

Влияние дефектов стыковки на металлодиэлектрический экранированный волновод в КВЧ-диапазоне частот

В.В. Крутских, А.Н. Ушков, А.И. Черников, Д.О. Завитаев, А.Э. Мирзоян

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва,
ул. Красноказарменная, 14

Аннотация – Обоснование. Для улучшения точности навигационных и радиолокационных систем используются функциональные узлы КВЧ-диапазона длин волн. При этом увеличение рабочей частоты повышает требования к точности изготовления и стыковки устройств. Анализ распространения электромагнитных волн при условии наличия дефектов в волноведущих трактах позволит определить достаточную точность изготовления и оценить физические процессы на нерегулярном участке. **Цель.** Целью настоящей работы стало изучение влияния резких нерегулярностей на характеристики широкополосного экранированного диэлектрического волновода, работающего в диапазоне частот от 90 до 100 ГГц. **Методы.** При помощи численного эксперимента проведено исследование двух вариантов нерегулярности. Они представлены в виде смещения участков экранированных диэлектрических волноводов в вертикальной и в горизонтальной плоскостях. **Результаты.** По значениям передаточной характеристики волноводного тракта выявлены закономерности ослабления энергии электромагнитной волны от величины нерегулярности. Разработанная эмпирическая модель позволяет оценить допустимую точность изготовления волноводного тракта. **Заключение.** Для решения задач канализации слабых сигналов авторы рекомендуют использовать безстыковую технологию изготовления.

Ключевые слова – нерегулярность; экранированный диэлектрический волновод; малые потери; инженерный расчет; регулярные линии; сдвиг.

Введение

Одними из главных направлений развития современных радиотехнических систем являются увеличение скорости взаимодействия устройств между собой [1]. Именно поэтому повышается частотный диапазон устройств как в технике связи, так и в технике дистанционных измерений. С переходом на частоты выше 75 ГГц традиционные волноводы проигрывают диэлектрическим волноводам. Особого внимания заслуживают экранированные диэлектрические направляющие структуры, нашедшие широкое применение в виде линии передачи и частей более сложных блоков устройств. Задачи разработки экранированных диэлектрических волноводов реализуются с 70-х годов прошлого столетия [2]. В диапазоне 90–100 ГГц не худшим вариантом является конструкция, приведенная на рис. 1 и представляющая собой экранированный диэлектрический волновод (ЭДВ) [3], обладающий малыми потерями. Практический интерес представляет рассмотрение данного волноведущего тракта с учетом нерегулярностей, которые неизбежно встречаются при производстве и сборке. Данная статья посвящена изучению влияния резкой нерегулярности типа «сдвиг», то есть взаимного смещения осей диэлектрических стержней при одинаковой ориентации их сечений.

Целью исследований стало выявление закономерностей поведения характеристик узла с вышеуказанной нерегулярностью при протекании через него электромагнитной волны [4]. Важно отметить, что изучаемые вопросы имеют отношение к задаче передачи широкополосного сигнала от объекта измерения к интерферометру [5] и радиометру одновременно [6].

В рассматриваемом случае возникает трудность аналитического описания процессов вблизи нерегулярности [7], что объясняется сильными изменениями параметров волноводной структуры на относительно малом по протяженности участке. Вследствие этого описание зависимостей формируется на основании результатов приближенных методов расчета, которые опираются на уравнения Максвелла и метод конечных элементов [8]. Моделирование и наглядное отображение структуры полей в экранированном диэлектрическом волноводе производятся в пакетах симуляции СВЧ-структур [9].

1. Методика оценки потерь, вызванных нерегулярностью тракта

Для решения поставленной задачи проводится анализ проходных характеристик участка линии передачи с нерегулярностью [10]. При помощи

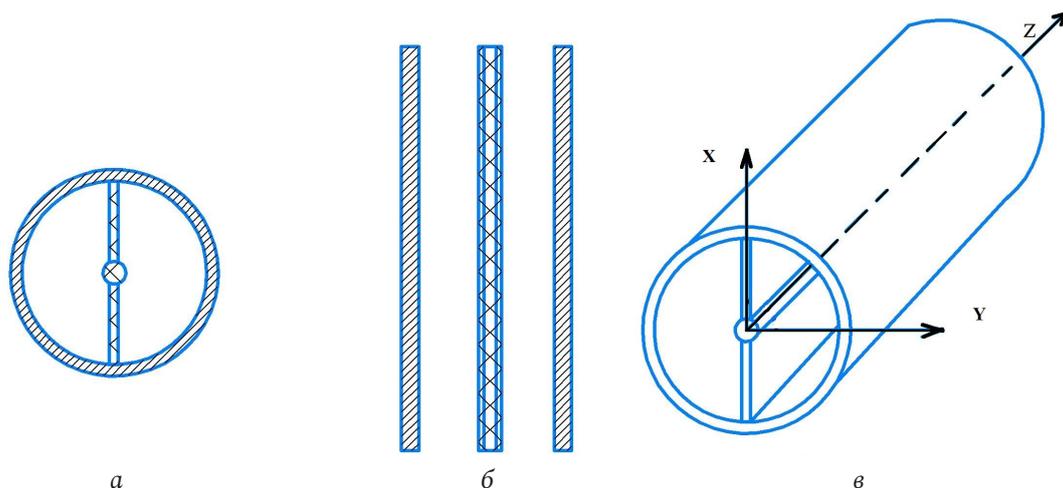


Рис. 1. Базовая конструкция волноведущего тракта: а – поперечное сечение волновода; б – продольное сечение волновода; в – волновод в декартовой системе координат

Fig. 1. The basic design of the waveguide path: a – the cross section of the waveguide; b – the longitudinal section of the waveguide; c – the waveguide in the Cartesian coordinate system

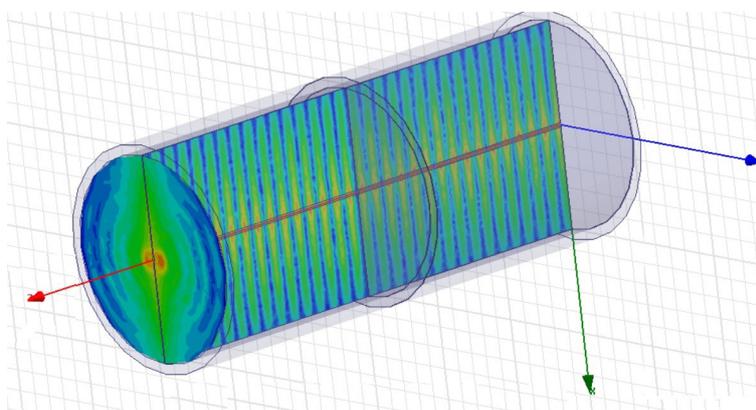


Рис. 2. Распределение поля в металлдиэлектрическом волноводе на частоте 93 ГГц
 Fig. 2. Field distribution in a metal-dielectric waveguide at a frequency of 93 GHz

пакетов моделирования строятся зависимости S параметров и картины полей в исследуемом узле. В настоящей работе отображены характеристики S_{12} , которые наглядно описывают отношение мощности прошедшей волны к мощности падающей на вход волноводной линии и имеют следующую связь с энергетическими потерями:

$$\Delta = 1 - |S_{21}|. \quad (1)$$

Указанный алгоритм рассматривается в работе [11] и служит для анализа величины и природы происхождения потерь.

В связи с геометрической сложностью структуры природу возникновения потерь в ней можно разделить на потери в металлической части и потери диэлектрической конструкции внутри металлической трубы:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{мет}} + \Delta_{\text{диэл}}. \quad (2)$$

Под потерями в металле подразумеваются омические потери в экране металлдиэлектрической

конструкции, которые могут быть описаны при помощи широко известного выражения (4), отраженного в работе [12]:

$$\Delta_{\text{пот}} \approx 8,686h'', \quad (3)$$

где h'' – коэффициент затухания для конкретных типов волн в металлической трубе круглой формы сечения.

Отдельного внимания заслуживает пространство внутри экрана, а также его взаимодействие с диэлектрическим стержнем, который задает направление поляризации протекающей по тракту волны. В общем виде потери в диэлектрике можно записать в виде суммы двух компонент:

$$\Delta_{\text{диэл}} = \Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{ст}}$ – потери в стержне; $\Delta_{\text{пр}}$ – потери в пространстве между диэлектрическим стержнем и экраном.

В нашем случае диэлектрический стержень представляет собой соединение прямоугольных

пластин и цилиндра, расположенного по центру поперечного сечения волновода. В рассматриваемом диапазоне влияние выступа цилиндра мало, так как его радиус меньше $0,1\lambda$ и такой нерегулярностью можно пренебречь. Поэтому для затухания волны в стержне можно воспользоваться выражением

$$\alpha_z = \sum_{i=\varepsilon,\mu} \sum_{k=1,2} \alpha_{k,i} K_{i,k}, \quad (5)$$

где $K_{i,k}$ – структурный коэффициент затухания; $k = \varepsilon, \mu$ – природа затуханий связанная с диэлектрическими и магнитными потерями; $i = 1, 2$ – внутренняя и внешняя среда распространения волны; коэффициент затухания однородной плоской волны в среде с параметрами принимает вид

$$\alpha_{k,i} = \frac{\pi \sqrt{\varepsilon_i \mu_i} \operatorname{tg} \delta_{k,i}}{\lambda}, \quad (6)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс диэлектрических потерь.

Структурные коэффициенты определяются для диэлектрической

$$K_{\varepsilon,i} = \begin{cases} \frac{\sqrt{\varepsilon\mu} M}{U(1+M)}, \\ 1 \end{cases} \quad (7)$$

и магнитной природы происхождения

$$K_{\mu,i} = \begin{cases} \frac{U}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \frac{M}{1+M} \left[1 + V^2 \frac{f_{-1}(\beta)}{f_1(\beta)} \right], \\ \frac{U}{1+M} \left[1 + \frac{V^2}{\mu^2} \frac{f_{-2}(\beta)}{f_2(\beta)} \right]. \end{cases} \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) верхние соотношения соответствуют затуханию в стержне, а нижние затуханию в пространстве. Групповая и фазовая скорости волн определяются через переменные V и U соответственно, а коэффициент M характеризует соотношение мощностей между внутренней и внешней средами. Функция f_i описывается выражением, зависящим от внутреннего волнового числа

$$f_{\pm i}(\beta) = \begin{cases} 1 \pm \frac{\sin(2\beta)}{2\beta}, \\ 1 \pm \cos(2\beta). \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, можно оценить потери только в регулярном участке. На стыке двух участков дополнительно появятся еще потери на отражение и модовое преобразование, зависящие от параметра сдвига и отличающиеся по характеру от направления сдвига.

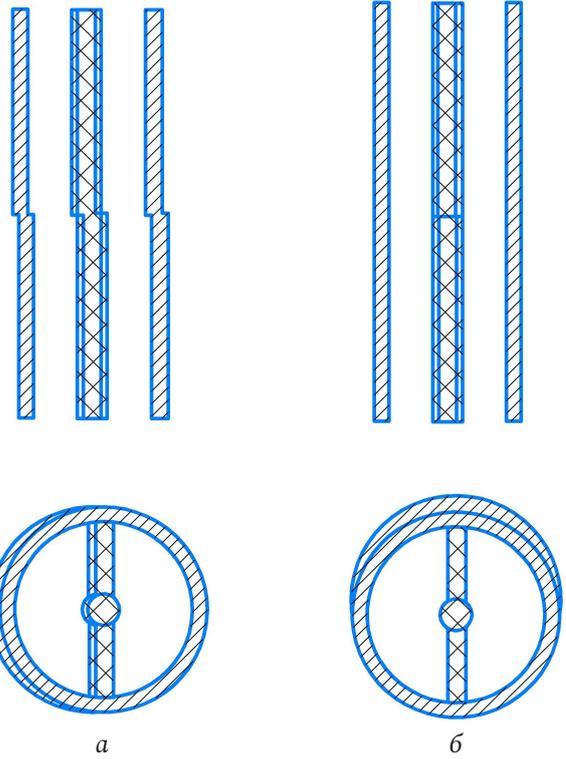


Рис. 3. Исследуемые в работе нерегулярности: а – сдвиг волноведущего тракта по оси X ; б – сдвиг волноведущего тракта по оси Y

Fig. 3. The irregularities studied in the work are: a – the shift of the waveguide path along the X axis; b – the shift of the waveguide path along the Y axis

Модель для исследования нерегулярностей типа сдвиг в двух плоскостях, разработанная для программы 3D-симуляции высокочастотных структур, приведена на рис. 3. Мы ограничили исследования только двумя осями, поскольку другие смещения можно проанализировать на базе указанных.

Стоит оговориться, что указанные типы нерегулярностей в реальных условиях могут встречаться одновременно с другими видами, такими как зазор или поворот плоскости поляризации. При этом в работе указанные нерегулярности специально рассмотрены независимо друг от друга, что позволяет выявить природу и характер каждой из них.

С практической точки зрения исследование физической стороны процессов, возникающих на нерегулярности, позволяет расширить диапазон применений волноводной линии. Например, результаты работы о диэлектрическом волноводе, работающем в режиме неизлучения [13], показали эффективное применение волноводных линий с нерегулярностью для возбуждения определенных мод в многослойных структурах.

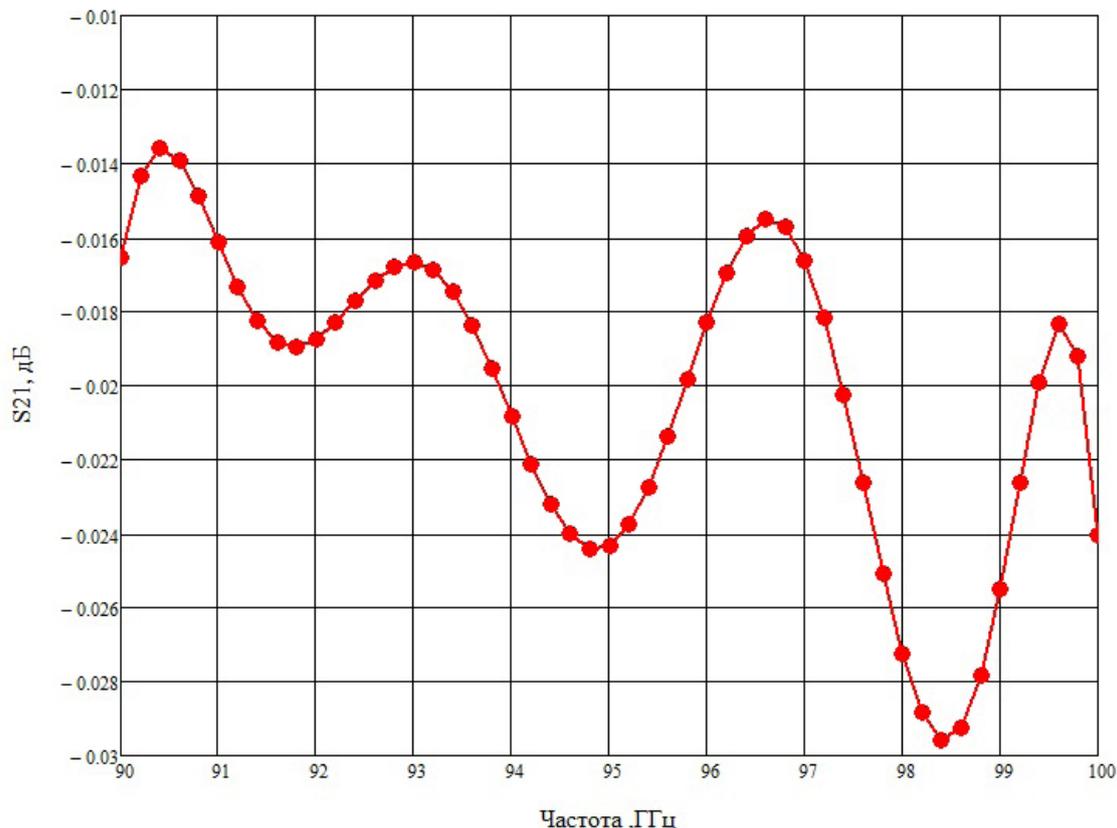


Рис. 4. Передаточная характеристика исследуемой волноводной линии без нерегулярностей
Fig. 4. Transfer characteristic of the waveguide line under study without irregularities

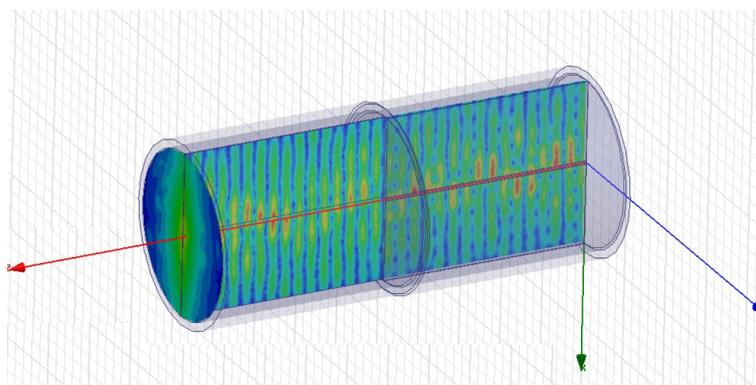


Рис. 5. Распределение поля в металлодиэлектрическом волноводном тракте с нерегулярностью типа сдвиг по оси X на частоте 93 ГГц
Fig. 5. Field distribution in a metal-dielectric waveguide path with an irregularity of the X -axis shift type at a frequency of 93 GHz

При помощи численного эксперимента производится количественный и качественный анализ потерь в функциональном узле. Выявления закономерностей воздействия величин нерегулярностей на характеристики экранированного диэлектрического волновода происходит на основании сравнения S_{12} нерегулярной участка линии с участком без дефекта, рис. 4. Адекватность работы численного эксперимента для диэлектрических, экранированных ДВ и полужакрытых ДВ была подтверждена физическим экспериментом в работе [14], где результаты численного и физиче-

ского эксперимента в большей части не отклонялись друг от друга более 5 %.

2. Нерегулярность типа сдвиг по оси X волноведущего тракта

Нерегулярность типа сдвига волноведущего тракта по оси X представлена на рис. 5, а также распределение поля на частоте 93 ГГц. При прохождении волны через нерегулярный участок энергия поля ослабевает, но также сосредоточена в цилиндрическом стержне и прилегающих пластинах. Переотражения от сдвига образуют обратную

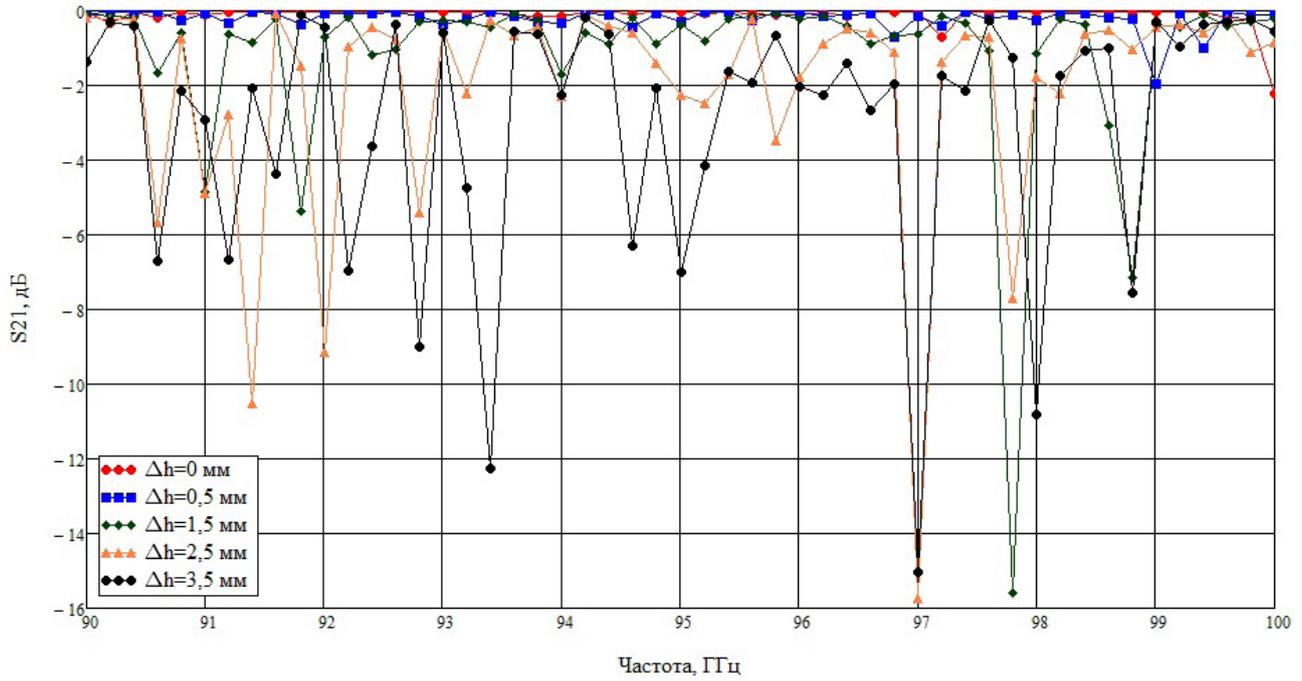


Рис. 6. Передаточная характеристика металлодиэлектрического волноводного тракта с нерегулярностью типа сдвиг
Fig. 6. Transfer characteristic of a metal-dielectric waveguide path with a shift-type irregularity

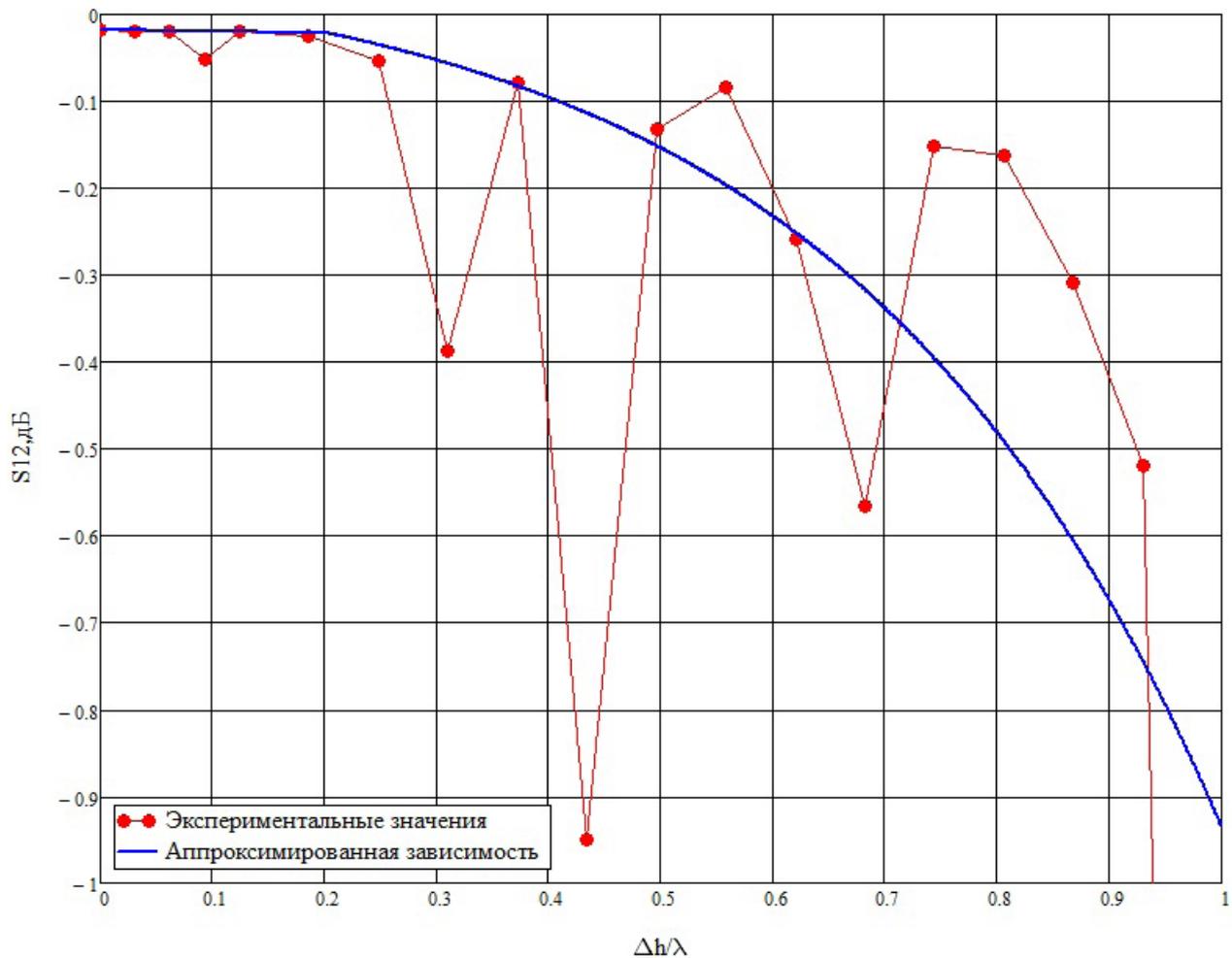


Рис. 7. Зависимость передаточной характеристики от относительной величины сдвига
Fig. 7. Dependence of the transfer characteristic on the relative magnitude of the shift

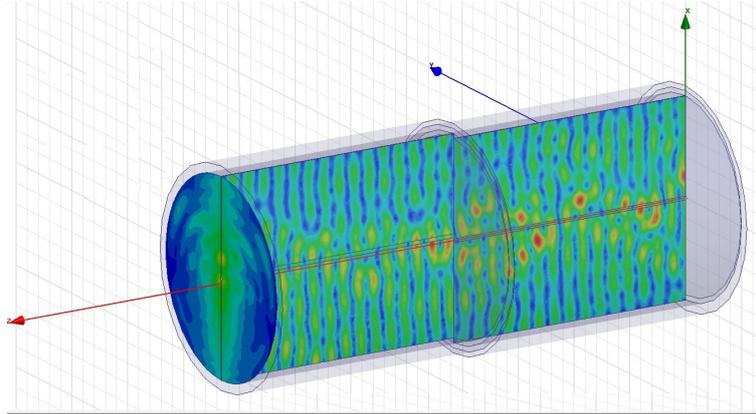


Рис. 8. Распределение поля в металлodieлектрическом волноводном тракте с нерегулярностью типа сдвиг по оси Y на частоте 93 ГГц
 Fig. 8. Field distribution in a metal-dielectric waveguide path with an irregularity of the Y -axis shift type at a frequency of 93 GHz

волну, которая изменяет форму падающей волны. Также дефект приводит к формированию высших мод. Согласно работе [15], увеличение потерь при сдвиге связано с процессами, в большей степени порожденными диэлектрической природой.

Характер зависимостей S_{12} от частоты приведен на рис. 6. Из графиков видно, что передаточная характеристика при малых сдвигах $\Delta h = 0,5$ мм монотонна и близка к значениям передаточной характеристики тракта без нерегулярности.

Ослабление передаточной функции в таком случае не превышает значений в 0,5 дБ и возрастает до 2 дБ в конце частотного диапазона. При большем увеличении сдвига появляются провалы S_{12} и ее зависимость приобретает колебательный характер. Пиковые значения провалов достигают -16 дБ и смещаются в область меньших частот.

Зависимость S_{12} от величины относительного сдвига $\Delta h/\lambda$ отображена на рис. 7. Из графика следует, что на отрезке от 0 до $0,2\lambda$ характеристика имеет линейный характер и может быть описана формулой

$$S_{21}(h) = ah + b, \quad (10)$$

где коэффициенты $a = -0,018$ и $b = -0,018$.

Вне этого участка характеристика приобретает пульсирующий, колебательный характер и аппроксимация усложняется.

Вследствие этого рассмотрен участок до λ , что накладывает дополнительные требования к точности производства. Указанное допущение позволяет аппроксимировать зависимость экспонентой в диапазоне от $0,2\lambda$ до λ :

$$S_{21}(h) = ae^{bh} + c, \quad (11)$$

где коэффициенты $a = -0,05$, $b = 3$ и $c = 0,07$.

3. Нерегулярность типа сдвиг по оси Y волноведущего тракта

Нерегулярность типа сдвиг волноведущего тракта по оси Y представлена на рис. 8, а также распределение поля на частоте 93 ГГц. Протекание волны через нерегулярный участок сильно деформирует структуру поля, возникают колебания высших мод. При этом основная часть энергии поля сосредоточена в области диэлектрического цилиндрического стержня и значительно ослабевает к его краям.

Опираясь на работу [16], можно сказать, что основной вклад в ослабление S_{12} вносят потери, вызванные диэлектрической природой.

Характер зависимостей S_{12} от частоты приведен на рис. 9. Из графиков видно, что передаточная характеристика монотонна и имеет меньше провалов, чем в случае со сдвигом по оси X , которые наблюдаются в начале и середине рассматриваемого диапазона частот. Последнее говорит о большей фазовой стабильности волновода. Пиковые значения провалов достигают меньших величин, -13,5 дБ.

На рис. 10 отмечена характеристика S_{21} волноведущего тракта от относительной величины сдвига. Из графика следует, что при величине зазора до $0,16\lambda$ характеристика может быть описана выражением

$$S_{21}(h) = ah + b, \quad (12)$$

где коэффициент $a = -0,08$, а коэффициент $b = -0,018$. При увеличении сдвига характеристика становится нестабильной и изрезанной, что затрудняет ее точное и приближенное описание. При грубой оценке экспериментальных значений S_{21} следует линейное поведение. Выборка значе-

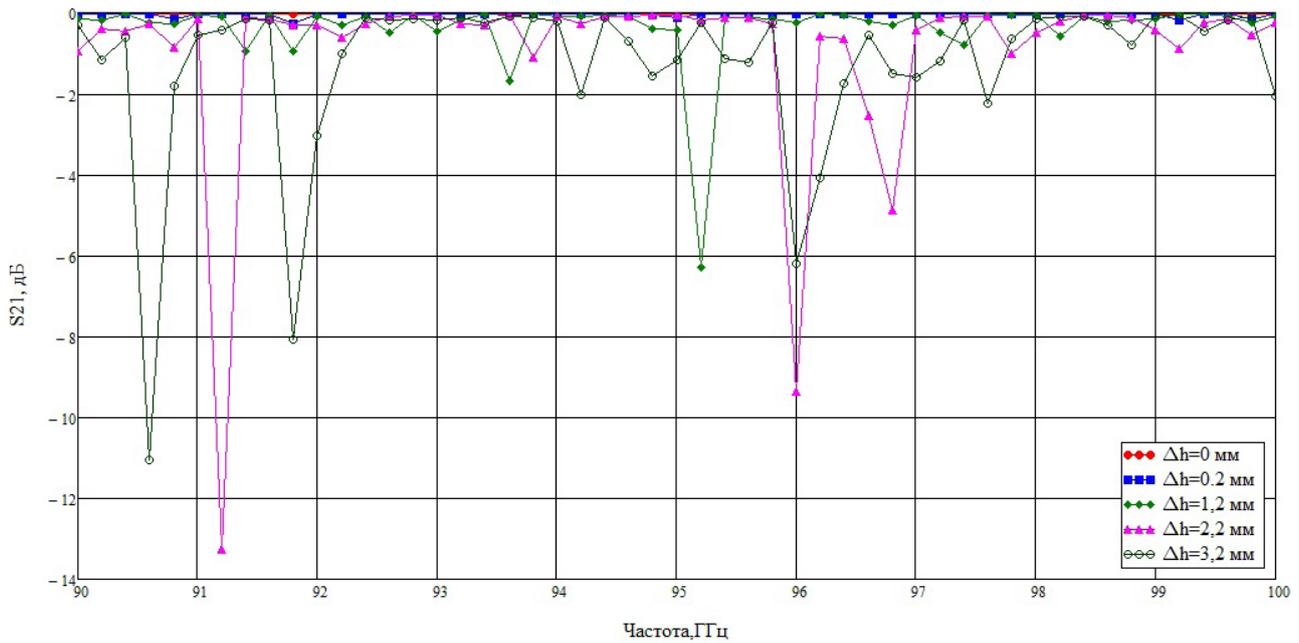


Рис. 9. Передаточная характеристика металлодиэлектрического волноводного тракта с нерегулярностью типа сдвиг
Fig. 9. Transfer characteristic of a metal-dielectric waveguide path with a shift-type irregularity

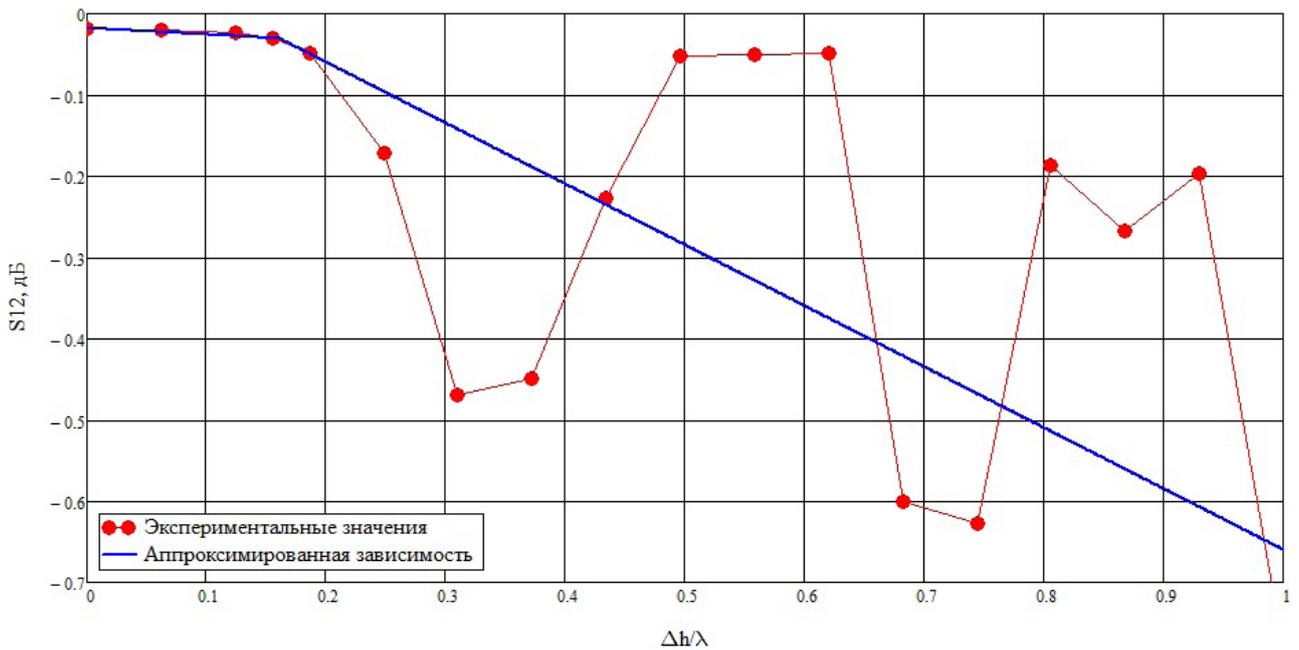


Рис. 10. Зависимость передаточной характеристики от относительной величины сдвига
Fig. 10. Dependence of the transfer characteristic on the relative magnitude of the shift

ний осуществлялась тем же способом, что и в предыдущем разделе.

4. Результаты

1. Были выявлены основные физические принципы возникновения потерь в регулярной металлодиэлектрической волноводной линии передачи, большинство из которых связано с формированием фазового распределения волн вблизи

нерегулярности, что при интерференции искажает структуру поля и повышает потери в линии.

2. В результате исследования было выявлено, что характер зависимостей S_{12} от ширины зазора носит строго линейный характер в пределах от 0 до $0,2\lambda$ для случая со сдвигом по оси X и до $0,18\lambda$ для случая со сдвигом по оси Y , близкий к линейному вне этого участка.

3. При увеличении ширины сдвига больше $0,2\lambda$ появляется изрезанность передаточной характе-

ристики S_{12} , вызванная фазовым набегом отраженной волны относительно падающей. Линейная зависимость носит приближенный характер, и с ростом зазора погрешность увеличивается.

4. Наибольшие потери наблюдаются при сдвиге по оси X и составляют 16 дБ. Для случая сдвига по оси Y они незначительно ниже и равны 13,5 дБ.

5. Для нерегулярностей всех рассматриваемых типов характерны потери на преобразование моды и возникновение неустойчивости передаточной характеристики, вызванное фазовым распределением волн в области нерегулярности и последующей их интерференцией.

Заключение

Полученные в ходе работы зависимости передаточных характеристик металлодиэлектриче-

ского волновода от величины нерегулярности показали, что с увеличением сдвига наблюдается рост потерь, вызванных модовым преобразованием волны и ее переотражением от нерегулярного участка. Указанные явления вносят дополнительные ограничения при сборке и стыковке волноводных функциональных узлов на экранированном диэлектрическом волноводе. Так, при сдвиге более чем на $0,2\lambda$ передаточная характеристика уменьшается больше чем на 0,1 дБ. Наиболее «опасный» сдвиг наблюдается в поперечной плоскости и приобретает экспоненциальную зависимость.

Опираясь на результаты работы, авторы рекомендуют использовать бесстыковую технологию изготовления для решения задач канализации слабых сигналов.

Список литературы

1. Автоматизированное проектирование ферритовых циркуляторов на сосредоточенных элементах / В.Н. Бородин [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 4. С. 74–84. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.74-84>
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. 440 с.
3. Металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц / В.В. Крутских [и др.] // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. Т. 8, № 9. С. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-7-14>
4. Расчет спектров волн экранированных волноводов с произвольным диэлектрическим заполнением с помощью модифицированного метода Галеркина и метода частичных областей / С.А. Капустин [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 1. С. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.1.20-31>
5. Ichinose K., Kuroki F. A consideration on velocity detection using NRD guide pulse radar at 60 GHz // 2011 China-Japan Joint Microwave Conference. 2011. P. 1–4.
6. Reduction of range finding error in NRD guide pulse radar system at 60GHz / F. Kuroki [et al.] // 2009 European Radar Conference (EuRAD). 2009. P. 266–269.
7. Волобуев А.Н., Антипова Т.А., Адыширин-Заде К.А. Особенности расчета киральной среды в зависимости от концентрации киральных элементов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 2. С. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.2.22-31>
8. Раевский С.Б., Капустин С.А., Раевский А.С. Интегральные представления в краевых задачах о расчете устройств СВЧ- и КВЧ-диапазонов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 4. С. 8–18. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.8-18>
9. Банков С.Е., Курушин А.А. HFSS Ansoft. Электродинамическое моделирование сложных СВЧ-структур. М.: Солон-Пресс, 2006. 256 с.
10. Отражение волн от подвижного упругого слоя в многомодовом волноводе / Е.С. Устинова [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 2. С. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.2.73-78>
11. Агаян Ю.М. Теоретическое и экспериментальное исследование резких нерегулярностей в диэлектрических волноводах: дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 163 с.
12. Широкополосный металлодиэлектрический волноводный тракт с малыми потерями КВЧ-диапазона / В.В. Крутских [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8, № 3. С. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.89.98>
13. Al Attari J.A. Innovative millimeter-wave components based on mixed substrate integrated dielectric-metallic waveguides: Thèse de doctorat. Montréal, 2013. 119 p. URL: <https://publications.polymtl.ca/1165/>
14. Шевченко В.В. Прохождение волн через неоднородный участок неэкранированной направляющей системы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1964. 236 с.
15. Минкара М.С. Многомодовые прямоугольные диэлектрические волноводы и резонаторы КВЧ-диапазона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 20 с.
16. Analysis of inhomogeneously dielectric filled cavities coupled to dielectric-loaded waveguides: Application to the study of NRD-guide components / J.A. Monsoriu [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2004. Vol. 52, no. 7. P. 1693–1701. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.830484>

Информация об авторах

Крутских Владислав Викторович, 1979 г. р. (г. Тамбов), кандидат технических наук, доцент кафедры основ радиотехники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия. Окончил МЭИ(ТУ) в 2002 г. Защитил диссертацию кандидата технических наук в 2005 г. Имеет более 80 научных работ.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений, измерительные комплексы систем интернета вещей.

E-mail: KrutskichVV@mpei.ru

Ушков Андрей Николаевич, 1999 г. р. (г. Москва), студент Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия. Имеет научные труды в области полужанрированных диэлектрических волноводов.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений.

E-mail: UshkovAN@mpei.ru

Черников Антон Иванович, 1992 г. р. (г. Ставрополь), ассистент кафедры основ радиотехники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений.

E-mail: ChernikovAI@mpei.ru

Завитаев Денис Олегович, 2000 г. р. (г. Москва), студент Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений.

E-mail: ZavitayevDO@mpei.ru

Мирзоян Артавазд Эдуардович, 1990 г. р. (г. Москва), аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия. Окончил НИУ МЭИ, защитив магистерскую диссертацию в 2013 г. Имеет научные труды в области полужанрированных диэлектрических волноводов.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений, измерительные комплексы систем интернета вещей.

E-mail: MirzoyanAE@mpei.ru

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2023, vol. 26, no. 2, pp. 48–57

DOI 10.18469/1810-3189.2023.26.2.48-57
UDC 621.372.825
Original Research

Received 2 December 2022
Accepted 9 January 2023
Published 30 June 2023

The effect of docking defects on a metal-dielectric shielded waveguide in the EHF frequency range

Vladislav V. Krutskikh, Andrey N. Ushkov, Anton I. Chernikov,
Denis O. Zavitaev, Artavazd E. Mirzoyan

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
14, Krasnokazarmennaya Street,
Moscow, 111250, Russia

Abstract – Background. To improve the accuracy of navigation and radar systems, functional nodes of the EHF wavelength range are used. At the same time, an increase in the operating frequency increases the requirements for the accuracy of manufacturing and docking devices. Analysis of the propagation of electromagnetic waves, subject to the presence of defects in the waveguide paths, will allow determining sufficient manufacturing accuracy and evaluating physical processes in an irregular area. **Aim.** The aim of this work was to study the effect of sharp irregularities on the characteristics of the digital twin of a broadband shielded dielectric waveguide operating in the frequency range from 90 to 100 GHz. **Methods.** Using a numerical experiment, two variants of irregularity were investigated. They are presented in the form of displacement of sections of shielded dielectric waveguides in the vertical and horizontal planes. **Results.** According to the values of the transfer characteristic of the waveguide path, the regularities of the attenuation of the electromagnetic wave energy from the magnitude of the irregularity are revealed and the permissible manufacturing accuracy is proposed. **Conclusion.** To solve the problems of sewerage of weak signals, the authors recommend using a non-jointed manufacturing technology.

Keywords – irregularity; shielded dielectric waveguide; small losses; engineering calculation; regular lines; shift.

References

1. V. N. Borodin et al., “Automated design of ferrite circulators on lumped elements,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 74–84, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.74-84>. (In Russ.)
2. I. V. Lebedev, *Technique and Microwave Devices*. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. (In Russ.)
3. V. V. Krutskikh et al., “Low-loss shielded metal-dielectric waveguide for 90–100 GHz frequency range,” *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antey»*, vol. 8, no. 9, pp. 7–14, 2021, doi: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-7-14>. (In Russ.)
4. S. A. Kapustin et al., “Calculation of wave spectra of screened waveguides with arbitrary dielectric filling using the modified Galerkin method and the partial domain method,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 20–31, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.1.20-31>. (In Russ.)
5. K. Ichinose and F. Kuroki, “A consideration on velocity detection using NRD guide pulse radar at 60 GHz,” *2011 China-Japan Joint Microwave Conference*, pp. 1–4, 2011.
6. F. Kuroki et al., “Reduction of range finding error in NRD guide pulse radar system at 60GHz,” *2009 European Radar Conference (EuRAD)*, pp. 266–269, 2009.
7. A. N. Volobuev, T. A. Antipova, and K. A. Adyshirin-Zade, “Peculiarities of the calculation of a chiral environment depending on the concentration of chiral elements,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 22–31, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.2.22-31>. (In Russ.)
8. S. B. Raevskiy, S. A. Kapustin, and A. S. Raevskiy, “Integral representations in boundary value problems on the calculation of microwave and EHF devices,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 8–18, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.8-18>. (In Russ.)
9. S. E. Bankov and A. A. Kurushin, *HFSS Ansoft. Electrodinamic Modeling of Complex Microwave Structures*. Moscow: Solon-Press, 2006. (In Russ.)
10. E. S. Ustinova et al., “Reflection of waves from a moving elastic layer in a multimode waveguide,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 73–78, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.2.73-78>. (In Russ.)
11. Yu. M. Agayan, *Theoretical and Experimental Study of Sharp Irregularities in Dielectric Waveguides*: dis. ... cand. tech. sciences. Moscow, 1974, 163 p. (In Russ.)
12. V. V. Krutskikh et al., “Broadband metal-dielectric waveguide path with low losses in the EHF range,” *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, vol. 8, no. 3, pp. 89–98, 2021, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.89.98>. (In Russ.)
13. J. A. Al Attari, *Innovative Millimeter-Wave Components Based on Mixed Substrate Integrated Dielectric-Metallic Waveguides*: Thèse de doctorat. Montréal, 2013, 119 p. URL: <https://publications.polymtl.ca/1165/>
14. V. V. Shevchenko, *The Passage of Waves Through an Inhomogeneous Section of an Unshielded Guide System*: dis. ... cand. phys.-math. sciences. Moscow, 1964, 236 p.
15. M. S. Minkara, *Multimode Rectangular Dielectric Waveguides and EHF Resonators*: avtoref. dis. ... cand. tecn. sciences. Moscow, 2015, 20 p. (In Russ.)
16. J. A. Monsoriu et al., “Analysis of inhomogeneously dielectric filled cavities coupled to dielectric-loaded waveguides: Application to the study of NRD-guide components,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 7, pp. 1693–1701, 2004, doi: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.830484>.

Information about the Authors

Vladislav V. Krutskikh was born in 1979 (Tambov), Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Fundamentals of Radio Engineering of the V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia. Graduated from MPEI (TU) in 2002. Defended his thesis of Candidate of Technical Sciences in 2005. He has more than 80 scientific papers.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and nodes based on them, sensors and measurement systems, measuring complexes of Internet of things systems.

E-mail: KrutskikhVV@mpei.ru

Andrey N. Ushkov was born in 1999 (Moscow), student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia. He has scientific works in the field of semi-shielded dielectric waveguides.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and assemblies based on them, sensors and measurement systems.

E-mail: UshkovAN@mpei.ru

Anton I. Chernikov was born in 1992 (Stavropol), assistant of the Department of Fundamentals of Radio Engineering of the V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and nodes based on them, sensors and measurement systems, measuring complexes of Internet of things systems.

E-mail: ChernikovAI@mpei.ru

Denis O. Zavitaev was born in 2000 (Moscow), student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and assemblies based on them, sensors and measurement systems.

E-mail: ZavitaevDO@mpei.ru

Artavazd E. Mirzoyan was born in 1990 (Moscow), postgraduate student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia. He graduated from the NRU MPEI, having defended his master’s thesis in 2013. He has scientific works in the field of semi-shielded dielectric waveguides.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and nodes based on them, sensors and measurement systems, measuring complexes of Internet of things systems.

E-mail: MirzoyanAE@mpei.ru