

УДК 621.373.8

А.В. Назаров<sup>1</sup>, Е.А. Попов<sup>2</sup>, М.С. Рожкова<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАПОЛНЕНИЯ НА ДИСПЕРСИОННЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ОСНОВНОЙ ВОЛНЫ КРУГЛОГО ОТКРЫТОГО СЛОИСТОГО ФЕРРИТ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Приводятся результаты исследования влияния величины внутреннего радиуса ферритовой трубки на спектральные и поляризационные свойства основной волны круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода при отсутствии и наличии магнитных потерь в феррите.

*Ключевые слова:* феррит-диэлектрический волновод, дисперсионная характеристика, поверхностная волна, поляризация электромагнитного поля.

Круглый открытый слоистый феррит-диэлектрический волновод представляет собой ферритовую трубку с внутренним и внешним радиусами  $a$  и  $b$  соответственно (рис. 1). Ферритовый слой намагничен до насыщения постоянным магнитным полем  $\vec{H}_0$ , направленным вдоль оси  $z$ , в положительном направлении которой распространяется электромагнитная волна частоты  $\omega$ . Постановка краевой задачи для рассматриваемой направляющей структуры приведена в [1]. При решении задачи используются метод частичных областей и метод укорочения дифференциального уравнения [2].

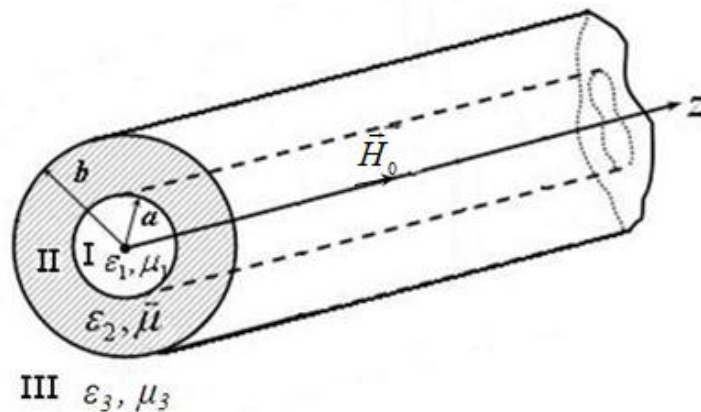


Рис. 1. Круглый открытый слоистый феррит-диэлектрический волновод

Поле электромагнитной волны в круглом открытом слоистом феррит-диэлектрическом волноводе является всегда (и при отсутствии у него угловой зависимости) гибридным, поэтому соответствующая краевая задача является [3, 4] несамосопряженной как при отсутствии, так и при наличии потерь в образующих структуру средах. Поскольку [5] собственные значения несамосопряженной краевой задачи в общем случае комплексные, то наиболее общими решениями дисперсионного уравнения волн круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода будут комплексные волновые числа  $\beta = \beta' + i\beta''$ .

Подход к классификации волн рассматриваемой направляющей структуры изложен в [6], где также приведены результаты исследования дисперсионных свойств некоторых азимутально-симметричных и азимутально-несимметричных волн в отсутствие диссипации

энергии. В статье рассматривается влияние величины внутреннего радиуса  $a$  ферритовой трубки на дисперсионные и поляризационные свойства основной волны  $HE_{11}$  круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода как при отсутствии, так и наличии магнитных потерь в феррите.

На рис. 2 представлены дисперсионные характеристики волн  $HE_{11}^{(+)}$  (рис. 2, а) и  $HE_{11}^{(-)}$  (рис. 2, б) круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода без потерь при различных значениях внутреннего радиуса  $a$  ферритовой трубки ( $b = 0,02$  м;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon_0$ ;  $\varepsilon_2 = 14,8\varepsilon_0$ ; частота ферромагнитного резонанса  $f_0 = \omega_0 / 2\pi = 1,76$  ГГц; намагниченность насыщения феррита  $M_s = 103,5$  кА/м).

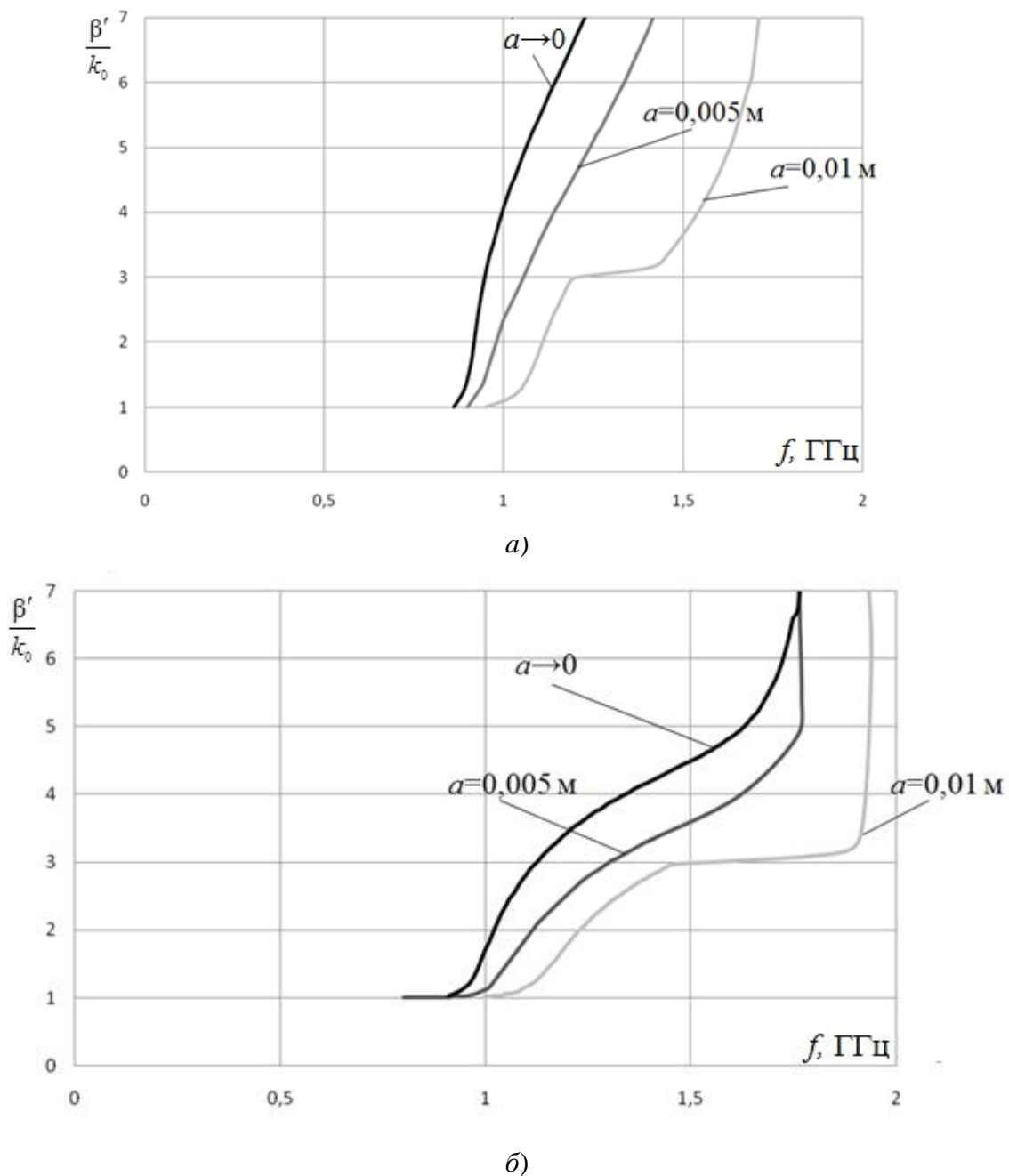


Рис. 2. Дисперсионные характеристики волн  $HE_{11}^{(+)}$  (а) и  $HE_{11}^{(-)}$  (б) круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода без потерь

Из рис. 2 видно, что при увеличении внутреннего радиуса  $a$  ферритовой трубки дисперсионная характеристика основной волны исследуемой структуры смещается в более высокочастотную область. При данных значениях  $a$  волна  $HE_{11}^{(+)}$  обладает нормальной дисперсией, и при стремлении частоты электромагнитного поля к частоте ферромагнитного резонанса слева её дисперсионная характеристика терпит разрыв. Дисперсионные характеристики волны  $HE_{11}^{(-)}$  при  $a = 0,005$  м и  $a = 0,01$  м имеют участки с аномальной дисперсией в резонансной области частот.

Поскольку постоянные распространения азимутально-несимметричных волн с левым  $HE_{nm}^{(+)}$  и правым  $HE_{nm}^{(-)}$  вращением плоскости поляризации в круглом открытом слоистом феррит-диэлектрическом волноводе различны, то плоскость поляризации изначально линейно поляризованной волны  $HE_{nm}$ , образуемой суперпозицией двух циркулярно поляризованных волн с левым и правым вращением, будет поворачиваться относительно первоначального положения на угол, определяемый по формуле

$$\theta = \frac{\beta^- - \beta^+}{2} L, \quad (1)$$

где  $\beta^+$  и  $\beta^-$  – продольные волновые числа волн  $HE_{nm}^{(+)}$  и  $HE_{nm}^{(-)}$  соответственно;  $L$  – длина волновода.

На рис. 3 представлены графики зависимости погонного угла поворота плоскости поляризации  $\phi = \theta/L$  от частоты для волны  $HE_{11}$  волновода без потерь.

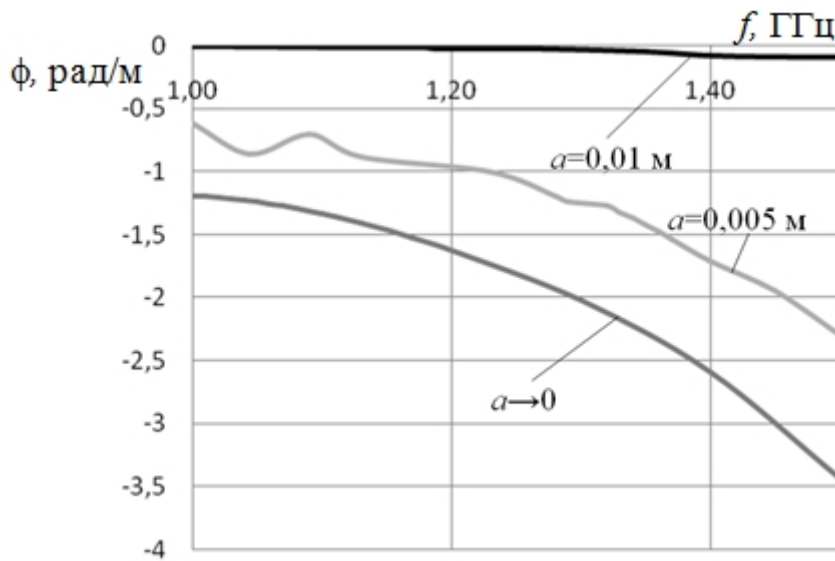


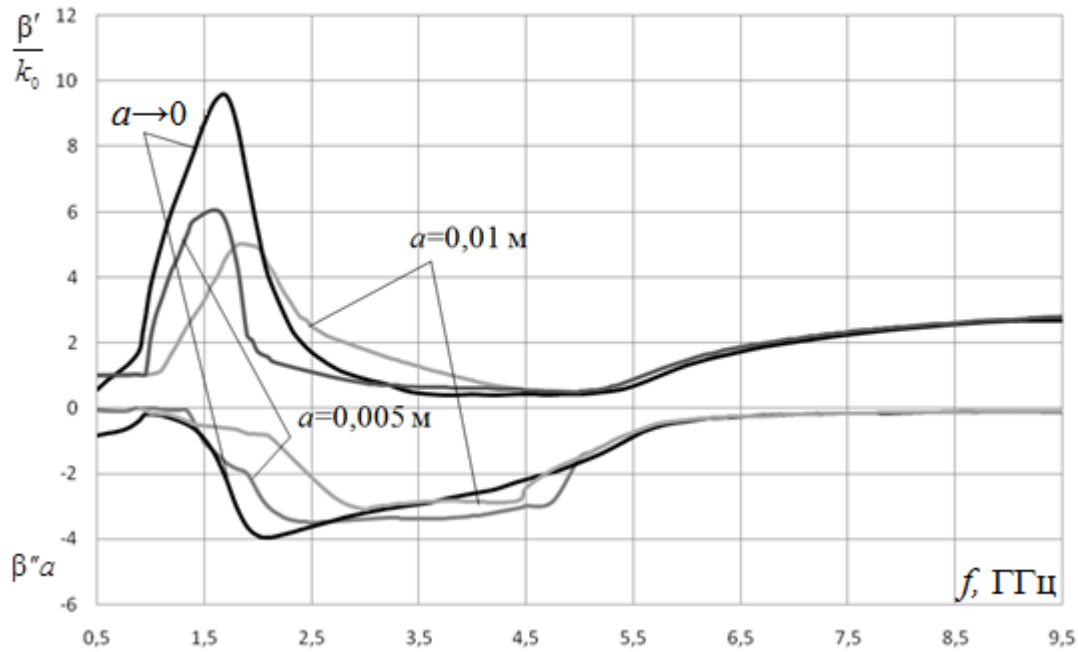
Рис. 3. Зависимость угла  $\phi$  от частоты для волны  $HE_{11}$  волновода без потерь

Как видно из рис. 3, при увеличении внутреннего радиуса  $a$  трубки угол поворота плоскости поляризации уменьшается. При  $a = 0,01$  м угол поворота  $\phi \ll 1$  рад.

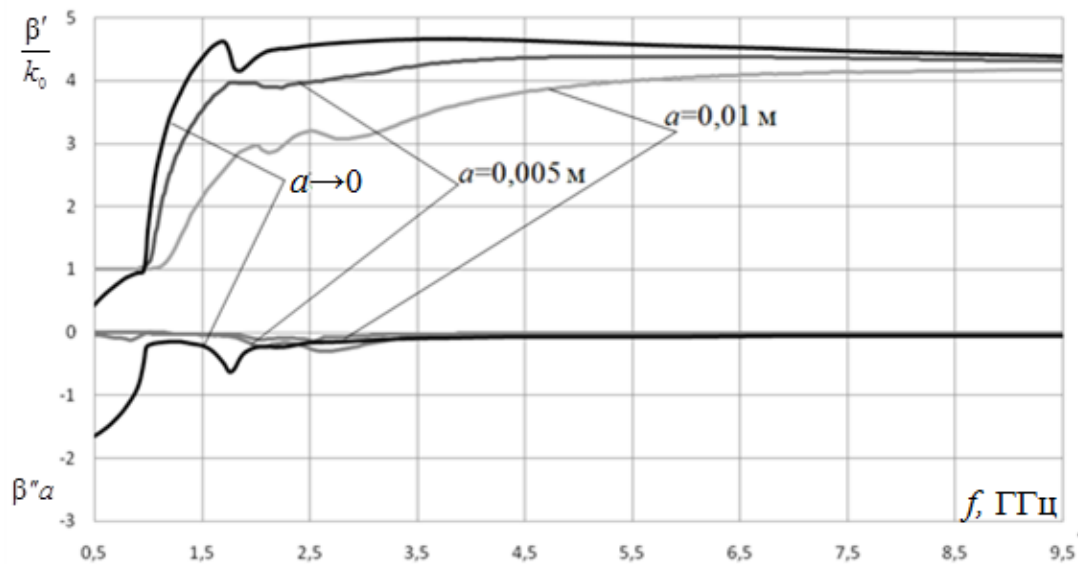
На рис. 4 представлены дисперсионные характеристики волн  $HE_{11}^{(+)}$  (рис. 4, а) и  $HE_{11}^{(-)}$  (рис. 4, б) круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода с потерями (ширина кривой ферромагнитного резонанса по половинному уровню  $\Delta H = 8$  кА/м).

Из рис. 4, а видно, что при всех рассмотренных значениях  $a$  дисперсионные характеристики волны  $HE_{11}^{(+)}$  имеют максимум вблизи частоты ферромагнитного резонанса. При

$a = 0,01$  м и  $a = 0,005$  м дисперсионные характеристики волны  $HE_{11}^{(+)}$  рассматриваемой структуры ведут себя качественно одинаково. При  $a \rightarrow 0$  дисперсионная характеристика волны  $HE_{11}^{(+)}$  в области низких частот имеет продолжение в виде быстрой собственной волны.



а)



б)

Рис. 4. Дисперсионные характеристики волн  $HE_{11}^{(+)}$  (а) и  $HE_{11}^{(-)}$  (б) круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода с потерями

Из рис. 4, б видно, что, как и в случае волн с левым вращением поля, при  $a \rightarrow 0$  дисперсионная характеристика волны с правым вращением  $HE_{11}^{(-)}$  в области низких частот имеет продолжение в виде быстрой собственной волны. При  $a = 0,005$  м и  $a = 0,01$  м волна

$HE_{11}^{(-)}$  является медленной во всём частотном диапазоне. Из рис. 4 следует, что во всём рассмотренном диапазоне частот при уменьшении внутреннего радиуса  $a$  ферритовой трубки коэффициент затухания волн  $HE_{11}^{(+)}$  и  $HE_{11}^{(-)}$  возрастает.

Поскольку азимутально-несимметричные волны с левой и правой круговой поляризацией имеют различные постоянные распространения и коэффициенты затухания (рис. 4), то при распространении в рассматриваемой структуре изначально линейно поляризованной волны будет происходить изменение её поляризации – волна станет эллиптически поляризованной. При этом большая полуось эллипса будет поворачиваться относительно первоначального направления колебаний на угол  $\theta$ , определяемый по формуле (1). Эксцентриситет эллипса определяется по формуле

$$e = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}}, \quad (2)$$

где  $D = A[\exp(\beta''^- L) + \exp(\beta''^+ L)]$  и  $d = A|\exp(\beta''^- L) - \exp(\beta''^+ L)|$  – большая и малая полуоси эллипса поляризации;  $A$  – амплитуда циркулярно-поляризованной волны на входе волновода;  $\beta''^+$  и  $\beta''^-$  – мнимые части продольных волновых чисел волн  $HE_{11}^{(+)}$  и  $HE_{11}^{(-)}$  соответственно.

На рис. 5 представлены графики зависимости погонного угла поворота большой полуоси эллипса поляризации от частоты для волны  $HE_{11}$  волновода с потерями.

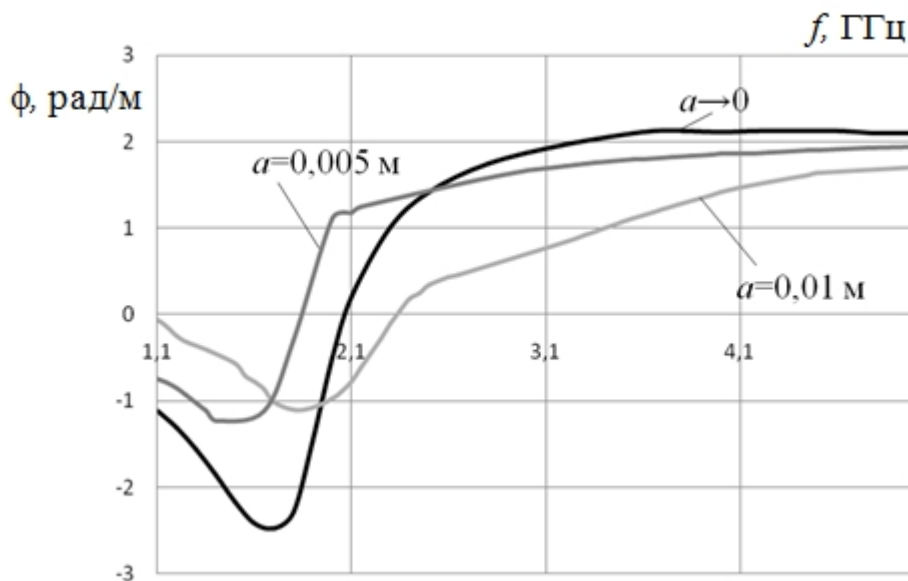
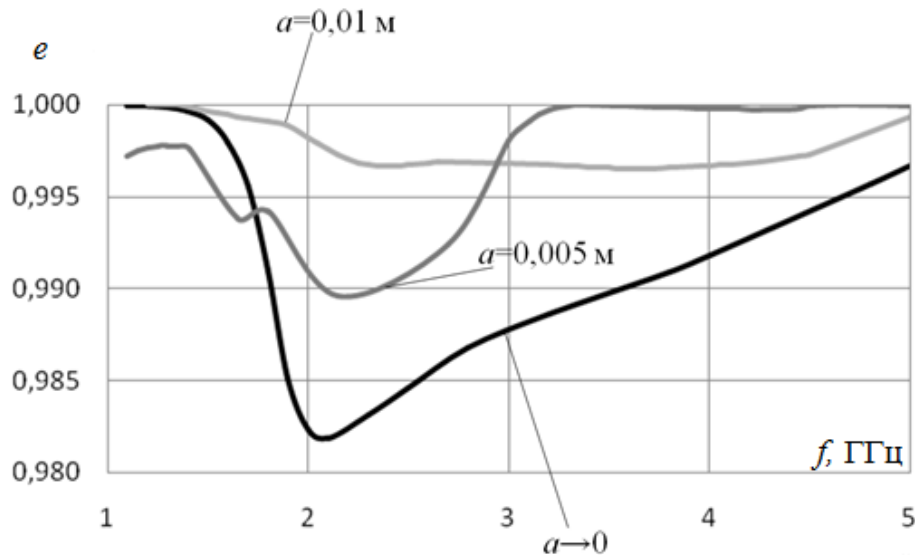


Рис. 5. Зависимость угла  $\phi$  от частоты для волны  $HE_{11}$  волновода с потерями

Из рис. 5 следует, что в ферритовой трубке с потерями поворот большой полуоси эллипса поляризации может происходить в различных направлениях в зависимости от частотного диапазона использования структуры. В дальних дорезонансной и зарезонансной областях при увеличении радиуса  $a$  угол поворота  $\phi$  уменьшается.

На рис. 6 представлены графики зависимости эксцентриситета эллипса  $e$  от частоты для волны  $HE_{11}$  волновода с потерями длиной  $L = 0,05$  м.

Из рис. 6 видно, что при увеличении радиуса  $a$  значение эксцентриситета  $e$  стремится к единице. При  $a = 0,01$  м в рассмотренном диапазоне частот эксцентриситет изменяется незначительно.



**Рис. 6. Зависимость эксцентриситета эллипса поляризации от частоты для волны  $HE_{11}$  волновода с потерями**

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при отсутствии потерь в ферритовом слое увеличение внутреннего радиуса ферритовой трубки приводит к значительному уменьшению величины погонного угла поворота плоскости поляризации линейно-поляризованной волны, распространяющейся в волноводе. При наличии потерь в дальней зарезонансной области частот дисперсионные и поляризационные свойства основной волны практически не зависят от величины внутреннего радиуса ферритовой трубки. В случае волновода малой длины ( $L = 2,5b$ ) при всех рассмотренных значениях  $a$  эксцентриситет эллипса поляризации волны близок к единице, даже на частотах, близких к частоте ферромагнитного резонанса, поэтому при поступлении на вход такого волновода линейно-поляризованной волны  $HE_{11}$  на выходе поляризация последней практически не изменится и будет квазилинейной, а величина угла поворота плоскости поляризации не превысит  $7^\circ$ .

#### Библиографический список

1. Катин, С.В. Электромагнитные волны в круглом открытом слоистом феррит-диэлектрическом волноводе / С.В. Катин [и др.] // Антенны. 2012. Вып. 8 (183). С. 20–24.
2. Сул, Г. Вопросы волноводного распространения электромагнитных волн в гиротропных средах / Г. Сул, Л. Уолкер. – М.: Иностран. лит-ра, 1955.
3. Веселов, Г.И. Комплексные волны в поперечно-неоднородных направляющих структурах / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника. 1987. Т. 42. № 8. С. 64–67.
4. Веселов, Г.И. Слоистые металло-диэлектрические волноводы. / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988.
5. Раевский, А.С. Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010.
6. Назаров, А.В. Дисперсионные и поляризационные свойства азимутально-несимметричных волн круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода / А.В. Назаров, Е.А. Попов, М.С. Рожкова // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 3. С. 22–26.

Дата поступления  
в редакцию 25.06.2015

A.V. Nazarov<sup>1</sup>, E.A. Popov<sup>2</sup>, M.S. Rozhkova<sup>1</sup>

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE FILLING PARAMETERS TO THE  
DISPERSION AND POLARIZATION CHARACTERISTICS OF FUNDAMENTAL  
MODE OF AN OPEN CIRCULAR LAYERED FERRITE-DIELECTRIC WAVEGUIDE**

Scientific research Institute of measuring systems n.a. J. E. Sedakov<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>2</sup>

**Purpose:** To investigate the influence of the ferrite tube internal radius influence to the spectral and polarization characteristics of the fundamental mode propagating in an open circular layered ferrite-dielectric waveguide with and without losses.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is based on the standard methodology using method of the partial areas and differential equation contraction method.

**Findings:** There is significant reducing of the rotation angle of the polarization plane if the internal radius of the ferrite tube without losses is increased. If the waveguide structure with losses is not so long. When the  $HE_{11}$  mode with the plane polarization propagates in the structure with losses, the polarization plane is still quasi-linear in the wide frequency band regardless of the internal ferrite tube radius if the length of the structure is not so long.

**Research limitations/implications:** The results will be used in subsequent works.

**Originality/value:** Moreover the data can be useful for development of the microwave ferrite devices.

*Key words:* ferrite-dielectric waveguide, dispersion characteristic, surface mode, polarization of the electro-magnetic field.