

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.8>  
УДК 621.396.67

## ВОЗБУДИТЕЛИ СКАЛЯРНЫХ МОД КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА

В. А. Калошин<sup>1</sup>, Фам Ван Чунг<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), 141700, г. Долгопрудный Московской области, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 19 мая 2021 г.

**Аннотация.** Предложены и исследованы различные варианты построения широкополосных возбуждателей  $E_{01}$  и  $H_{01}$  мод круглого металлического волновода. Электродинамическое моделирование и оптимизация параметров проведены с использованием методов конечных элементов и конечных разностей во временной области.

**Ключевые слова:** круглый волновод, скалярные моды, возбуждители.

**Abstract.** Various options for constructing broadband exciters  $TM_{01}$  and  $TE_{01}$  modes of a circular metal waveguide have been proposed and investigated. Electrodynamic simulation and optimization of parameters were carried out using finite element and finite differences in time domain methods.

**Keywords:** circular waveguide, scalar modes, exciters.

### Введение

Скалярные моды  $E_{0m}$  и  $H_{0m}$ ,  $m = 1, 2, \dots$ , являются высшими модами круглого металлического волновода и сравнительно мало используются на практике. Мода  $E_{01}$  используется, главным образом, в моноимпульсных облучателях и вращающихся волноводных сочленениях. Мода  $H_{01}$  может использоваться в тех же целях, и при этом ее дополнительным достоинством является большая пропускаемая мощность. К тому же, из-за отсутствия продольных токов мода  $H_{01}$

имеет очень малые тепловые погонные потери, которые, в отличие от мод другого типа, уменьшаются с частотой, что делает ее использование в длинных трактах СВЧ и КВЧ диапазонов весьма привлекательным. Ограниченное применение  $E_{01}$  и  $H_{01}$  мод круглого волновода в первую очередь связано со сложностью реализации возбудителей, излучателей и элементов тракта.

Исследованию возбуждения  $E_{01}$  и  $H_{01}$  мод посвящено большое количество работ, которые можно разделить на три группы. К первой группе относятся работы, посвященные разработке и исследованию компактных и сравнительно узкополосных возбудителей, выполненных, как правило, в виде стыков [1-3] круглого волновода и коаксиальной линии с возбуждающим элементом или круглого и прямоугольного волноводов [4]. Для подавления основной моды ( $H_{11}$ ) круглого волновода, а также паразитных высших мод в такого рода возбудителях используются модовые отражающие [1, 4] или поглощающие фильтры [5].

Ко второй группе относятся работы, посвященные разработке и исследованию широкополосных возбудителей в виде плавных переходов от одного сечения волновода к другому через промежуточные сечения [6-21]. Такие возбудители, как правило, имеют большие продольные размеры.

К третьей группе относятся работы, в которых рассматриваются конструкции возбудителей с использованием делителей мощности [22-26]. Такие возбудители имеют большие поперечные размеры.

Целью данной работы является уменьшение габаритов и расширение полосы частот возбудителей  $E_{01}$  и  $H_{01}$  мод круглого металлического волновода. Поскольку большинство известных работ посвящено возбудителям моды  $H_{01}$ , основное внимание в данной работе будет уделено возбудителям моды  $E_{01}$ .

### **Возбудители мод $E_{01}$ и $H_{01}$**

Наибольшей полосой рабочих частот из известных возбудителей моды  $E_{01}$  с питающим прямоугольным волноводом обладает возбудитель, предложенный и исследованный в работе [26]. Возбудитель содержит двухканальный волноводный

Т-образный делитель мощности, два изгиба прямоугольного волновода в H-плоскости, выходы которых соединены через отверстия в стенке с круглым волноводом большого диаметра, содержащим согласующий элемент в области стыка. Этот волновод далее стыкуется с круглым волноводом меньшего диаметра. Недостатком возбuditели является большой поперечный размер. Рассмотрим задачу уменьшения этого размера. Для этого исследуем возбuditел, который также содержит Т-образный волноводный делитель, два изгиба (в отличие от прототипа в E-плоскости), которые переходят в рупоры и возбуждают непосредственно круглый двухмодовый волновод через отверстия в его стенке (рис. 1). В качестве согласующих элементов в Т-образном делителе используются два металлических цилиндра, а в круглом волноводе – усеченный металлический конус.

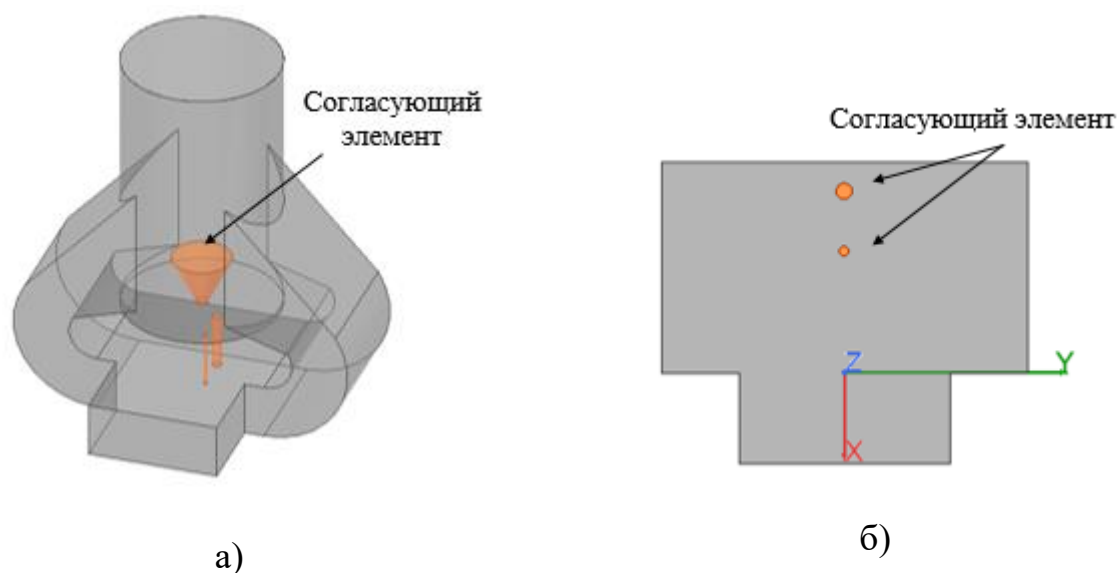


Рис. 1. Возбuditел моды  $E_{01}$ : а) общий вид б) Т-образный делитель мощности.

В результате оптимизации возбuditели с входным прямоугольным сечением 23x10 мм и выходным диаметром круглого волновода 28 мм с использованием электродинамического моделирования в среде Ansys HFSS были получены следующие значения параметров: согласующие цилиндры в делителе мощности расположены от плоскости сочленения волноводов (YZ) на расстояниях 13.3 и

19.8 мм, их диаметры равны, соответственно, 0.7 и 1.7 мм, высота усеченного конус равна 9 мм, диаметры вершины и основания равны 2.2 и 10.5 мм, соответственно.

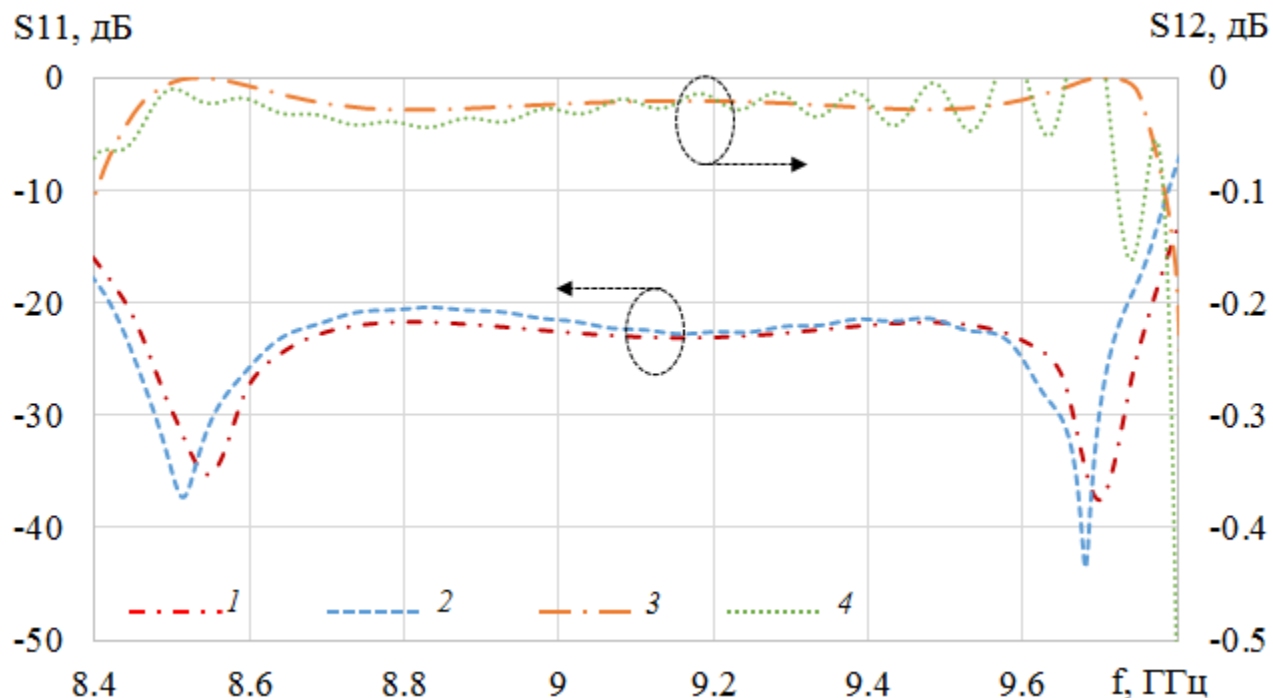


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения  $S_{12}$  моды  $E_{01}$  (3, 4) от частоты: МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4)

На рис. 2 представлены частотные зависимости коэффициента отражения на входе и коэффициента возбуждения моды  $E_{01}$  на выходе оптимизированного возбуждателя, рассчитанные с использованием методов конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей во временной области (МКРВО). Как видно на рис. 2, в полосе частот 8.7...9.8 ГГц (относительная полоса 15%) коэффициент отражения не превышает уровень -20 дБ. При этом потери на преобразование в моду  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ.

Отметим, что предложенная и исследованная конструкция возбуждателя позволяет более чем в два раза уменьшить поперечный размер по сравнению с прототипом при примерно той же полосе частот.

Перейдём к рассмотрению возбуждателя моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом. В качестве прототипа рассмотрим возбуждатель, описанный в работе [3] с относительной полосой рабочих частот 21%. Исследуем возможность расширения полосы рабочих частот данного возбуждателя. Для этого изменим геометрию возбуждающего элемента, который, по существу, представляется собой диско-конусную антенну с конусом, выполненным в виде набора коаксиальных цилиндров. В модифицированном возбуждателе (рис. 3) вместе диско-конусного возбуждающего элемента использован биконический излучатель с внутренним конусом, выполненным в виде набора коаксиальных цилиндров. Угол раствора внешнего конуса и диаметры цилиндров были оптимизированы с использованием программных средств Ansys HFSS. В результате, были найдены следующие величины параметров, представленных на рис. 3:  $a_1=4.2$  мм,  $a_2=5$  мм,  $a_3=3$  мм,  $a_4=5.4$  мм,  $d_1=2.6$  мм,  $d_2=4$  мм,  $d_3=5.4$  мм,  $d_4=11.4$  мм,  $\alpha=28^\circ$ ,  $D=28$  мм,  $L=40$  мм.

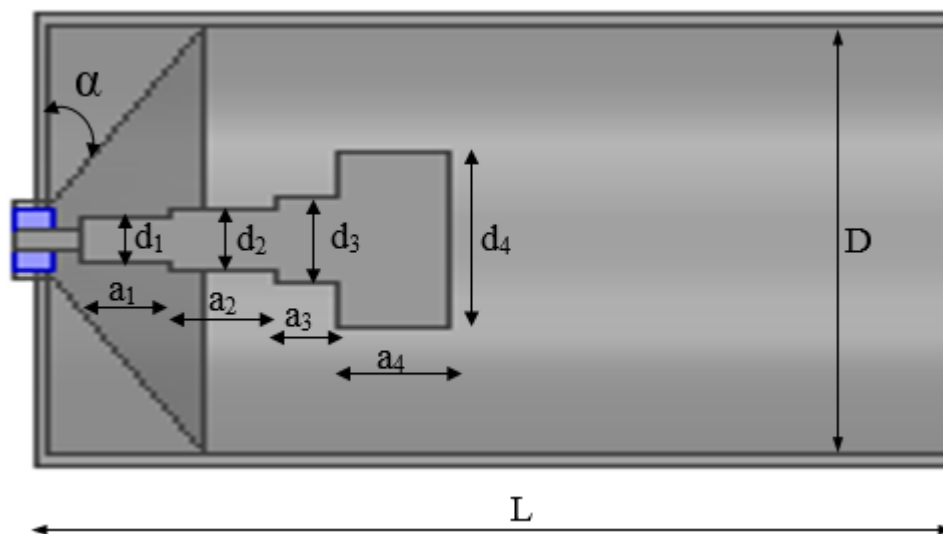


Рис. 3. Возбудитель моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом.

На рис. 4 представлены частотные зависимости коэффициента отражения на входе и коэффициента возбуждения моды  $E_{01}$  на выходе оптимизированного возбуждателя с коаксиальным входом, рассчитанные с использованием МКЭ и МКРВО.

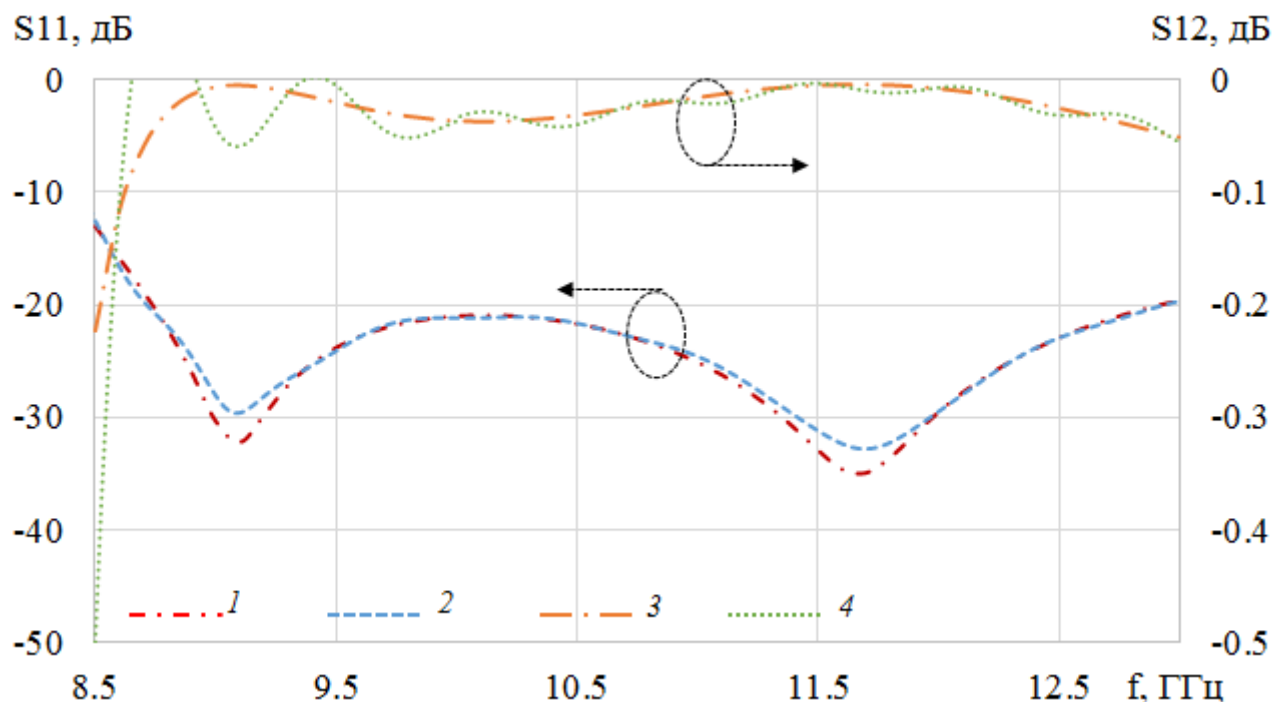


Рис. 4. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения  $S_{12}$  моды  $E_{01}$  (3, 4) от частоты первого варианта возбуждителя с коаксиальным входом: МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4).

Как видно на рисунке, в полосе частот 8.7...12.9 ГГц (относительная полоса 39%) коэффициент отражения не превышает уровень -20 дБ, а потери на преобразование в моду  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ.

Другой вариант построения возбуждителя моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом состоит из двух частей (рис. 5). Первая часть представляет собой биконическую линию. Вторая часть – круглый металлодиэлектрический коаксиальный волновод, внутренний проводник которого - металлический цилиндр с ступенчатым срезом. Диэлектрический слой на внешнем проводящем цилиндре представляет собой тор из полипропилена ( $\epsilon = 2.25$ ) с образующей в виде сегмента круга радиуса  $R$ .

В результате оптимизации возбуждителя были получены следующие значения параметров:  $w=2.7$  мм,  $L1=50$  мм,  $L2=100$  мм,  $d_{in}=4$  мм,  $d_{out}=7$  мм,  $D=28$  мм,  $d1=2.4$  мм,  $d2=11.2$  мм,  $d3=15.2$  мм,  $d4=16$  мм,  $a1=50$  мм,  $a2=2.2$  мм,  $a3=1.3$  мм,  $a4=1.2$  мм,  $R=297$  мм.

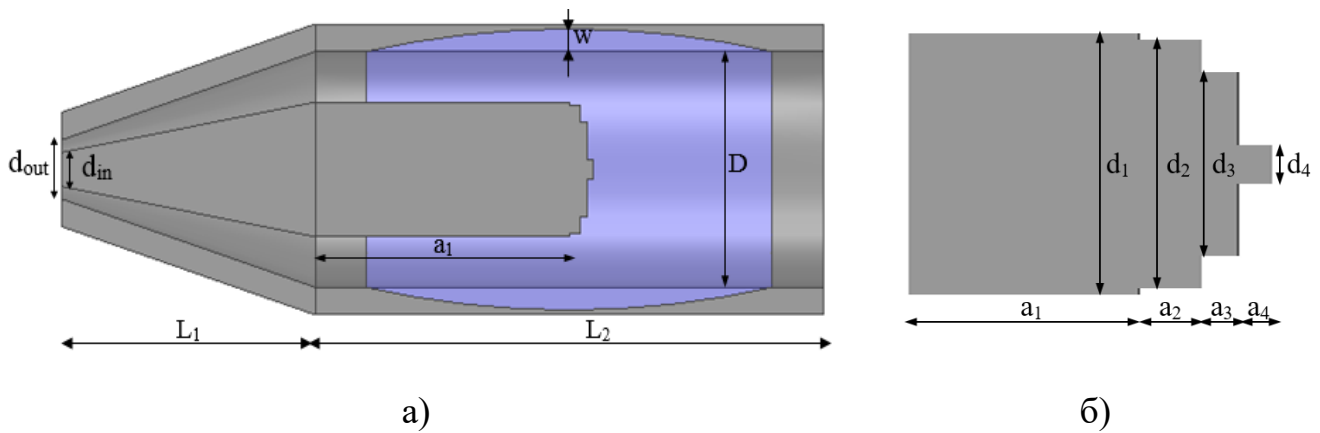


Рис. 5. Возбудитель моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом: а) продольное сечение возбуждителя; б) продольное сечение цилиндра с ступенчатым срезом.

На рис. 6 представлены частотные зависимости коэффициента отражения на входе и коэффициента возбуждения моды  $E_{01}$  на выходе оптимизированного возбуждителя с коаксиальным входом, рассчитанные с использованием МКЭ и МКРВО.

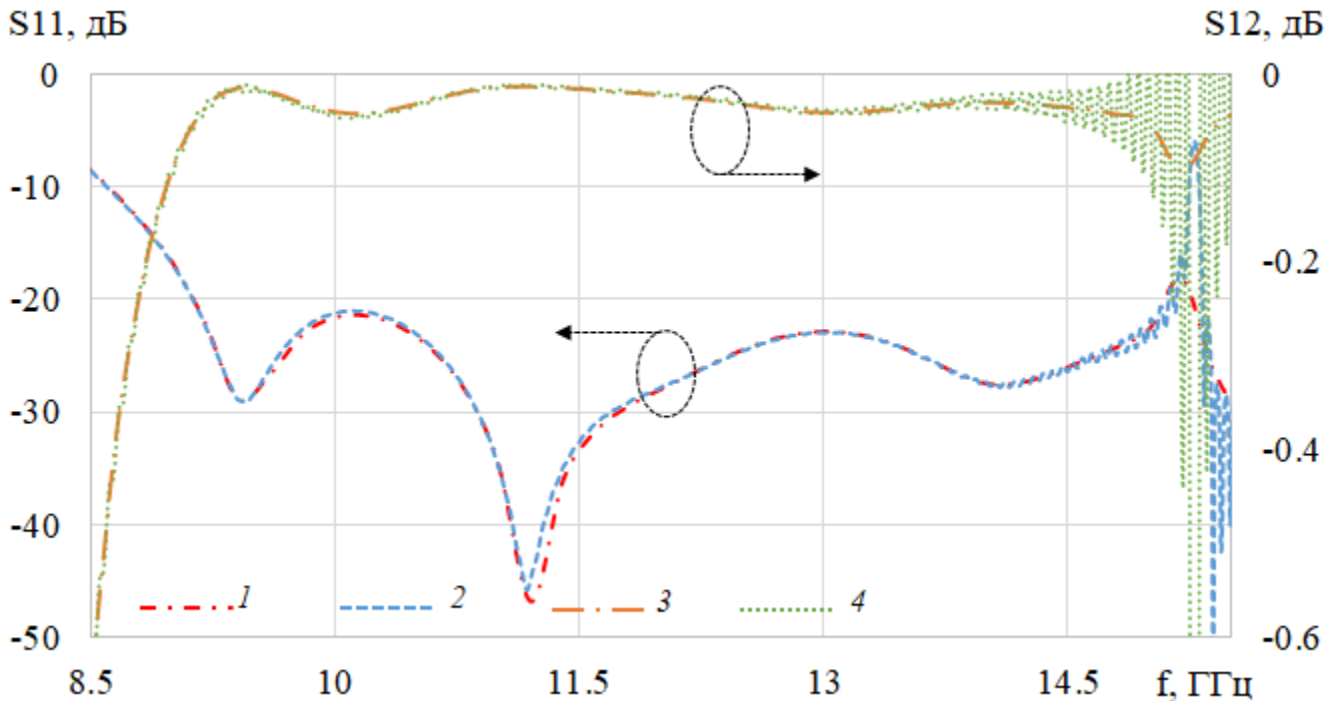


Рис. 6. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения  $S_{12}$  моды  $E_{01}$  (3, 4) от частоты второго варианта возбуждителя с коаксиальным входом: МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4).

Как видно на рисунке, в полосе частот 9.25...15.1 ГГц (относительная полоса 48%) коэффициент отражения не превышает уровень -20 дБ, а потери на преобразование в моду  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ.

Таким образом, относительная полоса частот обеих предложенных и исследованных вариантов возбуждителя моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом примерно в два раза превышает полосу известных возбуждителей с коаксиальным входом и в 2.5 раза – возбуждителей с волноводным входом. Поэтому представляет интерес использовать комбинацию двух возбуждителей: моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом и ТЕМ моды с волноводным входом. Для этого можно использовать стандартные конструкции коаксиально-волноводных переходов (КВП). Однако у этих КВП диаметр коаксиального входа, как правило, не превышает 0.1 минимальной длины волны рабочего диапазона, что приводит к ограничению пропускаемой мощности. Поэтому был разработан КВП с увеличенным электрическим диаметром коаксиального входа, который состоит из трех частей (рис. 7). Первая часть представляется собой линейный переход из прямоугольного волновода сечением 23x10 мм в П-образный волновод. П-образный волновод также с использованием линейного перехода преобразуется в прямоугольный коаксиальный волновод с продольной перегородкой, который далее плавно переходит в коаксиальную линию с внешним диаметром 7 мм. На расстоянии 4.9 мм от обрыва перегородки расположен согласующий штырь диаметром 0.05 мм.

На рис. 8 представлены частотные характеристики двух вариантов КВП (с волновыми сопротивлениями на выходе и 50 и 33.5 Ом), рассчитанные с использованием МКЭ. На рисунке видно, что в полосе частот 9.2...15.2 ГГц (относительная полоса 49 %) для второго варианта и в полосе 9.2...16 ГГц (относительная полоса 54 %) для первого варианта КВП коэффициент отражения не превышает уровень -20 дБ, а потери составляют не более 0.05 дБ.



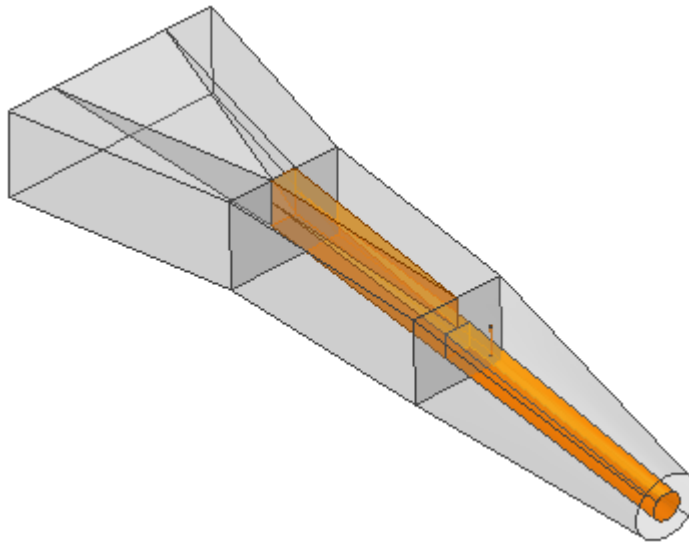


Рис. 7. Коаксиально-волноводный переход.

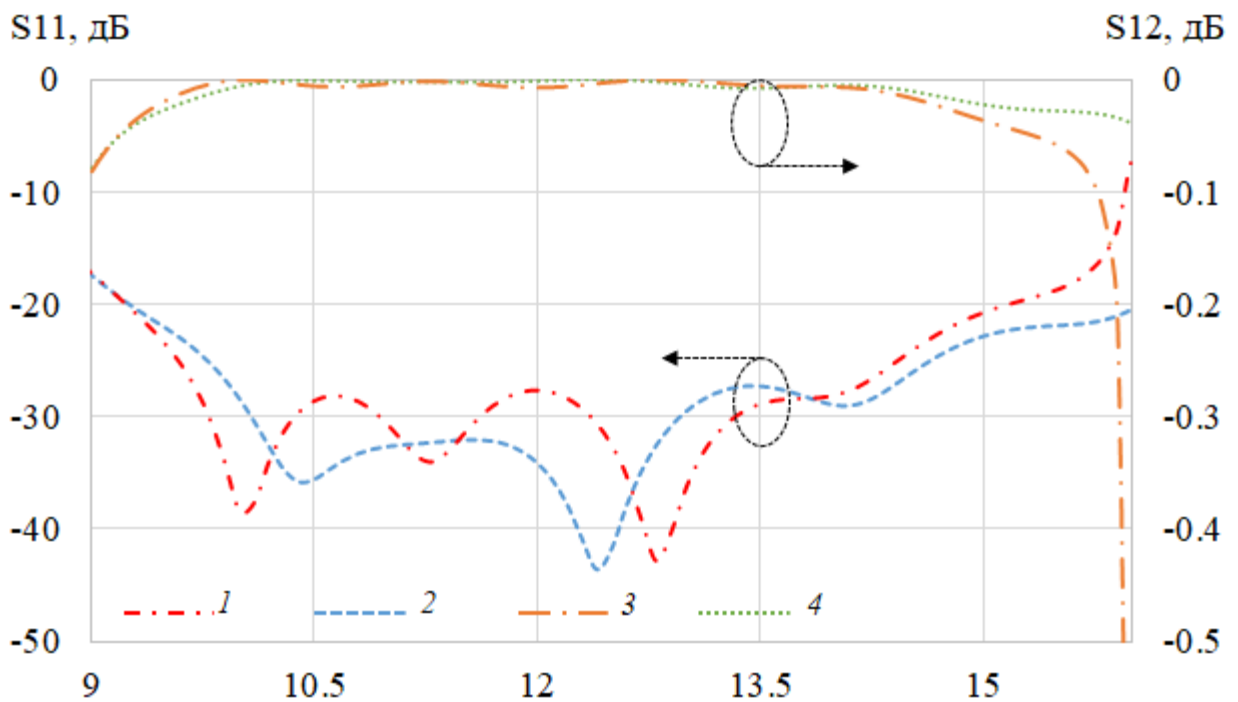


Рис. 8. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения  $S_{12}$  ТЕМ моды (3, 4) от частоты: первый вариант (2, 4), второй вариант (1, 3).

Далее были исследованы возбуждители моды  $E_{01}$ , содержащие разработанные КВП в сочетании с предложенными и исследованными выше возбуждителями моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом (рис. 9).

Частотные характеристики возбуждателей, рассчитанные с использованием МКЭ и МКРВО, показаны на рис. 10. Как видно на рисунке, в полосе частот 8.7...15.3 ГГц (относительная полоса частот 55%) коэффициент отражения первого варианта возбуждателя не превышает уровень -20 дБ. При этом потери моды  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ.

Частотные характеристики второго варианта возбуждателя показаны на рис. 11. Как видно на рисунке, в полосе частот 9.3...14.6 ГГц (относительная полоса 44%) коэффициент отражения не превышает уровень -20 дБ, а потери на преобразование в моду  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ.

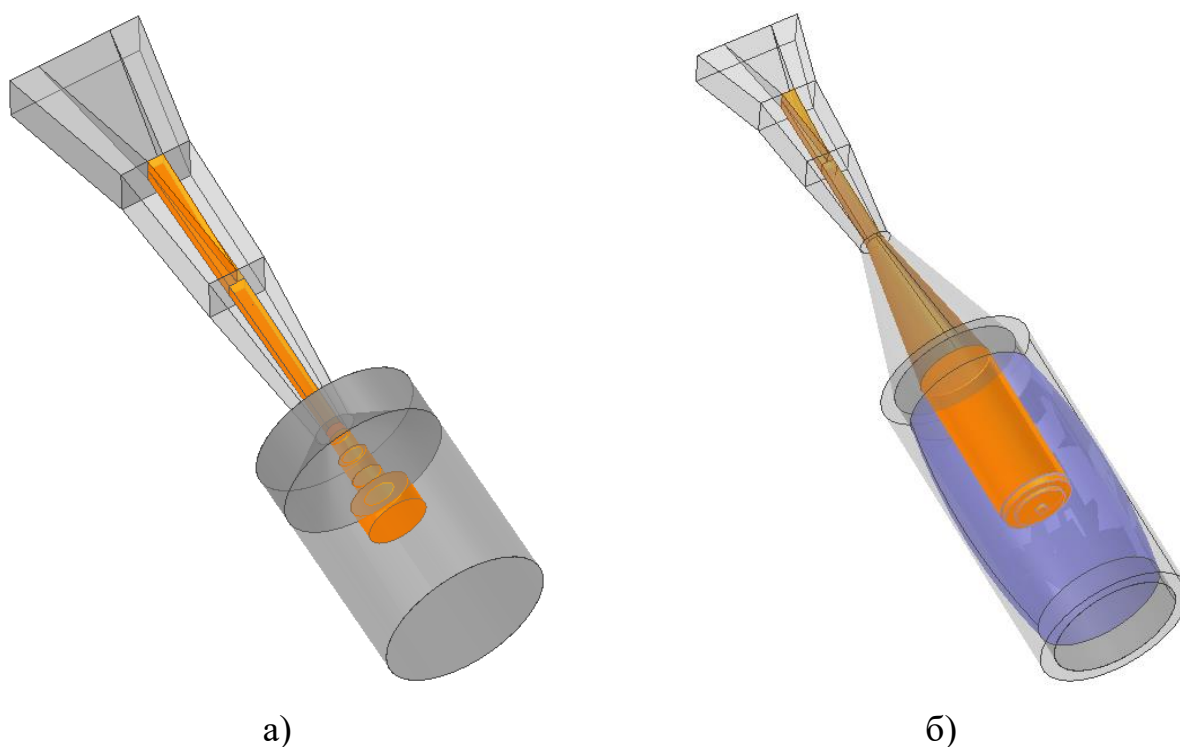


Рис. 9. Возбудитель моды  $E_{01}$  с КВП: а) первый вариант; б) второй вариант.

Несмотря на большое количество работ, посвященных разработке и исследованию возбуждателей моды  $H_{01}$  круглого волновода, соответствующие публикации, за небольшим исключением [1, 23, 24], посвящены возбуждателям с волноводным входом. При этом полоса частот в возбуждателях с коаксиальным входом [1, 24] очень мала (менее 1%), а в возбуждателе, исследованном в работе [23], очень большие потери (около 1 дБ).

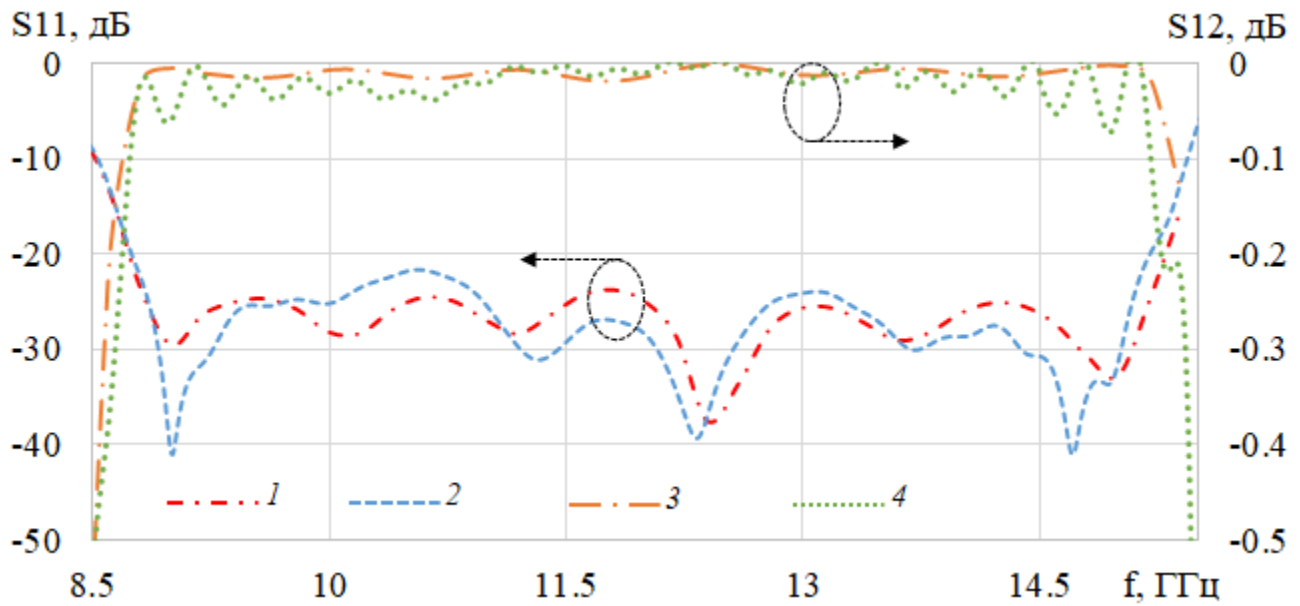


Рис. 10. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения  $S_{12}$  моды  $E_{01}$  (3, 4) варианта 1 возбудителя от частоты: МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4).

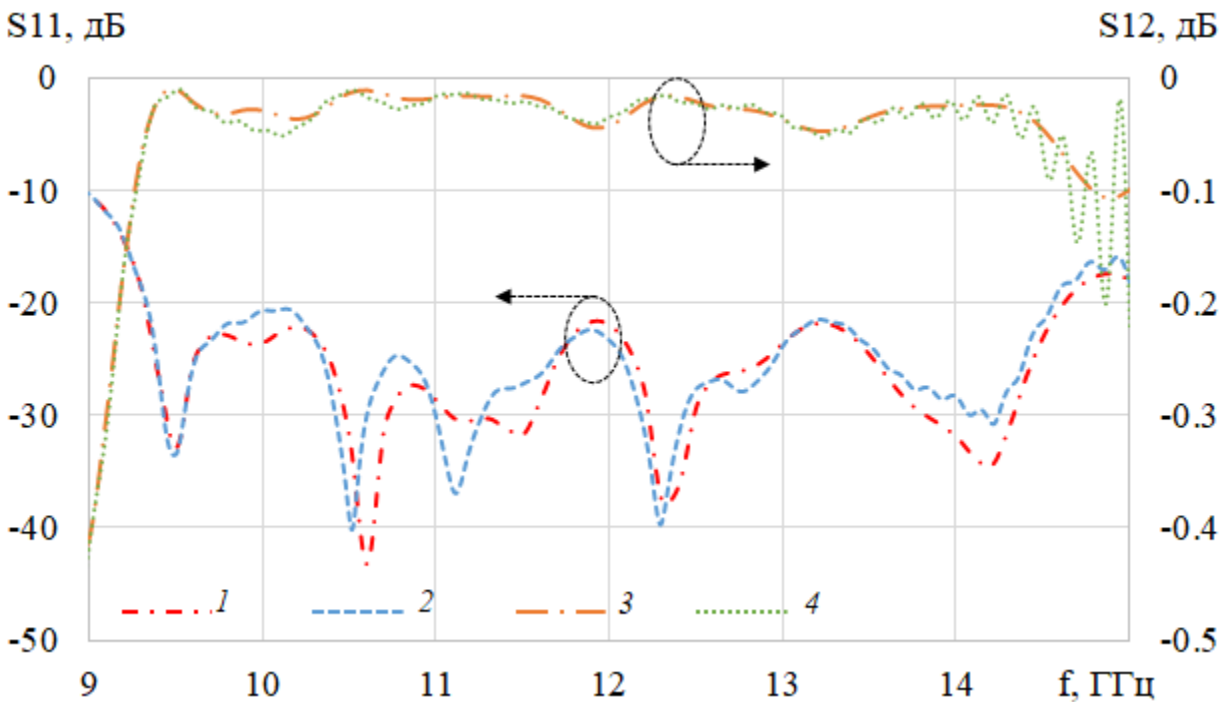


Рис. 11. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения  $S_{12}$  моды  $E_{01}$  (3, 4) от частоты варианта 2 возбудителя: МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4).

Для уменьшения потерь в широкой полосе частот рассмотрим конструкцию возбуждителя, который состоит из двух частей (рис. 12). Первая часть возбуждителя (рис. 12а) представляет собой четырехканальный синфазный коаксиальный делитель, который возбуждает четыре несимметричных вибратора, расположенных в четырех секторных волноводах с угловым размером  $\beta_1=45^\circ$  каждый. Во второй части (рис. 12б) угловой размер секторных волноводов скачком меняется до  $\beta_2=66^\circ$ . Открытые концы этих волноводов возбуждают круглый волновод.

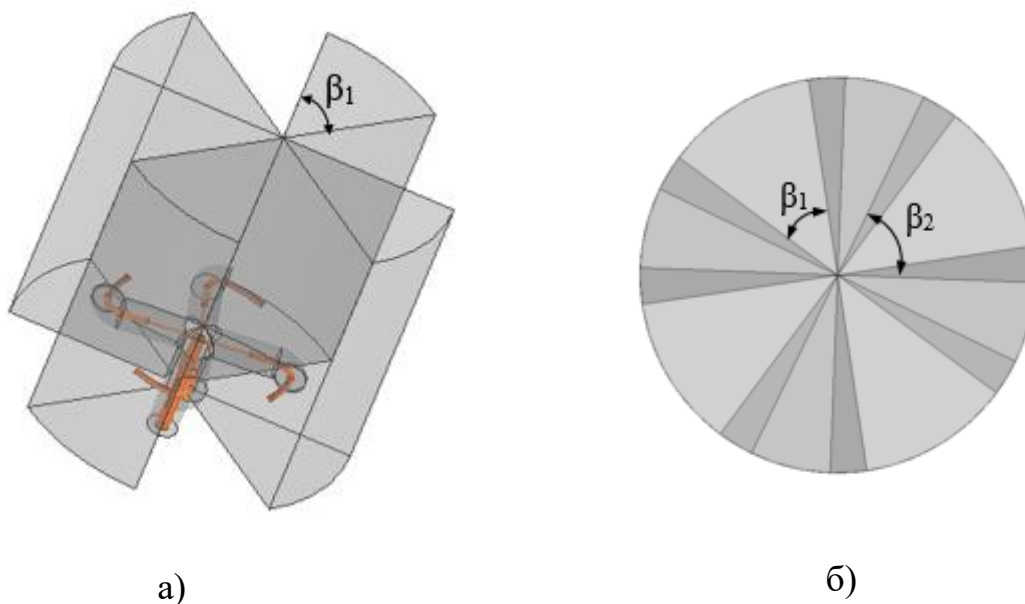


Рис. 12. Возбудитель моды  $H_{01}$  с коаксиальным входом: а) первая часть; б) вторая часть.

На рис. 12 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и возбуждения моды  $H_{01}$ , рассчитанные с использованием МКЭ и МКРВО. Как видно на рисунке в полосе частот 9...10.6 ГГц (относительная полоса частот 16%) коэффициент отражения не превышает уровень -20 дБ. При этом потери на возбуждение моды  $H_{01}$  не превышают 0.1 дБ.

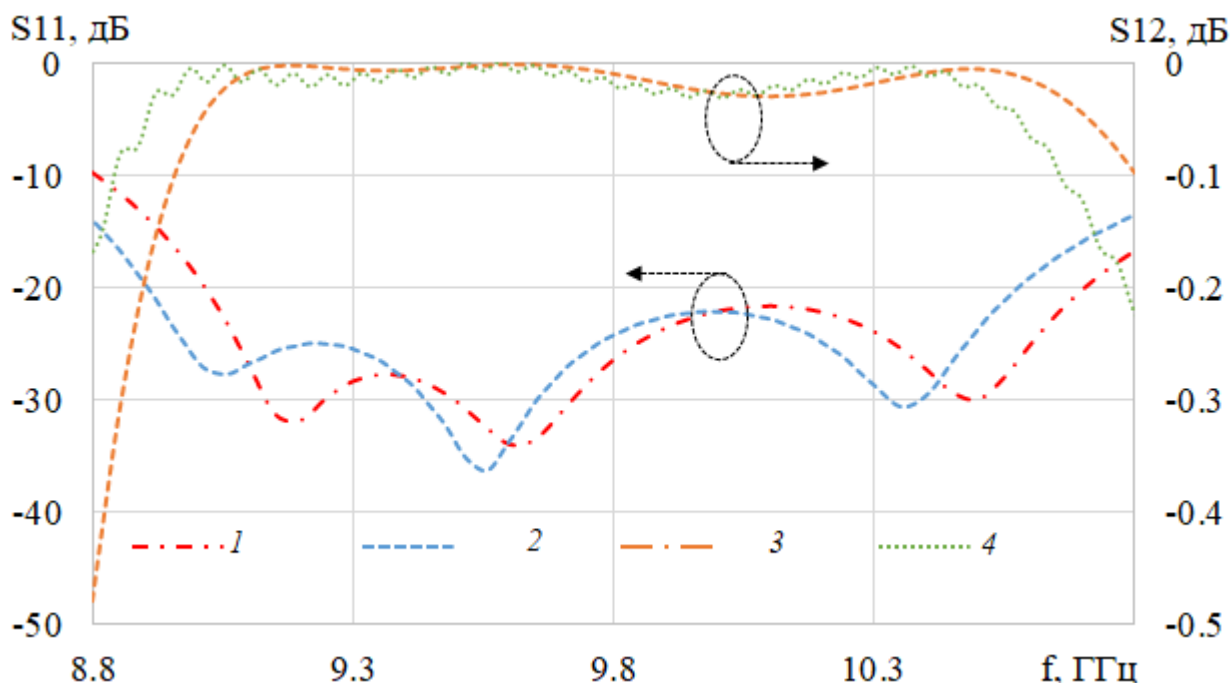


Рис. 12. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения моды  $H_{01}$  (3, 4) от частоты: МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4).

## Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный и исследованный в работе возбудитель моды  $E_{01}$  с волноводным входом позволяет более чем в два раза уменьшить поперечный габарит при примерно той же полосе рабочих частот по сравнению с известным возбудителем.
2. Предложенный и исследованный в работе возбудитель моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом позволяет более чем в два раза расширить полосу рабочих частот по сравнению с известным возбудителем при тех же габаритах.
3. Возбудитель моды  $E_{01}$  с волноводным входом в виде комбинации возбудителя с коаксиальным входом и КВП позволяет в три раза расширить полосу рабочих частот по сравнению с известным возбудителем.
4. Предложенный и исследованный в работе возбудитель моды  $H_{01}$  с коаксиальным входом позволяет более чем в четыре раза расширить полосу

рабочих частот по сравнению с известными возбудителями с аналогичным входом.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-006.

### Литература

1. Капица П.Л., Прозорова Л.А. Новые преобразователи волны  $H_{01}$ . *Электроника*, сборник № 5. 1965. С. 209-214.
2. Patel S., Teval N., Jaiswal R., Kumar J., Singh R., Anitha V. P. Simulation Investigation of TEM to  $TM_{01}$  Mode Conversion in Circular Waveguide. *National Conference on Emerging Trends in Vacuum Electronic Devices & Applications (VEDA 2016)*. India. 2016. P.54-56.
3. Patel S., Jaiswal R., Singh R. and Anitha V. P. Design and development of mode launcher for  $TM_{01}$  mode in circular waveguide in S-band. *2017 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC)*, Ahmedabad, India. 2017.P. 279-282.
4. Сазонов Д. М. *Антенны и устройства СВЧ*. Москва, Высшая школа. 1988. С.60.
5. Гроднев И.И., Дмитраченко В.М., Исаенко Ю.М., Козелев А.И., Малин В.В. *Волноводы дальней связи*. Москва, Связь. 1972.
6. Oguchi B., Ymaguchi K. Centre-excited type of rectangular  $TE_{10}$  to circular  $TE_{01}$  mode transducer. *Proceedings of the IEE*. 1959. Vol.106. No.13S. P.132.
7. Southworth G.C. Principles and Applications of Waveguide Transmission by George C. Southworth. *The Bell System Technical J*. 1950. Vol.29. No.3. P.295.
8. Исаенко Ю.М. *Радиотехника и электроника*. 1959. Т.4. № 8. С.1398.
9. Enderby C.E. *Rectangular to circular waveguide transition*. US Pat. № 3349346. Publ. 24 Oct. 1967.
10. Marie P. *L'onde electrique*. 1957. No 2. P. 471.

11. Gerdine M.A. A new  $TE_{10} - TE_{01}$  mode transducer for mm-waves. *Microwave J.* 1970. Vol.13. No.2. P.73-75.
12. Персиков М.В. *Радиотехника и электроника*. 1961. Т.6. № 3. С.446.
13. Коган Н.Л., Машковцев Б.М., Цибизов К.Н. *Сложные волноводные системы*. Ленинград, Судпромгиз, 1963. С.328.
14. Wolfert P.H. A Wide-Band Rectangular to Circular Mode Transducer for Millimeter Waves. *IEEE Trans.* 1963. Vol.MTT-11. No.5. P.430-431.
15. Лебедев И.В. *Техника и приборы СВЧ*. Москва, Высшая школа. 1970. С.98.
16. Saad S.S., Davies J.B., Davies O.J. Analysis and design of a circular  $TE_{01}$  mode transducer. *IEE J. Microw. Opt. Acoust.*, 1977. Vol.1. No.2. P.58–62.
17. Qian-Zhong Xue, Shi-Chang Zhang, Pu-Kun Liu. Design of the  $H_{10}^{\square}$  to  $H_{01}^{\circ}$  sector-type mode converter at Ka-band. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 2005. Vol.26. No.10. P.1407.
18. Исаенко Ю.М. Секторальный переход между волнами типа  $H_{10}$  и  $H_{01}$ . *Радиотехника и электроника*. 2009. Т 54. №1. С.32-34.
19. Del Mastro M., Del Pino M.A., Spirito M. A 3D Printed  $TE_{10}$  Rectangular to  $TE_{01}$  Circular Waveguide Transition for Polymer Waveguide Characterization. *92<sup>nd</sup> ARFTG Microwave Measurement Conf.* 2019. USA. P.1-3.
20. González-Calvo M., Montejo-Garai J.R., Ruiz-Cruz J.A., Rebollar J.M. Additive Manufacturing of a High-Performance Q-Band Circular  $TE_{01}$  Mode Flared-Type Transducer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2019. Vol.29. No.9. P.577-579.
21. Калошин В.А., Фам Ван Чунг. Сверхширокополосный возбуждатель моды  $H_{01}$ -круглого волновода. *Радиотехника и электроника*. 2021. Т.66. №6. С.565-570.
22. Ching-Fang Yu, Tsun-Hsu Chang. High-performance circular  $TE_{01}$ -mode converter. *IEEE Trans.* 2005. Vol.MTT-53. No.12. P.3794.
23. Летавин Д. А., Мительман Ю. Е., Устройство возбуждения волны  $H_{01}$  в круглом волноводе на основе противофазных диполей. *24-я Международная*

*Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2014)»*. Севастополь. 2014. С.561-562.

24. Малов Э.Э., Мительман Ю.Е. Устройство возбуждения волны  $H_{01}$  в круглом волноводе на основе торцевой щели связи с прямоугольным волноводом. *24-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2014)»*. Севастополь. 2014. С.576-577.
25. Montejo-Garai J. R., Saracho-Pantoja I.O., Ruiz-Cruz J.A., Rebollar J.M. Broadband and high-purity Ku-band circular  $TE_{01}$ -mode converter. *2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. New Delhi, India. 2016. P.1-4.
26. Montejo-Garai J.R., Ruiz-Cruz J.A., Rebollar J.M. Design of a Ku-Band High-Purity Transducer for the  $TM_{01}$  Circular Waveguide Mode by Mean of T-Type Junctions. *IEEE Access*. 2019. Vol.7. P.450-456.

**Для цитирования:**

Калошин В.А., Фам Ван Чунг. Возбудители скалярных мод круглого волновода. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.8>