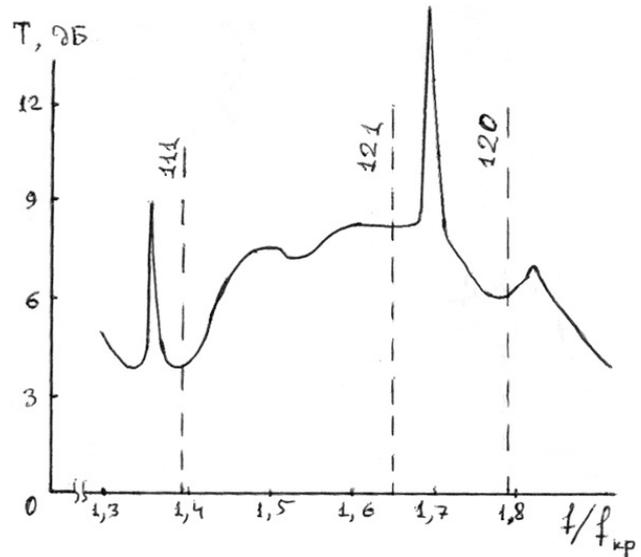
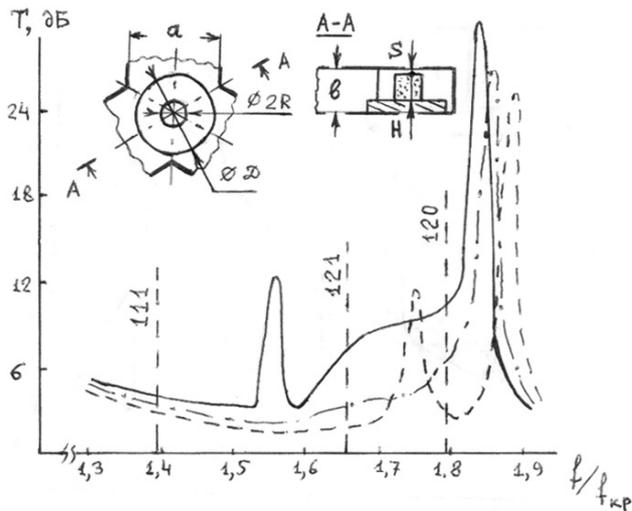


Рис. 3. Спектр коэффициента прохождения  $T$  немагнитизированного ферритового цилиндра в Y-разветвлении волноводов  $b/a = 0,5$ ;  $R = 0,31b$   
 Fig. 3. The transmission coefficient spectrum  $T$  of a non-magnetized ferrite cylinder in the Y-branch of the waveguides  $b/a = 0,5$ ;  $R = 0,31b$

колебаний резонатора принципиально меняется и изменением величины  $R/H$ . Знание спектра собственных колебаний резонатора позволяет принять специальные меры к устранению нежелательных колебаний и тем самым улучшить электродинамические параметры устройства.

## 2. Н-плоскостной циркулятор. Экспериментальные результаты

На рис. 3 показана экспериментальная зависимость коэффициента прохождения  $T$  для одного из плеч симметричного Y-разветвления в Н-плоскости с немагнитизированным ферритовым цилиндром, высота которого равна высоте узкой стенки волновода. Здесь же нанесены и собственные колебания ферритового резонатора, рассчитанные нами и попадающие в исследуемый частотный диапазон. В качестве резонатора использовался цилиндр из феррита 1СЧ4, диаметр феррита –  $0,31a$ , высота –  $H = b$ , где  $a, b$  – размеры широкой и узкой стенок прямоугольного волновода. На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости Y-циркулятора с немагнитизированным ферритом, расположенным на металлическом согласующем трансформаторе, при различных значениях зазора  $S$ . Из рис. 4 следует, что спектр собственных колебаний резонансной системы в исследуемой частотной области существенно зависит от величины зазора  $S$ . Появление даже очень малых зазоров ( $S \ll H$ ) существенно изменяет ча-

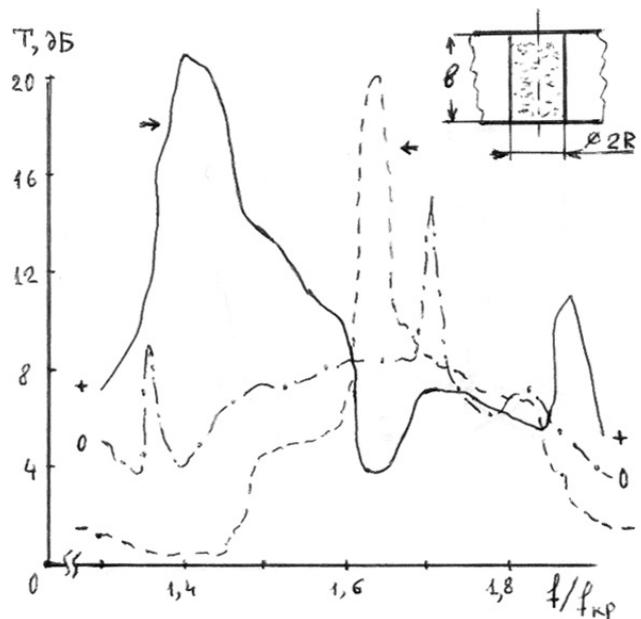


**Рис. 4.** Спектр коэффициента прохождения  $T$  Y-циркулятора с немагнитным ферритом, расположенным на металлическом согласующем трансформаторе, при различных значениях зазора  $S/b$ :  $S/b=0$  – сплошная кривая;  $S/b=0,008$  – пунктирная кривая;  $S/b=0,022$  – штрихпунктирная кривая  
**Fig. 4.** The spectrum of the transmission coefficient  $T$  of a Y-circulator with non-magnetized ferrite located on a metal matching transformer, at various clearance values  $S/b$ :  $S/b=0$  – solid curve;  $S/b=0,008$  – punctual curve;  $S/b=0,022$  – dash-dot curve

стотные свойства H-плоскостного разветвления с ферритовым разветвлением.

Резонансный характер экспериментальных зависимостей говорит о возбуждении собственных колебаний резонатора волной  $H_{10}$  в данном интервале частот. Из рис. 4 также видно, что вблизи резонаторов существуют области, в которых немагнитный ферритовый резонатор не оказывает влияния на коэффициент прохождения. На центральных частотах этих областей модуль коэффициента прохождения  $|T| \approx 2/3$  (4 дБ) [1].

При приложении внешнего магнитного поля взаимность устройства нарушается, что приводит к неравенству коэффициентов прохождения по плечам. Частотные зависимости, соответствующие этому случаю, приведены на рис. 5, из которого следует, что при определенном значении подмагничивающего поля существуют области невзаимности. На этом же рисунке показаны и собственные частоты  $f_{inm}^{\pm}$  намагниченного резонатора, определенные с помощью уравнения (4) (верхний знак «+» соответствует величине  $+\mu_a$  в соотношении (1), а знак «-» – величине  $-\mu_a$ ). При этом наблюдаются следующие основные закономерности. Во-первых, частотная зависимость коэффициента прохождения  $T$  в одном из возможных направлений практически сохраняется, уменьшается лишь абсолютное значение коэффициента (в 2–3 раза). В обратном направлении на-

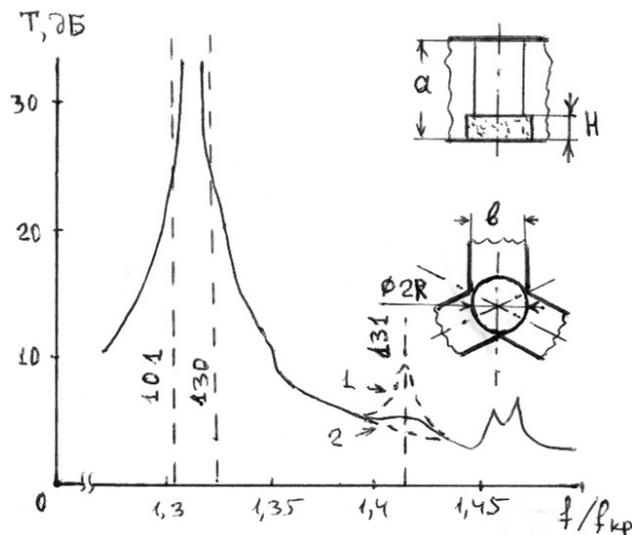


**Рис. 5.** Частотная зависимость коэффициента  $E$  для намагниченного (+, -) и размагниченного (0) феррита  
**Fig. 5.** Frequency dependence of the coefficient  $E$  for magnetized (+, -) and demagnetized (0) ferrite

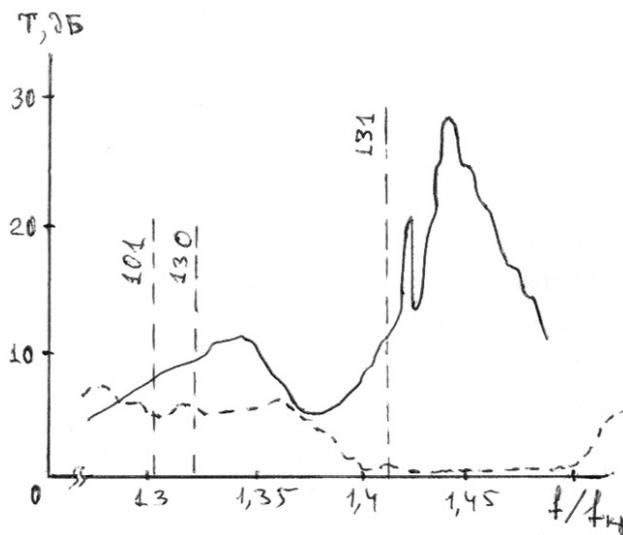
блюдается значительное смещение резонансных частот ферритового резонатора. Интересно отметить и тот факт, что максимальная величина развязок циркулятора достигается в области, где в отсутствие магнитного поля коэффициент прохождения  $T$  имеет наименьшее значение. Аналогичные закономерности наблюдались в работе [1]. Во-вторых, рабочая полоса устройства определяется разностью  $(f_{inm}^+ - f_{inm}^-)$ , и она, по-видимому, не может превышать величины  $(f_1 - f_2)$ , где  $f_1, f_2$  – соседние частоты немагнитного ферритового резонатора.

### 3. E-плоскостной циркулятор. Экспериментальные результаты

На рис. 6, 7 представлены экспериментальные результаты исследований E-плоскостного циркулятора: на рис. 6 – зависимость коэффициента прохождения  $T$  для одного из плеч разветвления с немагнитным ферритовым элементом; на рис. 7 – частотные зависимости коэффициента прохождения для намагниченного ферритового резонатора. На этих рисунках нанесены и собственные частоты немагнитного резонатора, попадающие в данный интервал частот. В качестве резонатора использовался феррит 1СЧ4 ( $4\pi\mu_0 = 4700$  Гс,  $\xi = 12,5$ ). Диаметр феррита составлял  $0,57a$ , высота  $0,28a$ . Основное отличие характеристик E-плоскостного устройства от соответствующих зависимостей H-плоскостных



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента прохождения  $E$  для одного из плеч  $E$ -плоскостного циркулятора с немагнитным ферритовым элементом (пунктирные кривые 1, 2 соответствуют двум направлениям остаточной намагнитченности)  
**Fig. 6.** The dependence of the transmission coefficient  $E$  for one of the arms of the  $E$ -plane circulator with a non-magnetized ferrite element (dashed curves 1, 2 correspond to two directions of the residual magnetization)



**Рис. 7.** Частотные зависимости коэффициента прохождения  $T$  для намагнитченного ферритового резонатора. При прохождении электромагнитных волн в двух противоположных направлениях  
**Fig. 7.** Frequency dependences of the transmission coefficient  $T$  for a magnetized ferrite resonator. When passing electromagnetic waves in two opposite directions

приборов определяется типами возбуждаемых колебаний в ферритовых резонаторах. Полученные нами экспериментальные и теоретические результаты хорошо согласуются и с экспериментальными результатами работы [5].

### Заклучение

Резонаторная модель невзаимных приборов СВЧ позволила с единых позиций подойти к проектированию  $E$ - и  $H$ -плоскостных устройств. Выявленные основные закономерности спектра собственных колебаний ферритовых резонаторов позволяют определить и оптимальную процедуру

настройки невзаимного ферритового прибора. Она должна состоять из следующих основных моментов.

1. Излучение частотных свойств устройства с немагнитченным ферритом. Определение областей циркуляции, оценка максимальной возможной рабочей полосы частот, выбор геометрии резонатора.

2. Изучение частотных свойств устройства с намагнитченным ферритом. Выбор оптимальной величины магнитного поля.

На основе результатов, полученных выше, можно проектировать вентили, циркуляторы и фильтры на подмагнитченных ферритовых резонаторах.

### Список литературы

1. Бируля В.Е. Волноводный  $Y$ -циркулятор с высотой ферритового элемента, меньшей частоты волновода // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. № 12. С. 10–15.
2. Piotrowski W., Schell S. Low loss 92-100 GHz circulators // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 15–17 June 1982. Dallas, USA. P. 252–254. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1982.1130680>.
3. Hellszajn J., Tan F.C.F. Mode charts for partial-height ferrite waveguide circulators // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. Vol. 122. № 1. P. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1975.0005>.
4. Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1960. 407 с.
5. Solbach K. E-plane circulators aid mm-wave design // Microwaves & RF. 1983. Vol. 22. № 13. P. 73–78.

### References

1. Birulja V.E. Y-waveguide circulator with height ferritovovgo element at frequency waveguide. *Elektronnaja tehnika. Ser. Elektronika SVCh*, 1985, no. 12, pp. 10–15. (In Russ.)
2. Piotrowski W., Schell S. Low loss 92-100 GHz circulators. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 15–17 June 1982, Dallas, USA, pp. 252–254. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1982.1130680>.
3. Hellszajn J., Tan F.C.F. Mode charts for partial-height ferrite waveguide circulators. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1975, vol. 122, no. 1, pp. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1975.0005>.

4. Gurevich A.G. *Ferrites at Microwave Frequencies*. Moscow: Fizmatgiz, 1960, 407 p. (In Russ.)
5. Solbach K. E-plane circulators aid mm-wave design. *Microwaves & RF*, 1983, vol. 22, no. 13, pp. 73–78.

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2020, vol. 23, no. 1, pp. 39–44

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.1.39-44

Received 8 January 2020  
Accepted 29 January 2020

### Calculation and experimental measurement of the spectra of natural vibrations of ferrite resonators of nonreciprocal waveguide devices microwave and EHF

A.A. Soldatov, L.N. Trifonova, A.A. Kuzmenko

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics  
23, L. Tolstoy Street,  
Samara, 443010, Russia

*Abstract* – In the proposed work, in the approximation of magnetic walls, an equation is obtained for determining the natural frequencies of the resonator, which can be used in the design of both E- and H-planar devices. The main laws of the spectra of natural vibrations of ferrite resonators and their influence on the electrodynamic parameters of nonreciprocal devices are revealed. Experimental results for E- and H-plane circulators are presented and discussed. The optimal procedure for configuring nonreciprocal ferrite devices is described.

*Keywords* – ferromagnetic resonance, ferrite resonator, nonreciprocal waveguide devices (gates and circulators), natural vibration spectra.

#### Информация об авторах

**Солдатов Александр Анатольевич**, 1952 г. р. кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ, г. Самара). В 1974 г. окончил Куйбышевский государственный университет по специальности физика. В 1974–1975 гг. служил в армии. В 1976–1980 гг. работал в КНИИР инженером. В 1980–1985 гг. – младший научный сотрудник в г. Новокуйбышевске во ВНИИ-ОС. В декабре 1985 г. поступил в Институт радио и связи младшим научным сотрудником. В 1996 г. защитил кандидатскую диссертацию и работал сначала старшим преподавателем, а затем доцентом в Поволжской государственной академии телекоммуникаций и информатики (ныне – ПГУТИ).

*Область научных интересов:* ферритовые устройства СВЧ, антенны СВЧ, неоднородности в полых волноводах.

*E-mail:* solger259145@yandex.ru

**Трифонова Людмила Николаевна**, 1995 г. р., аспирант, инженер кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ, г. Самара). В 2019 г. окончила магистратуру ПГУТИ с отличием по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

*Область научных интересов:* нанотехнологии, методы и средства цифровой обработки сигналов и их применение в системах радиосвязи и радиовещания.

*E-mail:* lyudmila.trifonova.2012@mail.ru

**Кузьменко Александр Александрович**, 1994 г. р., техник кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ, г. Самара) с 2017 г. В 2016 г. окончил бакалавриат ПГУТИ по направлению «Инфокоммуникационные технологии и информатика и системы связи», а в 2018 г. – магистратуру ПГУТИ по направлению «Фотоника и оптоинформатика».

*Область научных интересов:* радиотехника, колориметрия.

*E-mail:* alexandr291294@mail.ru

#### Information about the Authors

**Alexander A. Soldatov** was born in 1952, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. In 1974, he graduated from the Kuibyshev State University with a degree in physics. In 1974–1975, he served in the army. In 1976–1980, he worked in KNIIR as an engineer. In 1980–1985, he worked as a junior research assistant in Novokuybyshevsk at VNIIO-S. In December 1985, he entered the Institute of Radio and Communications as a junior research assistant. In 1996, he defended his thesis and first worked as a senior lecturer, and then as an assistant professor at the Povolzhskiy State Academy of Telecommunications and Informatics (now – PSUTI).

*Research interests:* microwave ferrite devices, microwave antennas, inhomogeneities in hollow waveguides.

*E-mail:* solger259145@yandex.ru

**Lyudmila N. Trifonova** was born in 1995, postgraduate student, engineer of the Department of Radio Electronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara, Russia. She graduated with honors from PSUTI in infocommunication technologies and communication systems in 2019.

*Research interests:* nanotechnology, methods and means of digital signal processing and their application in radio communication and broadcasting systems.

*E-mail:* lyudmila.trifonova.2012@mail.ru

**Aleksandr A. Kuzmenko** was born in 1994. Since 2017, he has been a Technician of the Department of Radio Electronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara, Russia. He received the bachelor's degree in information and communication technologies and informatics and communication systems from PSUTI in 2016 and the master's degree in photonics and optoinformatics from PSUTI in 2018.

*Research interests:* radio engineering and colorimetry.

*E-mail:* alexandr291294@mail.ru