



УДК 621.372.82

А. В. Донченко, Г. Ф. Заргано, В. В. Земляков
Южный федеральный университет, Физический факультет
ул. Р. Зорге, 5, Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Гибридные типы волн в Н-волноводе с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением*

Аннотация. Представлен алгоритм расчета электродинамических характеристик гибридных типов волн, распространяющихся в Н-волноводе с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением. Рассматривается структура Н-волновода с диэлектрическими пластинами, установленными в пространстве между гребнями, и с диэлектрическим образцом, зажатым между диэлектрических подложек с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице. Электродинамические характеристики рассматриваемых структур были рассчитаны методом частичных областей с учетом особенностей поведения электромагнитного поля на ребрах волновода диэлектрическом и металлическом. Представлена методика расчета потерь электромагнитной энергии в Н-волноводе с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением. Приведена классификация гибридных типов волн, соответствующая типу граничных условий. Проведен анализ характеристик гибридных волн, распространяющихся в Н-волноводе WRD350 с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением. Визуально представлены пространственные структуры электромагнитных полей и их плоскостные проекции (вид спереди, вид сверху, вид сбоку) первых двух HE-волн и первой EH-волны. Рассчитаны критические частоты первых восьми HE- и EH-волн. Приведены значения постоянных распространения первых двух HE-волн и первой EH-волны на рабочей частоте с учетом потерь. Проведено сравнение результатов, получаемых описанной методикой, с результатами расчетов численными методами.

Ключевые слова: волноводы сложных сечений, диэлектрики на СВЧ, метод частичных областей, Н-волновод, гибридные волны

Для цитирования: Донченко А. В., Заргано Г. Ф., Земляков В. В. Гибридные типы волн в Н-волноводе с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 60–69.

A. V. Donchenko, G. F. Zargano, V. V. Zemlyakov
Southern Federal University, Faculty of Physics
5, R. Zorge Str., 344090, Rostov-on-Don, Russia

Hybrid Types of Waves Propagating in Double Ridged Waveguide with Piecewise-Layer Dielectric Filling

Abstract. The algorithm for calculating electrodynamic characteristics of hybrid types of waves propagating in double ridged waveguide with piecewise-layered dielectric filling is presented. The double ridged waveguide structure with dielectric plates installed between the ridges, and with dielectric sample sandwiched between the dielectric substrates is considered. The calculations are carried out using the method of partial regions. The presented algorithm takes into account the electromagnetic field components singularities near the dielectric and metal edges of the waveguide. The technique for calculating the electromagnetic energy losses in the double ridged waveguide with a piecewise layered dielectric filling is provided. The classification of hybrid waves is given. The spatial structures of electromagnetic fields and their planar projections (front view, top view, side view) for the first two HE-waves and the first EH-wave are demonstrated. Cutoff frequencies and propagation constants of HE- and EH-waves are calculated. The results obtained using the described method and numerical approach are compared. Then the results are analyzed.

Key words: waveguides with complex cross sections, microwave dielectric, method of partial regions, double ridged waveguide, hybrid waves

For citation: Donchenko A. V., Zargano G. F., Zemlyakov V. V. Hybrid Types of Waves Propagating in Double Ridged Waveguide with Piecewise-Layer Dielectric Filling. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 2, pp. 60–69. (In Russian)

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-118.2017.9.

Введение. Одним из самых распространенных и широко применяющихся элементов техники СВЧ является волновод с Н-образной формой поперечного сечения [1]–[4]. Он обладает рядом преимуществ по сравнению со стандартным прямоугольным волноводом. Н-волновод является более широкополосным, он перекрывает диапазон частот, для покрытия которого потребовалось бы использовать 3–5 комплектов прямоугольных волноводов различных сечений [5]. Электродинамические характеристики таких гребневых волноводов можно существенно улучшить, поместив внутрь волноведущей структуры пластины из диэлектрика (рис. 1, а) или диэлектрический образец, зажатый между двух диэлектрических подложек с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице (рис. 1, б) [6]. Размещение диэлектрика в волноведущем тракте приводит к появлению продольных компонент электромагнитного поля и, как следствие, к распространению гибридных типов НЕ- и ЕН-волн. Кроме того, диэлектрик существенно влияет на значения критических частот и постоянных распространения, что делает Н-волновод с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением перспективным элементом фильтров, фазовращателей и других устройств СВЧ-диапазона. Однако, несмотря на очевидные преимущества, гребневые волноводы с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением мало изучены ввиду сложности структур и, как следствие, сложности расчетов их электродинамических характеристик.

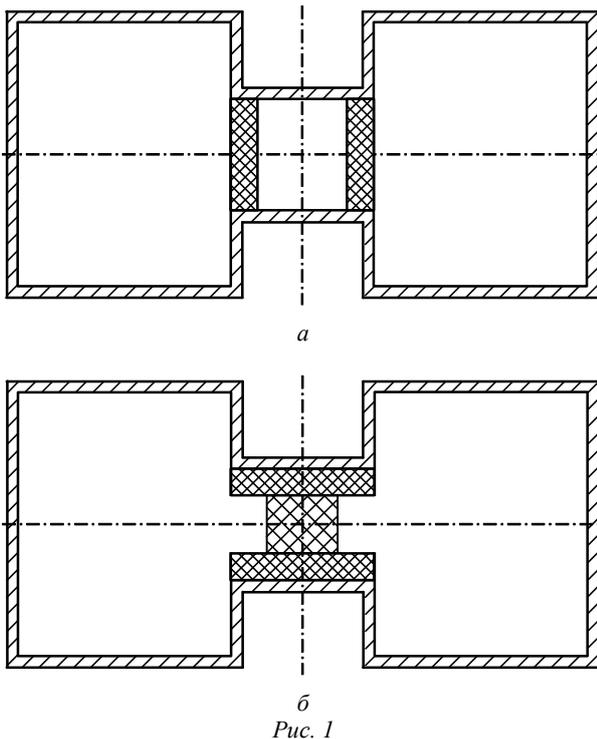


Рис. 1

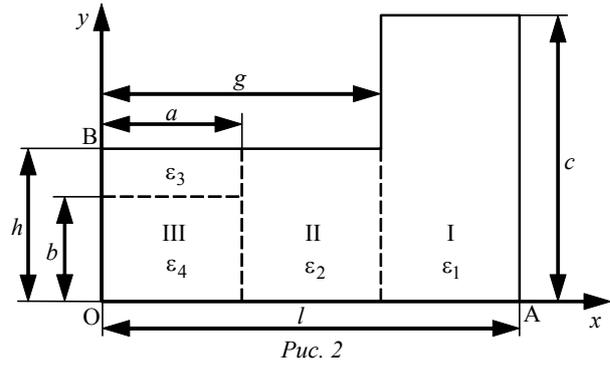


Рис. 2

намических характеристик.

Принимая во внимание симметрию структур на рис. 1, при расчете их параметров рассматривалась только Г-образная область. Поперечное сечение рассматриваемой Г-образной области изображено на рис. 2, приведены обозначения геометрических размеров исследуемой области, диэлектрическая проницаемость частичных областей – ϵ_i ($i = 1-4$). Для расчетов характеристик гибридных волн, распространяющихся в волноводах сложных сечений, применяются различные методы [7]–[9]. В описываемом исследовании расчет проводился методом частичных областей (МЧО) с учетом особенностей поведения электромагнитного поля вблизи острых ребер волновода: металлического ($x = g; y = h$) и диэлектрического ($x = a; y = b$) [10]. Одним из главных преимуществ МЧО является возможность получить выражения, описывающие электромагнитные поля гибридных волн, в аналитическом виде, что является необходимым условием для визуализации структур этих полей.

Следует отметить, что конкретные типы волн, распространяющиеся в Н-волноводе, соответствуют типу граничных условий на границах Г-образной области ОА и ОВ. Для описания типа условий были введены индексы граничных условий: g_1 для границы ОВ и g_2 для границы ОА. Значения индексов определяются следующим образом: если на отрезке контура Г-образной области, которому соответствует индекс, задано граничное условие типа электрической стенки, то индекс равен нулю, если магнитной, то индекс равен единице. Приняв во внимание индексы граничных условий, гибридные типы волн можно обозначить $HE_{g_1 g_2}^p$ и $EH_{g_1 g_2}^p$, где p – порядковый номер волны, проведя, таким образом, их классификацию в табл. 1.

Таблица 1

Тип условий	g_1	g_2	Гибридные волны
1	1	0	HE_{10}^p, EH_{10}^p
2	0	0	HE_{00}^p, EH_{00}^p
3	0	1	HE_{01}^p, EH_{01}^p
4	1	1	HE_{11}^p, EH_{11}^p

Расчет электродинамических характеристик гибридных волн. Согласно МЧО Г-образная область была разделена на 3 частичные прямоугольные области (I, II и III), как показано на рис. 2. Для каждой частичной области решалось двумерное уравнение Гельмгольца [10] относительно электрического – $\mathbf{\Pi}_e$ и магнитного – $\mathbf{\Pi}_m$ векторов Герца:

$$\Delta \mathbf{\Pi}_q + k^2 \varepsilon \mathbf{\Pi}_q = 0, \quad (1)$$

где $q = m, e$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства; λ – длина волны; ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

Учитывая конфигурацию диэлектрических слоев в частичных областях, при расчетах ограничивались рассмотрением только y -компонент векторов Герца $\mathbf{\Pi}_q(0, \Pi_{qy}, 0)$. В этом случае решения (1) имеют следующий вид:

$$\Pi_{qy}^\xi = K_q \sum_{n=0}^{\infty} A_{qn}^\xi X_{qn}^\xi(x) Y_{qn}^\xi(y) e^{\gamma z}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{qy}^\Pi = K_q \sum_{n=0}^{\infty} [& B_{qn}^\Pi X_{qn1}^\Pi(x) + \\ & + C_{qn}^\Pi X_{qn2}^\Pi(x)] Y_{qn}^\Pi(y) e^{\gamma z}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\xi = I, III$; $K_q = \begin{cases} 1/Z_0, & q = m, \\ 1, & q = e; \end{cases}$ $A_{qn}^\xi, B_{qn}^\Pi, C_{qn}^\Pi$ – неизвестные амплитудные коэффициенты; $X_{qn}^\xi, X_{qn1}^\Pi, X_{qn2}^\Pi, Y_{qn}^\xi$ – собственные функции частичных областей, удовлетворяющие граничным условиям; γ – постоянная распространения электромагнитной волны вдоль оси; $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ – волновое сопротивление вакуума; ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная постоянные.

Постоянная распространения $\gamma = \alpha + j\beta$, где α – коэффициент затухания, отвечающий за затухание электромагнитной волны вдоль оси рас-

пространения z ; β – фазовая постоянная. При расчетах характеристик гибридных типов волн, распространяющихся в диэлектрической среде с малыми потерями, коэффициентом α можно пренебречь, поэтому в выражениях (2), (3) потери электромагнитной энергии при распространении волны вдоль оси z не учитывались ($\gamma = j\beta, \alpha = 0$).

Связь напряженностей электрического \mathbf{E} и магнитного полей \mathbf{H} с векторами Герца описывается следующими выражениями [10]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= k^2 \varepsilon \mathbf{\Pi}_e + \text{grad div } \mathbf{\Pi}_e + jkZ_0 \text{rot } \mathbf{\Pi}_m; \\ \mathbf{H} &= k^2 \varepsilon \mathbf{\Pi}_m + \text{grad div } \mathbf{\Pi}_m - jk\varepsilon/Z_0 \text{rot } \mathbf{\Pi}_e. \end{aligned} \quad (4)$$

Неизвестные коэффициенты $A_{qn}^\xi, B_{qn}^\Pi, C_{qn}^\Pi$ определяем через значения неизвестных функций $F_J(y)$, $J = \overline{1, 4}$, которые пропорциональны тангенциальным составляющим напряженностей электрического ($E_y|_{x=a}, E_y|_{x=g}, E_z|_{x=g}$) и магнитного ($H_y|_{x=a}$) полей на границах раздела частичных областей. В соответствии с МЧО, удовлетворяя условиям непрерывности электромагнитного поля

$$\begin{aligned} H_z^I|_{x=g} &= H_z^\Pi|_{x=g}; & H_z^\Pi|_{x=a} &= H_z^{III}|_{x=a}; \\ H_y^I|_{x=g} &= H_y^\Pi|_{x=g}; & E_z^\Pi|_{x=a} &= E_z^{III}|_{x=a} \end{aligned}$$

на границах раздела частичных областей, была получена система интегральных уравнений относительно неизвестных функций $F_J(y)$.

Конкретный вид неизвестных функций $F_J(y)$ должен удовлетворять особенностям поведения электромагнитного поля вблизи острых ребер волновода: металлического и диэлектрического. Компоненты электрического поля вблизи металлического ребра ($x = g; y = h$), окруженного слоистым диэлектриком [11], имеют особенность вида:

$$E_z \sim \rho^{\tau+1/2}; E_y \sim \rho^{\tau-1/2},$$

где ρ – расстояние до ребра;

$$\tau = (2/\pi) \arctg \sqrt{1 + 2\sigma} - 1/2;$$

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon_1/\varepsilon_2, & c < h; \\ \varepsilon_2/\varepsilon_1, & c > h. \end{cases}$$

Компонента E_y электрического поля вблизи диэлектрического ребра ($x = a; y = b$) имеет следующую особенность [12]:

$$E_y \sim \rho^{v-1/2},$$

где

$$v = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \sqrt{\frac{\varepsilon_2 (\varepsilon_3 - \varepsilon_4)^2}{\Psi}} \right\} - \frac{1}{2},$$

причем

$$\Psi = 2 \left[\varepsilon_4 (\varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) + \varepsilon_3 (\varepsilon_4^2 + \varepsilon_2^2) + \varepsilon_2 (\varepsilon_3 + \varepsilon_4)^2 \right].$$

Применив метод Галеркина [13] к системе интегральных уравнений относительно неизвестных функций $F_J(y)$ на линиях раздела частичных областей, получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных коэффициентов разложения U_{is} ($s = 1-6$) неизвестных функций [12]:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (U_{i1} D_{iw}^{11} + U_{i2} D_{iw}^{12} + \dots + U_{i6} D_{iw}^{16}) &= 0; \\ \sum_{i=1}^N (U_{i1} D_{iw}^{21} + U_{i2} D_{iw}^{22} + \dots + U_{i6} D_{iw}^{26}) &= 0; \\ &\dots \\ \sum_{i=1}^N (U_{i1} D_{iw}^{61} + U_{i2} D_{iw}^{62} + \dots + U_{i6} D_{iw}^{66}) &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где N – число аппроксимирующих функций на линиях деления частичных областей; D_{iw}^{LM} ($w = 1, 2, 3, \dots, N$) – матрицы при неизвестных коэффициентах.

Приравняв определитель системы (5) к нулю получим уравнение для определения постоянных распространения γ для заданных значений волновых чисел k .

Положив $\gamma = 0$ в уравнении для определения постоянных распространения найдем выражение для определения критических частот f_{cr} HE- и EH-волн.

При расчетах характеристик гибридных типов волн, распространяющихся в диэлектрической среде с малыми потерями, коэффициентом α можно пренебречь. Однако, если длина распространения волны в диэлектрике достаточно большая, потери электромагнитной энергии при распространении волны внутри диэлектрика следует учитывать. При

известном значении тангенса угла диэлектрических потерь исследуемого материала можно найти γ с учетом потерь ($\alpha \neq 0$), используя методику из [14]. В этом случае γ представляется как функция от $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ и раскладывается в ряд Тейлора:

$$\gamma(\varepsilon' - i\varepsilon'') = \gamma(\varepsilon') - i\varepsilon'' \frac{d\gamma(\varepsilon')}{d\varepsilon} - (\varepsilon'')^2 \frac{d^2\gamma(\varepsilon')}{2d\varepsilon^2}.$$

Поскольку функция $\gamma(\varepsilon)$ аналитическая, ее производные не зависят от направления и могут быть заменены конечными разностями:

$$\begin{aligned} \varepsilon'' \frac{d\gamma(\varepsilon')}{d\varepsilon} &\approx \gamma(\varepsilon') - \gamma(\varepsilon' - \varepsilon''); \\ (\varepsilon'')^2 \frac{d^2\gamma(\varepsilon')}{d\varepsilon^2} &\approx \gamma(\varepsilon' + \varepsilon'') + \gamma(\varepsilon' - \varepsilon'') - 2\gamma(\varepsilon'); \\ \gamma(\varepsilon' - i\varepsilon'') &\approx \gamma(\varepsilon') - i[\gamma(\varepsilon') - \gamma(\varepsilon' - \varepsilon'')] - \\ &\quad - [\gamma(\varepsilon' + \varepsilon'') + \gamma(\varepsilon' - \varepsilon'') - 2\gamma(\varepsilon')]. \end{aligned}$$

Если в системе (5) отбросить одно из уравнений и совершить необходимые преобразования, можно получить линейную неоднородную алгебраическую систему уравнений, решение которой позволяет вычислить неизвестные коэффициенты U_{is} с точностью до постоянного множителя. Неизвестный множитель может быть определен из условия нормировки мощности падающей волны в поперечном сечении волновода:

$$\sum_{\xi=1}^{\text{III}} \int_{S_q} (E_x^\xi H_y^\xi - E_y^\xi H_x^\xi) dS^\xi = 1,$$

где S^ξ – площадь поперечного сечения соответствующей частичной области; $E_x^\xi, E_y^\xi, H_x^\xi, H_y^\xi$ – напряженности компонент электрического и магнитного полей соответственно.

Подставив полученные значения U_{is} в выражения для амплитудных коэффициентов $A_{qn}^\xi, B_{qn}^\Pi, C_{qn}^\Pi$ определим, используя (2), (3), напряженности электрических и магнитных полей. Полученные выражения для напряженностей \mathbf{H} и \mathbf{E} использовались при построении структур электромагнитных полей гибридных типов волн в H-волноводе.

Сходимость приведенного метода по приближениям аппроксимации отмечалась в [15] при анализе гибридных типов волн в П-волноводе.

Анализ характеристик гибридных типов волн. На основе изложенного алгоритма была

разработана программа по расчету электродинамических характеристик гибридных типов волн, распространяющихся в Н-волноводе с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.

С помощью программы были рассчитаны электродинамические характеристики волноводов, представленных на рис. 1: критические частоты, постоянные распространения, а также структуры электромагнитных полей гибридных типов волн. Рассматривался Н-волновод WRD350 со следующими параметрами (см. рис. 2): $l = 18.795$ мм, $c = 8.74$ мм, $h = 3.7355$ мм, $g = 4.699$ мм [1].

Результаты расчета первых восьми критических частот f_{cr} HE-волн и первых восьми критических частот EH-волн приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Анализируя данные, приведенных в табл. 2 и 3, можно сделать вывод, что с ростом диэлектрической проницаемости критические частоты ги-

бридных волн уменьшаются. Так, критическая частота основной волны HE_{10}^1 уменьшается на 2.2 ГГц для диэлектрических пластин с $\epsilon_2 = 86$ и на 0.52 ГГц для диэлектрического образца с $\epsilon_4 = 86$ по сравнению с критической частотой основной волны, распространяющейся в Н-волноводе с воздушным заполнением. Таким образом, диэлектрические пластины сильнее возмущают электромагнитное поле основной волны и, как следствие, существенно изменяют ее критическую частоту.

Были визуализированы структуры гибридных HE- и EH-волн, распространяющихся в волноводах, поперечное сечение которых представлено на рис. 1, а и б. Показаны пространственные структуры электромагнитных полей волн HE_{10}^1 (рис. 3), HE_{00}^1 (рис. 5) и EH_{11}^1 (рис. 7) для случая заполнения Н-волновода диэлектрическим образцом,

Таблица 2

Тип волны	Параметры				
	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_4 = 1$	$\epsilon_4 = 8.5;$ $a = 3.13$ мм; $b = 1.86$ мм	$\epsilon_4 = 86;$ $a = 3.13$ мм; $b = 1.4$ мм	$\epsilon_2 = 8.5;$ $a = 3.13$ мм	$\epsilon_2 = 86;$ $a = 3.13$ мм
	Критические частоты (f_{cr}), ГГц				
HE_{10}^1	2.8991	2.4780	2.3751	1.8502	0.6923
HE_{00}^1	8.6072	8.2995	4.8780	6.0988	2.2358
HE_{01}^1	8.8232	8.7390	8.4280	8.6298	8.5407
HE_{11}^1	8.8397	8.8159	8.8085	8.6336	8.5422
HE_{10}^2	11.2365	10.7490	6.6489	10.7577	9.4873
HE_{00}^2	13.6954	12.6589	8.5752	11.1334	9.9242
HE_{01}^2	13.9437	13.3978	8.8819	13.6723	10.1578
HE_{11}^2	13.9899	13.9365	9.9501	13.6895	10.2350

Таблица 3

Тип волны	Параметры				
	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_4 = 1$	$\epsilon_4 = 8.5;$ $a = 3.13$ мм; $b = 1.86$ мм	$\epsilon_4 = 86;$ $a = 3.13$ мм; $b = 1.4$ мм	$\epsilon_2 = 8.5;$ $a = 3.13$ мм	$\epsilon_2 = 86;$ $a = 3.13$ мм
	Критические частоты (f_{cr}), ГГц				
EH_{11}^1	12.9439	8.9144	2.8796	10.8524	3.8838
EH_{01}^1	13.0132	12.4372	4.3822	11.3972	4.0862
EH_{11}^2	19.8825	13.1480	6.4699	14.1622	8.5156
EH_{10}^1	20.0930	18.5896	6.0003	19.1930	6.3557
EH_{00}^1	20.0930	20.0846	7.2305	19.2471	6.3712
EH_{01}^2	20.8375	14.1432	8.7715	14.4387	8.5168
EH_{10}^2	27.0237	20.0988	8.9662	20.4575	10.6170
EH_{00}^2	27.0254	22.3635	10.9694	20.4821	10.6173

HE_{10}^1 (рис. 4), HE_{00}^1 (рис. 6) и EH_{11}^1 (рис. 8) для случая заполнения Н-волновода диэлектрическими пластинами. В обоих случаях $\epsilon = 8.5$, а площади поперечного сечения образцов одинаковы. Вектором **B** обозначены линии индукции магнитного поля, а вектором **D** – электрического. Картины электромагнитных полей определены на

участке волновода протяженностью $\lambda_B/2$, где λ_B – длина гибридной волны в волноводе. Критические частоты f_{cr} , постоянные распространения γ и рабочие частоты f , соответствующие картинам электромагнитных полей (рис. 3–8), приведены в табл. 4. При этом постоянная распространения рассчитывалась двумя методами – по приве-

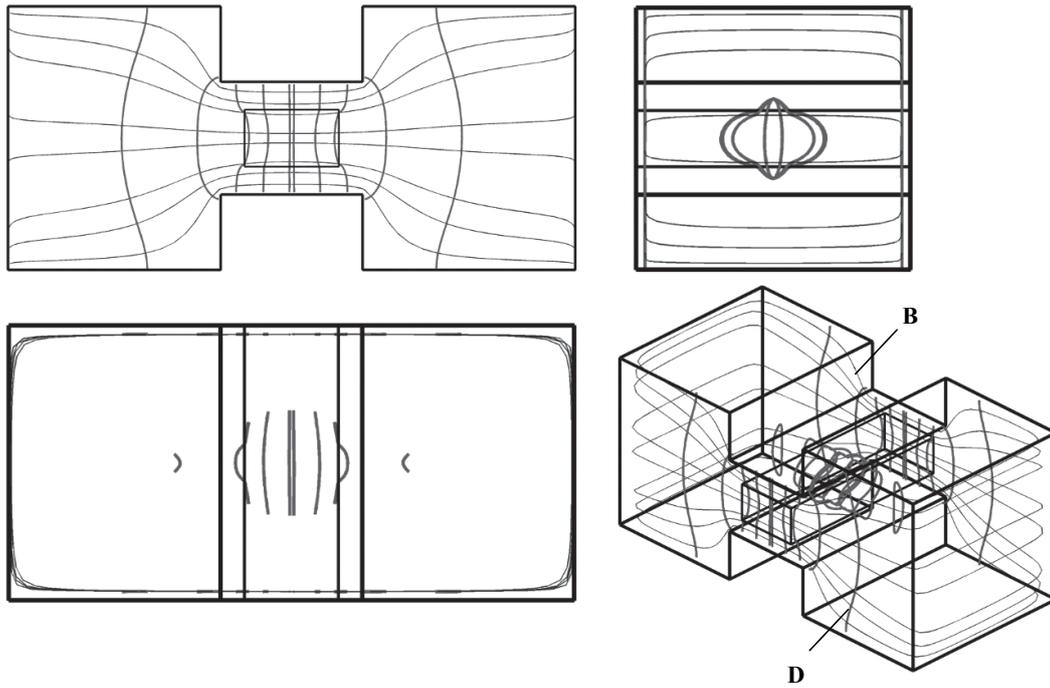


Рис. 3

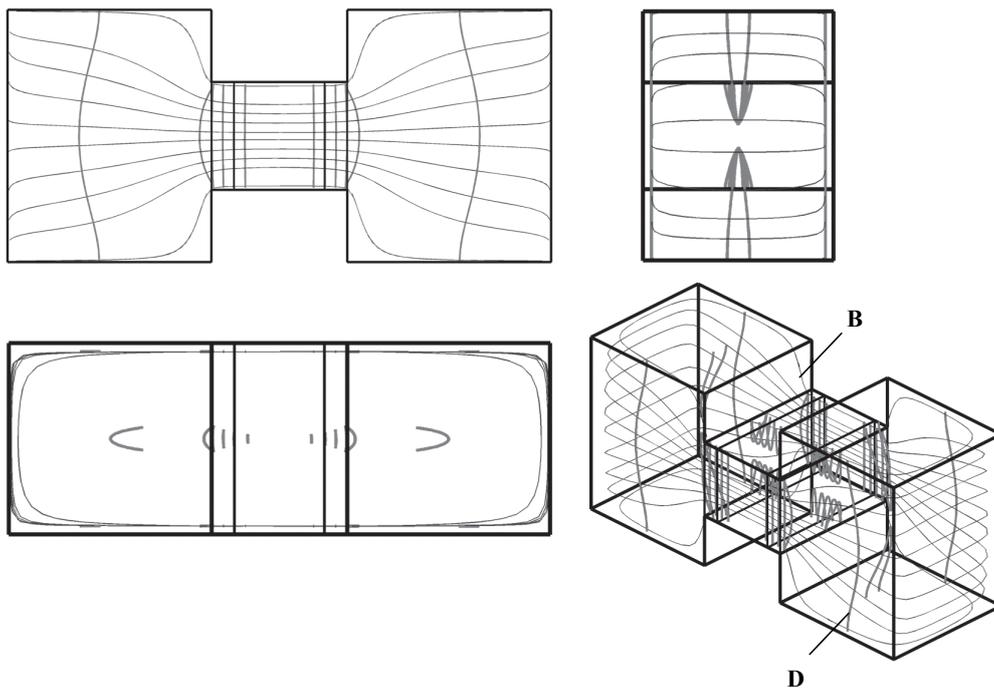


Рис. 4

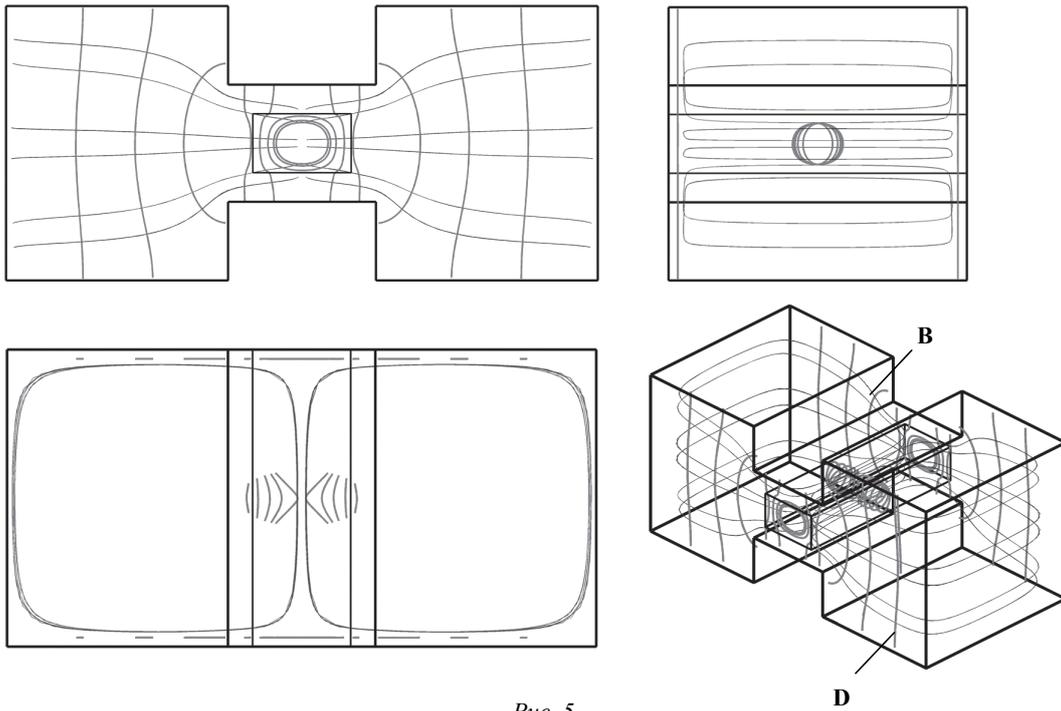


Рис. 5

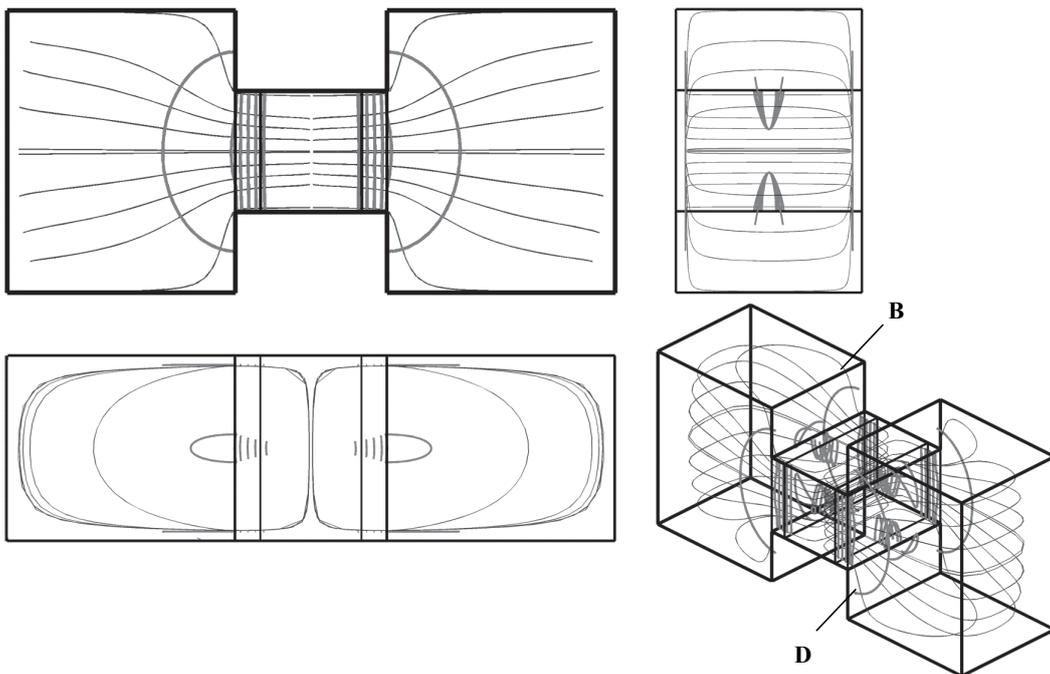


Рис. 6

денному алгоритму γ ($\alpha = 0$) и численными методами γ_M ($\alpha = 0$). Кроме того, для материала с тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 9 \cdot 10^{-4}$ был проведен расчет постоянной распространения с учетом потерь γ ($\alpha \neq 0$).

Анализируя данные, приведенные в таблице, можно сделать вывод, что результаты расчета численными методами и результаты расчета по приве-

денному алгоритму хорошо согласуются – отклонение результатов составляет в среднем 0.64 %.

Анализ структур электромагнитных полей на рис. 3–8 позволяет сделать вывод, что внесение диэлектрика вызывает появление компоненты поля E_z у HE-волн, и H_z – у EH-волн. При этом максимальных значений продольные компоненты поля достигают в сечении волновода $z = \lambda_B/4$. В этом же сечении

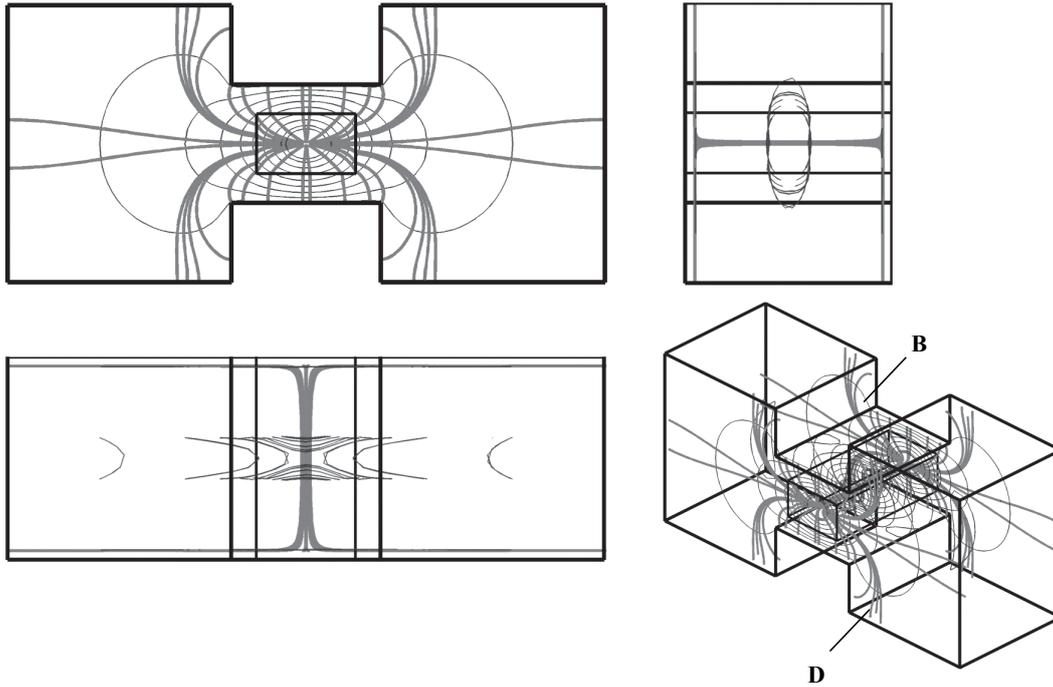


Рис. 7

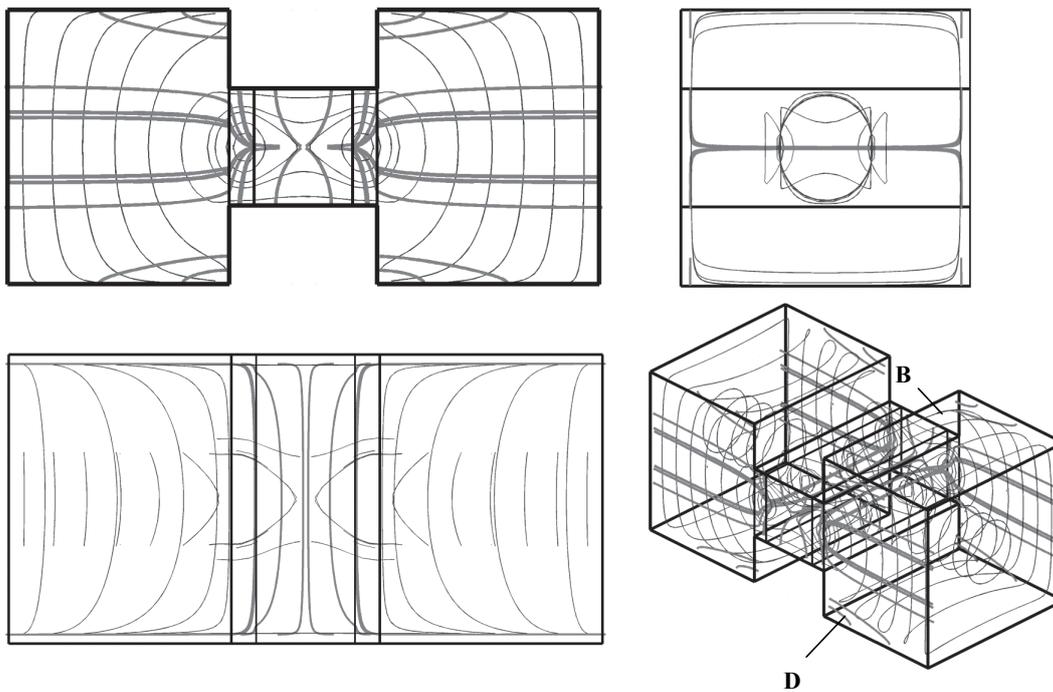


Рис. 8

Таблица 4

Параметры волновода	Тип волны	$f_{ср}, ГГц$	$f, ГГц$	$\gamma_M(\alpha=0), м^{-1}$	$\gamma(\alpha=0), м^{-1}$	$\gamma(\alpha \neq 0), м^{-1}$ для $\text{tg } \delta = 9 \cdot 10^{-4}$
$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_4 = 1; \epsilon_3 = 8.5;$ $a = 3.13 \text{ мм}; b = 1.86 \text{ мм}$	HE_{10}^1	2.4780	7.6159	$j183.0$	$j183.09$	$0.0160 + j183.09$
	HE_{00}^1	8.2995	11.4238	$j176.2$	$j175.55$	$0.0212 + j175.55$
	EH_{11}^1	8.9143	13.9624	$j267.9$	$j268.11$	$0.1064 + j268.10$
$\epsilon_1 = \epsilon_3 = \epsilon_4 = 1; \epsilon_2 = 8.5;$ $a = 3.13 \text{ мм}$	HE_{10}^1	1.8502	7.6159	$j255.4$	$j257.67$	$0.1011 + j257.67$
	HE_{00}^1	6.0988	10.1545	$j299.8$	$j303.55$	$0.2075 + j303.55$
	EH_{11}^1	10.8524	12.6931	$j180.6$	$j182.82$	$0.0585 + j182.83$

$E_x = E_y = 0$ для HE-волн и $H_x = H_y = 0$ для EH-волн. Еще один вывод, который можно сделать из анализа структур электромагнитных полей, заключается в том, что электромагнитное поле втягивается в диэлектрик – внутри диэлектрика плотность силовых линий достигает своего максимума.

Заключение. Полученные результаты показывают, что H-волновод с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением является перспективным элементом техники СВЧ. Внесение диэлектрика в волновод вызывает возмущение электромагнитного поля, приводя к распространению

гибридных волн, существенно изменяя критические частоты, постоянные распространения и структуры электромагнитных полей. Разработанная методика позволяет с высокой точностью рассчитывать электродинамические характеристики гребневых волноводов с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением, а результаты работы могут быть использованы в качестве начального приближения при создании волноводных элементов в структурах интегральных микросхем, изготавливаемых по SIW-технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <http://www.microtech-inc.com> (дата обращения: 16.11.2017).
2. Wideband Resistive Sensors for Double-Ridged Waveguides / P. Ragulis, R. Simniškis, M. Dagys, Ž. Kancleris // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Vol. 45, iss. 10. P. 2748–2754.
3. A Compact L-Band Orthomode Transducer for Radio Astronomical Receivers at Cryogenic Temperature / G. Valente, G. Montisci, T. Pisanu, A. Navarrini, P. Marongiu, G. Casula // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. 63, iss. 10. P. 3218–3227.
4. A Novel X-Band Diplexer Based on Overmoded Circular Waveguides for High-Power Microwaves / J. Li, H. Huang, Z. Zhang, W. Song, H. Shao, C. Chen, W. Huang // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. Vol. 41, iss. 10. P. 2724–2728.
5. Заргано Г. Ф., Ляпин В. П., Михалевский В. С. Волноводы сложных сечений. М.: Радио и связь, 1986. 124 с.
6. Donchenko A. V., Zargano G. F., Zemlyakov V. V. Electrodynamics analysis of electromagnetic fields of hybrid waves propagating in the single-ridged waveguide // J. of Electromagnetic Waves and Applications. 2017. Vol. 32, № 6. P. 739–749.
7. Analysis of Metallic Waveguides of a Large Class of Cross Sections Using Polynomial Approximation and Superquadric Functions / S. Lin, L. Li, T. Yeo, M. Leong // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49, iss. 6. P. 1136–1139.
8. Helsen J., McKay M. Circular Polarisation in a Double-Ridge Waveguide // IEEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation. 2005. Vol. 152, iss. 1. P. 25–30.
9. Cho Y. H., Eom H. J. Analysis of a Ridge Waveguide Using Overlapping T-Blocks // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, iss. 10. P. 2368–2373.
10. Линии передачи сложных сечений / Г. Ф. Заргано, А. М. Лерер, В. П. Ляпин, Г. П. Синявский. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1983. 320 с.
11. Mittra R., Lee S. W. Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves. New York: MacMillan, 1971. 302 p.
12. Донченко А. В., Заргано Г. Ф. П-волновод, как измерительная ячейка устройств определения диэлектрической проницаемости материалов // Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5, № 5. С. 40–46.
13. Fletcher C. A. J. Computational Galerkin methods, Springer Series in Computational Physics. New York: Springer-Verlag, 1984. 319 p.
14. Volume Integral Method for Investigation of Plasmonic Nanowaveguide Structures and Photonic Crystals / A. M. Lerer, I. V. Donets, G. A. Kalinchenko, P. V. Makhno // Photonic Research. 2014. Vol. 2, № 1. P. 31–37.
15. Donchenko A. V., Zargano G. F., Zemlakov V. V. Ridged Waveguide as a Device for Measuring the Dielectric Permittivity of Materials // Proc. of 2014 Int. conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE, 2014), Saratov, 25–26 сент. 2014 г. / IEEE. 2014. P. 326–333.

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2017 г.

Донченко Алексей Витальевич – инженер по специальности "Информационно-измерительная техника и технологии" (2014), аспирант физического факультета Южного федерального университета. Автор 14 научных работ. Сфера научных интересов – прикладная электродинамика; компьютерное моделирование; сложные волноведущие системы; частотно-селективные элементы и устройства.
E-mail: engineer.donchenko@gmail.com

Заргано Геннадий Филиппович – доктор физико-математических наук (2000), профессор (2002), член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой радиофизики Физического факультета Южного федерального университета. Автор 230 научных работ. Сфера научных интересов – разработка методов решения внешних и внутренних задач электродинамики СВЧ; моделирование электромагнитных полей в сложных волноведущих структурах с диэлектрическим заполнением; анализ и синтез селективных устройств.
E-mail: zargano@yandex.ru

Земляков Вячеслав Викторович – доктор физико-математических наук (2015), доцент (2009), профессор физического факультета Южного федерального университета. Автор 115 научных работ. Сфера научных интересов – прикладная электродинамика; компьютерное моделирование; сложные волноведущие системы; частотно-селективные элементы и устройства.

E-mail: vvezem@yandex.ru

REFERENCES

1. Available at: <http://www.microtech-inc.com> (accessed: 16 November 2017).
2. Ragulis P., Simniškis R., Dagys M., Kancleris Ž. Wideband Resistive Sensors for Double-Ridged Waveguides. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017, vol. 45, no. 10, pp. 2748–2754.
3. Valente G., Montisci G., Pisanu T., Navarrini A., Marongiu P., Casula G. A Compact L-Band Orthomode Transducer for Radio Astronomical Receivers at Cryogenic Temperature. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015, vol. 63, no. 10, pp. 3218–3227.
4. Li J., Huang H., Zhang Z., Song W., Shao H., Chen C., Huang W. A Novel X-Band Diplexer Based on Overmoded Circular Waveguides for High-Power Microwaves. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2013, vol. 41, no. 10, pp. 2724–2728.
5. Zargano G. F., Lyapin V. P., Mikhalevskii V. S. *Volnovody slozhnykh sechenii* [Waveguides of Compound Cross-Sections]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1986, 124 p. (In Russian)
6. Donchenko A. V., Zargano G. F., Zemlyakov V. V. Electrodynamics Analysis of Electromagnetic Fields of Hybrid Waves Propagating in the Single-Ridged Waveguide. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2017, vol. 32, no. 6, pp. 739–749.
7. Lin S., Li L., Yeo T., Leong M. Analysis of Metallic Waveguides of a Large Class of Cross Sections Using Polynomial Approximation and Superquadric Functions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001, vol. 49, no. 6, pp. 1136–1139.
8. Helsen J., McKay M. Circular Polarisation in a Double-Ridge Waveguide. *IEEE Proceedings – Micro-Received December, 13, 2017*
9. Cho Y. H., Eom H. J. Analysis of a Ridge Waveguide Using Overlapping T-Blocks. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002, vol. 50, no. 10, pp. 2368–2373.
10. Zargano G. F., Lerer A. M., Lyapin V. P., Sinyavskii G. P. *Linii peredachi slozhnykh sechenii* [Transmission Lines for Compound Cross-Sections]. Rostov-na-Donu, *Izd-vo Rostovskogo universiteta*, 1983, 320 p. (In Russian)
11. Mittra R., Lee S. W. *Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves*. New York, MacMillan, 1971, 302 p.
12. Donchenko A. V., Zargano G. F. P-Waveguide as Measuring Cell for Devices Determining Material Dielectric Constant. *Fizicheskie osnovy priborostroeniya* [Instrumentation Physics]. 2016, vol. 5, no. 5, pp. 40–46. (In Russian)
13. Fletcher C. A. J. *Computational Galerkin Methods*, Springer Series in Computational Physics. New York, Springer-Verlag, 1984, 319 p.
14. Lerer A. M., Donets I. V., Kalinchenko G. A., Makhno P. V. Volume Integral Method for Investigation of Plasmonic Nanowaveguide Structures and Photonic Crystals. *Photonics Research*. 2014, vol. 2, no. 1, pp. 31–37.
15. Donchenko A. V., Zargano G. F., Zemlyakov V. V. Ridged Waveguide as a Device for Measuring the Dielectric Permittivity of Materials. *Proc. of 2014 Int. conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE, 2014)*. Saratov, 25–26 September 2014. Piscataway: IEEE. 2014, pp. 326–333. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958770

Aleksey V. Donchenko – engineer in Information and Measurement Equipment and Technology (2014), Postgraduate student of Physics Faculty of the Southern Federal University. The author of 14 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; computer modeling; complex waveguide systems; frequency-selective elements and devices. E-mail: engineer.donchenko@gmail.com

Gennady F. Zargano – D.Sc. in Physics and Mathematics (2000), Professor (2002). Head of the Department of Radiophysics of Physics Faculty of the Southern Federal University. Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences. The author of 230 scientific publications. Area of expertise: development of methods for solving external and internal tasks of microwave electrodynamics; modeling of electromagnetic fields in waveguide structures with complex dielectric filling; analysis and synthesis of selective devices. E-mail: zargano@yandex.ru

Vyacheslav V. Zemlyakov – D.Sc. in Physics and Mathematics (2015), Associate Professor (2009), Professor of the Department of Applied Electrodynamics and Computer Modeling of Physics Faculty of the Southern Federal University. The author of 115 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; computer modeling; complex waveguide systems; frequency-selective elements and devices. E-mail: vvezem@yandex.ru