

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.37

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ВОЗБУДИТЕЛЬ МОДЫ H_{01} КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА

© 2021 г. В. А. Калошин^{а, *}, В. Ч. Фам^{б, *}^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125007 Российская Федерация^бМосковский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141700 Российская Федерация

*E-mail: phamchung@phystech.edu

Поступила в редакцию 03.04.2020 г.

После доработки 03.04.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Предложен и исследован новый вариант построения возбуждателя моды H_{01} круглого металлического волновода в виде плавного перехода от одномодового прямоугольного металлического волновода к круглому многомодовому. Электродинамическое моделирование и оптимизация параметров перехода проведены с использованием методов конечных элементов и конечных разностей во временной области. Показано, что предложенный возбуждатель при относительно небольшой собственной длине обеспечивает малые потери на отражение и преобразование в другие моды круглого волновода в более широкой полосе частот, чем известные возбуждатели.

DOI: 10.31857/S0033849421060140

ВВЕДЕНИЕ

Мода H_{01} круглого многомодового металлического волновода имеет очень малые тепловые потери при распространении, что делает привлекательным ее использование в длинных трактах. Ограниченное применение круглых волноводов с H_{01} модой в первую очередь связано со сложностью реализации возбуждателей, излучателей и элементов тракта этой моды.

Возбудители моды H_{01} можно разделить на две группы. К первой из них относятся сосредоточенные возбуждатели (в виде стыков волноводов с различной формой сечения) [1, 2]. К числу их недостатков относятся сравнительно большие потери на преобразование в другие моды круглого волновода и узкая полоса рабочих частот.

Ко второй группе относятся возбуждатели моды H_{01} круглого металлического волновода в виде плавного перехода от одномодового прямоугольного металлического волновода к многомодовому круглому. Основные идеи построения таких возбуждателей были описаны в середине XX в.

В возбуждателе в виде двух полукруглых волноводов, между которыми располагается возбуждающий одномодовый прямоугольный волновод с отверстиями связи, потери в диапазоне 46...52 ГГц составляют 0.9...1.5 дБ при коэффициенте стоячей волны (КСВ), равном 1.05 [3, 4].

Возбудитель, содержащий два плавных волноводных перехода: от прямоугольного сечения — в сектор (с углом раствора 30°) и далее от секторного сечения — к круглому, как показали расчеты [5, 6], может обеспечить потери 0.15...0.2 дБ при длине $L \approx 50...100 \lambda$ (λ — длина волны в свободном пространстве). Большая длина возбуждателя объясняется тем, что на участке нерегулярного секторного волновода с большими углами разворота эффективно возбуждаются высшие моды, в частности мода H_{11} , имеющая в секторе $150^\circ...180^\circ$ фазовую скорость, близкую к фазовой скорости моды H_{01} . В работе [7] предложен модифицированный возбуждатель такого типа, который состоит из пяти секторных участков с углами (град): 30, 120, 180, 270, 360. Длина третьего участка ($120^\circ...180^\circ$) выбирается из условия минимального возбуждения моды H_{11} . Однако даже в этом случае необходимая длина $L > 25\lambda$.

В работе [8] описан возбуждатель, который состоит из трех участков. На первом участке — переходе от одномодового прямоугольного волновода к ортогональному двухмодовому — через Т-образные промежуточные сечения происходит преобразование моды H_{10} в моду H_{20} . На втором участке прямоугольный волновод с модой H_{20} плавно деформируется в крестообразный волновод, а на третьем — крестообразный волновод переходит в круглый. Данный возбуждатель не нашел широко-

го применения из-за сложной конструкции. В дальнейшем возбудитель такого вида исследовался в диапазоне частот 75...95 ГГц. Потери в экспериментальном образце возбудителя при длине порядка 60λ составили 1.2 дБ, уровень паразитной моды H_{11} менее –10 дБ [9]. В работе [10] была предложена конструкция подобного возбудителя с более простой формой канала. В частности, винтообразные поверхности крестообразного волновода были заменены плоскими. Потери в преобразователе составили менее 0.5 дБ в относительной полосе частот 5%.

В работах [11, 12] описан возбудитель моды H_{01} круглого волновода, который также состоит из трех частей. Первая представляет собой волноводный переход от прямоугольного сечения к секторному с углом сектора 60° . Во второй части сектор плавно расширяется до 360° , а третья представляет собой фильтр, который пропускает только моду H_{01} . Недостатком этого возбудителя являются большая длина и узкая полоса рабочих частот.

В работе [13] представлен возбудитель в виде плавного перехода прямоугольного волновода в Т-образный волновод с постепенно расширяющейся нижней частью, который переходит в ортогональный прямоугольный двухмодовый волновод с H_{20} модой (первая часть возбудителя Марье [8]). Далее две половины этого волновода разворачиваются в круглый. Недостатком устройства является значительная длина (более 20λ) и узкая полоса рабочих частот. Потери в работе не приведены.

В работе [14] представлена еще одна из возможных конструкций перехода от прямоугольного волновода с волной H_{10} , основанная на принципе плавной деформации формы поперечного сечения волновода и структуры поля. Волноводный Е-тройник и две скрутки на углы 90° в противоположных направлениях образуют систему двух прямоугольных волноводов, соединенных узкими стенками, в которых возбуждены моды H_{10} с равными амплитудами и противоположными фазами. Затем прямоугольные сечения волновода плавно переходят в секторные с общим ребром. По мере увеличения угла секторных волноводов образуется круглый волновод с продольной металлической перегородкой. Обрыв этой перегородки не меняет структуру электромагнитного поля, и поэтому на выходе перехода имеем моду H_{01} в круглом волноводе. Для обеспечения требуемой чистоты возбуждения моды H_{01} этот возбудитель также должен иметь длину $L \gg \lambda$.

В работе [15] представлены результаты анализа и оптимизации возбудителя Марье [8] с использованием численных методов. Потери возбудителя длиной $L = 196.8$ мм в диапазоне 33...50 ГГц не превысили 0.2 дБ.

В работе [16] с использованием численных методов оптимизирована конструкция возбудителя H_{01} , содержащего переход от прямоугольного волновода в секторный и, затем, секторный в круглый, принцип построения которого описан в [5, 6]. Потери преобразователя длиной 171 мм в диапазоне частот 34...36 ГГц не превысили 0.15 дБ. Отметим, что в работе [17] описана аналитическая методика расчета коэффициентов возбуждения паразитных мод в секторном переходе от моды H_{10} прямоугольного волновода к моде H_{01} круглого волновода.

В работе [18] представлены результаты моделирования и измерений макета возбудителя Марье, изготовленного с использованием 3D-печати и спроектированного в соответствии с процедурой, описанной в работе [15]. Экспериментально подтвержденные потери возбудителя длиной 109 мм в диапазоне 67.5...87.6 ГГц – не более 1.5 дБ.

В работе [19] представлена еще одна конструкция, хотя и имеющая большие габариты, но относящаяся скорее к первой группе возбудителей H_{01} (см. выше). Круглый волновод возбуждается четырьмя прямоугольными волноводами через отверстия в стенке. Волноводы возбуждаются с одного входа с использованием трех делителей мощности. Из результатов моделирования следует, что потери возбудителя в полосе частот 5.8 ГГц и центральной частотой 34 ГГц не превышают 1 дБ.

Похожая конструкция возбудителя H_{01} описана в работе [20]. В полосе частот шириной 2 ГГц с центральной частотой 12 ГГц коэффициент отражения не превышает уровень –30 дБ, а коэффициент возбуждения высших мод не превышает уровень –50 дБ.

Недостатками описанных выше возбудителей в виде плавного перехода от волновода прямоугольного сечения в круглый волновод являются сложная конструкция, большие габариты и, как правило, достаточно большие потери.

Цель данной работы – расширение полосы частот, уменьшение длины и потерь на преобразование возбудителя моды H_{01} круглого металлического волновода.

1. КОНСТРУКЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗБУДИТЕЛЯ

Рассмотрим возбудитель, который состоит из трех частей (рис. 1а). Первая часть возбудителя (рис. 1б) представляет собой плавный переход одномодового прямоугольного волновода с входным сечением 7.2×3.4 мм², верхняя половина которого постепенно сужается по двум координатам, а нижняя – плавно переходит в два волновода треугольного и далее – секториального сечения, радиус

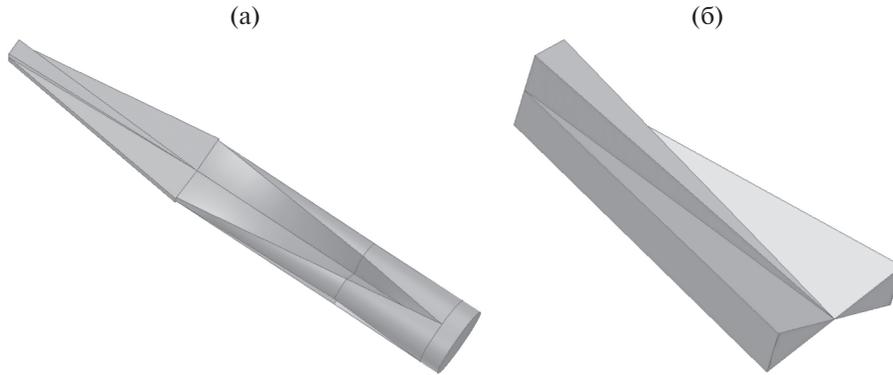


Рис. 1. Конструкция возбuditеля: общий вид (а) и первая часть (б).

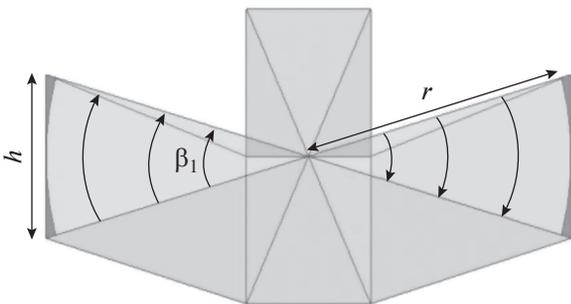


Рис. 2. Структура электрического поля на выходе первой части возбuditеля.

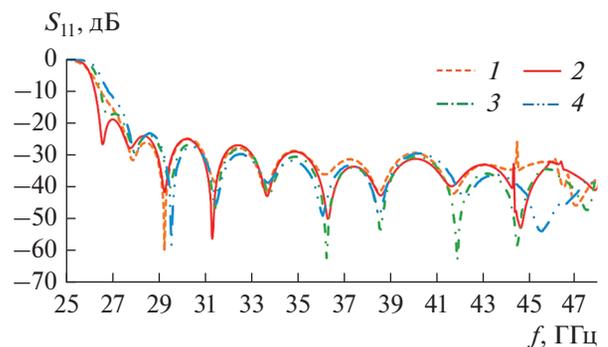


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от частоты при $h = 3$ (1), 4 (2), 5 (3) и 6 мм (4).

которого 7.2 мм, а угол раствора β_1 . На входе прямоугольного волновода возбуждается мода H_{10} , на выходе первой части формируется мода H_{01} секторного волновода (рис. 2).

Были рассчитаны с использованием метода конечных элементов зависимости от частоты коэффициента отражения на входе первой части возбuditеля длиной 42 мм для различных значений размера h , соответствующих различным углам раствора β_1 (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что максимальную ширину полосы по уровню отражения -20 дБ (27...47 ГГц) обеспечивает выбор значения $h = 4$ мм, соответствующее значение угла $\beta_1 = 31.5^\circ$. Длина перехода выбрана из условия обеспечения уровня коэффициента отражения моды $H_{01} < -20$ дБ в полосе частот 27...47 ГГц.

Также были рассчитаны коэффициенты возбуждения паразитных волн (рис. 4). Черными кружками на кривых здесь и далее отмечены соответствующие критические частоты.

Конструкция второй части возбuditеля (рис. 5а) состоит из четырех нерегулярных по уг-

лам поворота и разворота секторных волноводов (винтовых переходов) с начальным значением угла раствора $\beta_1/2$ и конечным $\beta_2 = 45^\circ$ того же радиуса r (рис. 5б). Выход второй части возбuditеля представляет собой крест из четырех 45-градусных секторных волноводов с синфазно возбужденными модами H_{01} (рис. 6).

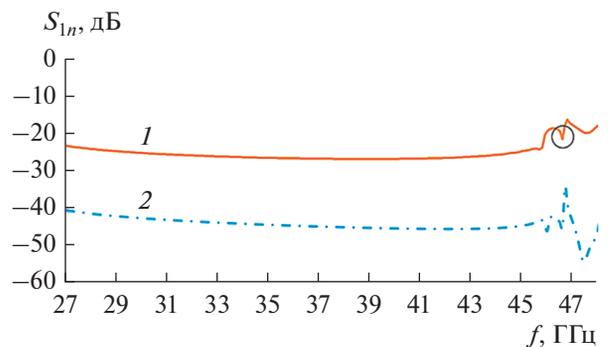


Рис. 4. Зависимость коэффициентов возбуждения (КВ) мод H_{02} (кривая 1) и H_{11} (кривая 2) первой части возбuditеля от частоты, кружком отмечена соответствующая критическая частота.

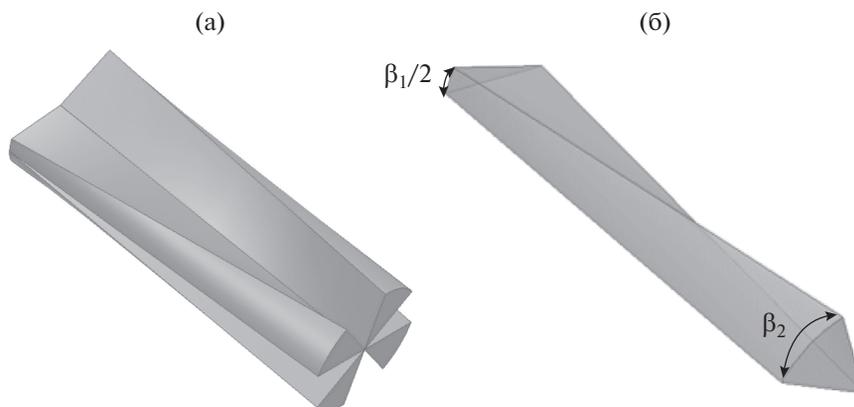


Рис. 5. Конструкция второй части возбуждителя: общий вид (а) и нерегулярный секторный волновод (б).

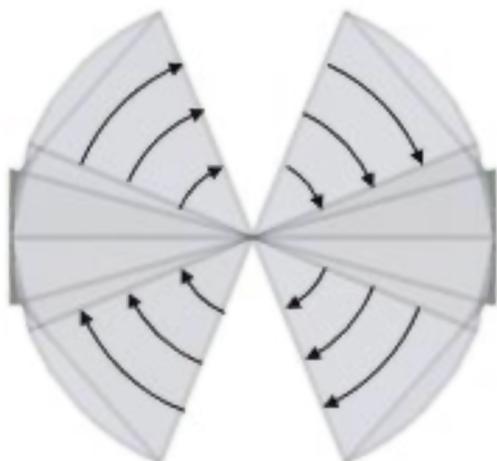


Рис. 6. Структура электрического поля на выходе второй части возбуждителя.

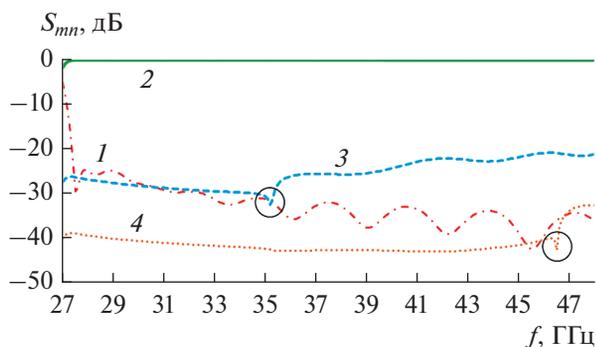


Рис. 7. Зависимость коэффициентов отражения (кривая 1) и возбуждения мод H_{01} (2), H_{11} (3) и H_{02} (4) второй части возбуждителя от частоты, кружочками отмечены соответствующие критические частоты.

Также методом конечных элементов были рассчитаны и представлены частотная зависимость коэффициента отражения (кривая 1) на входе нерегулярного секторного волновода длиной 36 мм и коэффициенты возбуждения мод H_{01} , H_{11} и H_{02} на его выходе (кривые 2–4 соответственно).

Длина перехода выбрана из условия обеспечения уровня коэффициентов отражения моды H_{01} и возбуждения паразитных мод менее -20 дБ в диапазоне частот 27.5...47 ГГц.

Конструкция третьей части возбуждителя содержит четыре симметричных секторных разворота (рис. 8а) от угла $\beta_2 = 45^\circ$ до угла $\beta_3 = 90^\circ$ с постоянной угловой скоростью, которые в конце образуют круглый волновод (рис. 8б).

Рассчитанные частотные зависимости коэффициентов отражения на входе и возбуждения моды H_{01} на выходе третьей части возбуждителя длиной 24 мм представлены на рис. 9 (кривые 1 и 2 соответственно). Там же показаны коэффициенты возбуждения паразитных мод на выходе возбуждителя (кривые 3, 4) (в каждом из секторных волноводов). Длина перехода выбрана из тех же условий, что и для второй части возбуждителя.

Далее с использованием электродинамического моделирования был проведен анализ возбуждителя длиной 102 мм, состоящего из трех оптимизированных выше частей, выполненных из латуни.

На рис. 10 приведены частотные зависимости коэффициента отражения на входе возбуждителя, рассчитанные с использованием методов конечных элементов и конечных разностей во временной области. Как видно из рисунка, в полосе частот 27.3...46.95 ГГц (относительная полоса частот 53%) коэффициент отражения не превышает уровень -15 дБ.

На рис. 11 в тех же обозначениях приведены частотные зависимости коэффициента возбуждения (передачи) моды H_{01} , также рассчитанные двумя

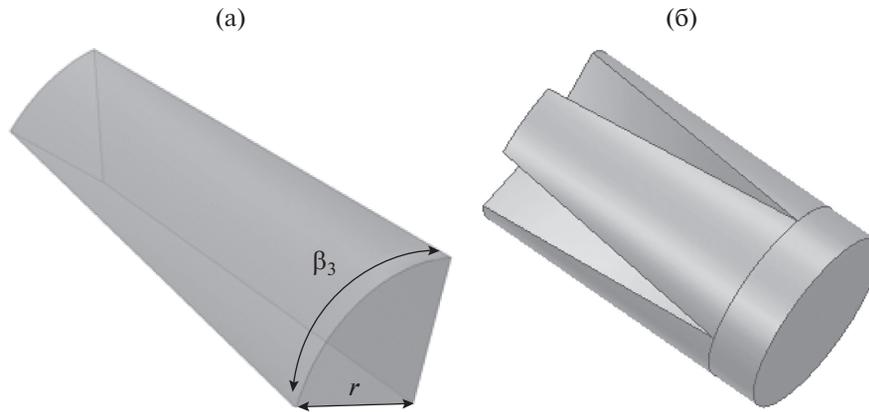


Рис. 8. Третья часть возбуждителя: один из четырех симметричных секторных разворотов (а) и круглый волновод (б).

методами. Видно, что в указанной выше полосе частот потери моды H_{01} менее 0.15 дБ.

На рис. 12 приведены частотные зависимости коэффициентов возбуждения паразитных мод на выходе возбуждителя, рассчитанные методом ко-

нечных элементов. Из рисунка видно, что уровень возбуждения паразитных волн не превышает -20 дБ.

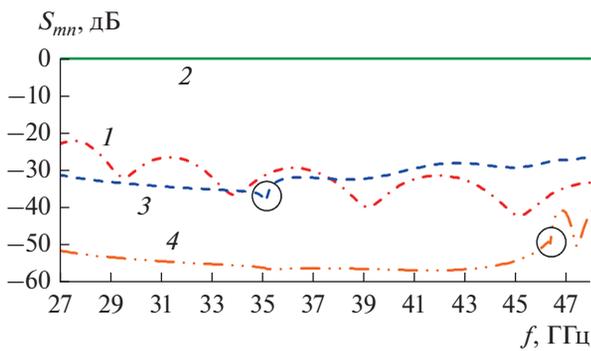


Рис. 9. Зависимости коэффициентов отражения на входе S_{11} (кривая 1) и возбуждения моды H_{01} на выходе (кривая 2), а также коэффициентов возбуждения паразитных мод H_{11} (3) и H_{02} (4) на выходе возбуждителя.

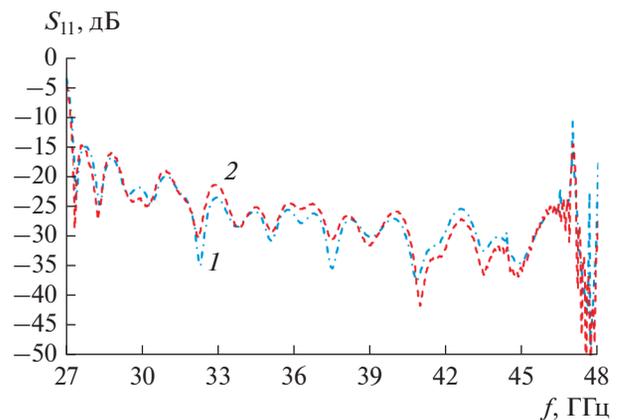


Рис. 10. Зависимости коэффициента отражения S_{11} на входе возбуждителя от частоты, рассчитанные с использованием методов конечных элементов (кривая 1) и конечных разностей во временной области (кривая 2).

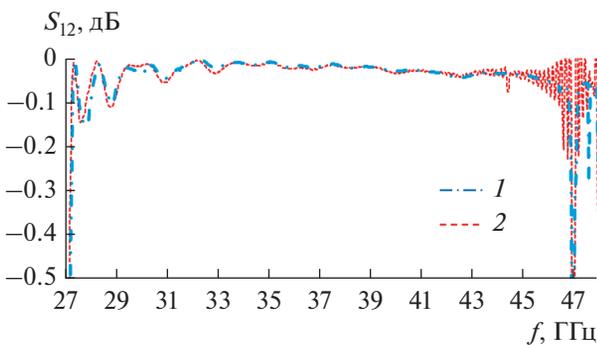


Рис. 11. Зависимости коэффициента возбуждения моды H_{01} от частоты, рассчитанные с использованием методов конечных элементов (кривая 1) и конечных разностей во временной области (кривая 2).

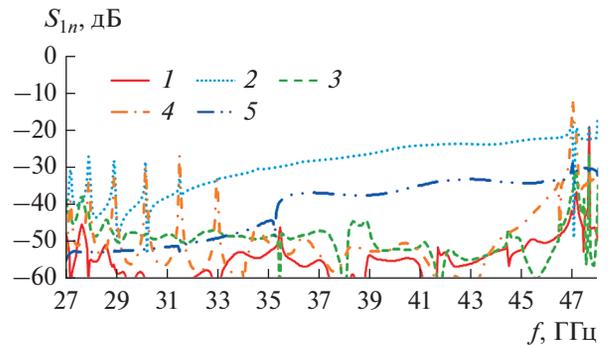


Рис. 12. Зависимости коэффициентов возбуждения паразитных мод на выходе возбуждителя от частоты, рассчитанные с использованием метода конечных элементов: H_{11} (1), H_{21} (2), E_{11} (3), E_{21} (4), H_{41} (5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная и исследованная конструкция возбуждителя моды H_{01} при относительно небольшой собственной длине (менее 10 длин волн на нижней частоте диапазона) обеспечивает сверхширокополосный режим работы при потерях менее 0.15 дБ, уровне коэффициента отражения ниже –15 дБ, а коэффициента возбуждения паразитных волн – ниже –20 дБ.

2. Достоверность полученных характеристик возбуждителя обеспечена проведением численного эксперимента с использованием двух апробированных методов электродинамического моделирования (конечных элементов и конечных разностей во временной области).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Летавин Д.А., Мительман Ю.Е.* // Матер. 24-й Международ. Крым. конф. СВЧ техника и телекоммун. технol. Севастополь: Вебер, 2014. Т. 2. С. 561.
2. *Малов Э.Э., Мительман Ю.Е.* // Матер. 24-й Международ. Крым. конф. СВЧ техника и телекоммун. технol. Севастополь: Вебер, 2014. Т. 2. С. 576.
3. *Oguchi B., Ymaguchi K.* // Proceedings of the IEE. 1959. V. 106. № 13S. P. 132.
4. *Shimada S.* Mode Transducers in the 50 Gc/s Region. Report of the Research Committee on Millimeter Waves in Japan. Japan: Corona, 1963. P. 62.
5. *Southworth G.C.* // Bell System Technical J. 1950. V. 29. № 3. P. 295.
6. *Исаенко Ю.М.* // РЭ. 1959. Т. 4. № 8. С. 1398.
7. *Enderby C.E.* Rectangular to circular waveguide transition. US Pat. № 3349346. Publ. 24 Oct. 1967.
8. *Marie P.* // L'onde électrique. 1957. № 2. P. 471.
9. *Gerdine M.A.* // Microwave J. 1970. V. 13. № 2. P. 73.
10. *Персиков М.В.* // РЭ. 1961. Т. 6. № 3. С. 446.
11. *Коган Н.Л., Машковцев Б.М., Цибизов К.Н.* Сложные волноводные системы. Л.: Судпромгиз, 1963. С. 328.
12. *Wolfert P.H.* // IEEE Trans. 1963. V. MTT-11. № 5. P. 430.
13. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. М.: Высш. школа, 1970. С. 98.
14. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. школа, 1988. С. 61.
15. *Saad S.S., Davies J.B., Davies O.J.* // IEE J. Microwaves, Optics and Acoustics. 1977. V. 1. № 2. P. 58.
16. *Qian-Zhong Xue, Shi-Chang Zhang, Pu-Kun Liu* // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2005. V. 26. № 10. P. 1407.
17. *Исаенко Ю.М.* // РЭ. 2009. Т. 54. № 1. С. 32.
18. *Del Mastro M., Del Pino M.A., Spirito M.* // 92 ARFTG Microwave Measurement Conf. 2019. USA. P. 1.
19. *Ching-Fang Yu, Tsun-Hsu Chang* // IEEE Trans. 2005. V. MTT-53. № 12. P. 3794.
20. *Montejo-Garai J.R., Saracho-Pantoja I.O., Ruiz-Cruz J.A., Rebollar J.M.* // Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC). Dec. 2016. New Delhi. P. 1.