

УДК 621.372.8

МОДОВЫЙ СОСТАВ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРОВ В ВИДЕ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ СЛАБОНЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Г. И. Заруднева, Ю. К. Калынов, С. А. Малыгин

Исследуются возможности уменьшения паразитного преобразования волн на нерегулярных участках открытого цилиндрического резонатора. Рассчитан относительный уровень мощности примесных волн на выходе резонатора с изменяющимся по синусоидальному закону радиусом. Показано, что улучшение чистоты излучения возможно путем оптимизации кривизны профиля выходного волноводного перехода.

В статье излагаются результаты расчетов модового состава излучения открытых резонаторов в виде аксиально-симметричных слабонерегулярных волноводов, показанных на рис. 1. Анализируются $H_{m,p,q}$ -колебания (m, p, q — азимутальный, радиальный и продольный индексы) с одним максимумом распределения высокочастотного поля вдоль оси симметрии z ($q=1$). На конкретном примере произведено сравнение эффективности преобразования волн в резонаторах с линейным (рис. 1а) и синусоидальным (рис. 1б) изменением радиуса. В последних проанализировано модовое содержание мощности в выходном волноводе ($z > z_4$) в зависимости от длин волноводных переходов. В отличие от волноводов, рассмотренных в [1,2], резонатор содержит критические сечения для многих волн, и эффекты их отражения являются существенными. Для расчетов использовался вариант метода поперечных сечений, описанный в [3].

1. Сравнение эффективности преобразования волн на нерегулярных участках резонаторов с коническими волноводными переходами (рис. 1а)

$$R(z) = \frac{R_{i+1} - R_i}{z_{i+1} - z_i} z + R_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (1)$$

и систем с плавным изменением радиуса перехода (рис. 1б)

$$R(z) = (R_{i+1} - R_i) \sin^2 \left[\frac{\pi}{2(z_{i+1} - z_i)} (z - z_i) \right] + R_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (2)$$

производилось на примере колебаний резонатора типа $H_{10,3,1}$. Обе резонансные структуры характеризовались одинаковыми параметрами волноводных переходов: $R_1 = 0,98 R_p$, $R_4 = 1,4 R_p$, $z_2 - z_1 = 4\lambda$, $z_4 - z_3 = 18\lambda$ (λ — длина волны в свободном пространстве). Протяженность регулярной части резонатора $L_p = z_3 - z_2$ соответствовала характерной длине локализации электромагнитного поля $L_n = 10\lambda$. Анализ модового состава мощности в выходном волноводе ($z > z_4$) производился в режиме вынужденных колебаний на резонансной частоте под действием идеализированных источников энергии, возбуждающих только волну $H_{10,3}$ и расположенных в регулярной области ($z_2 < z < z_3$). Для определения влияния каждого волноводного перехода ($z_1 < z < z_2$ и $z_3 < z < z_4$) на формирование модового спектра задача вынужденных колебаний решалась в трех вариантах. При этом преобразование волн учитывалось:

1) только на левом переходе ($z_1 < z < z_2$), 2) только на выходном переходе ($z_3 < z < z_4$), 3) во всей электродинамической системе ($z_1 < z < z_4$).

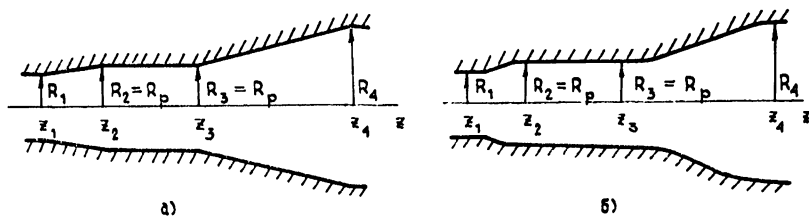


Рис. 1.

Результаты решения третьего варианта задачи в приближении связи девяти волн $H_{10,1}, E_{10,1}, H_{10,2}, E_{10,2}, H_{10,3}, E_{10,3}, H_{10,4}, E_{10,4}, H_{10,5}$ собраны в табл. 1, где приведены отношения мощностей отдельных волн в выходном волноводе $z > z_4$ к общей мощности, излучаемой вправо.

Таблица 1

Тип волны	$H_{10,1}$	$E_{10,1}$	$H_{10,2}$	$E_{10,2}$	$H_{10,3}$	$E_{10,3}$	$H_{10,4}$	$E_{10,4}$	$H_{10,5}$
Профиль резонатора (1)	0,0007	0,0003	0,0131	0,0008	0,973	0,001	0,01	0,0001	0,0005
(2)	0,00002	0,00001	0,003	0,0007	0,994	0,001	0,0011	0,00001	0,00001

Основная часть паразитной мощности содержится в ближайших по критической частоте H -волнах $H_{10,2}$ и $H_{10,4}$. Меньшая мощность переносится ближайшими волнами E -типа: $E_{10,2}$ и $E_{10,3}$. Вкладом остальных волн можно пренебречь и в дальнейшем анализировать модовый состав в пятиволновом приближении.

Представляют интерес величины мощностей примесей P_{j+} и P_{j-} (j — индекс нежелательной моды) в тех случаях, когда поля всех одноименных волн от разных волноводных переходов в выходном сечении $z = z_4$ складываются,

$$P_{j+} = (\sqrt{P_{1j}} + \sqrt{P_{2j}})^2, \quad (3)$$

или вычитаются,

$$P_{j-} = (\sqrt{P_{1j}} - \sqrt{P_{2j}})^2. \quad (4)$$

В (3), (4) P_{1j} и P_{2j} — мощности j -й паразитной волны, определенные при решении первой и второй задачи. Из (3), (4) можно получить ограничения уровня примесей сверху

$$P_+ = \sum_j P_{j+} \quad (5)$$

и снизу

$$P_- = \sum_j P_{j-}. \quad (6)$$

Значения максимально и минимально возможной мощности мешающих волн P_+ и P_- относительно общей выходной мощности $P_{0+} = P_+ + P_{H_{10,3}}$ и $P_{0-} = P_- + P_{H_{10,3}}$ в тех же системах приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип резонатора	P_+/P_{0+}	P_-/P_{0-}
(1)	0,031	0,025
(2)	0,006	0,004

Из данных табл. 1 и 2 видно, что мощности паразитных волн для резонатора плавного профиля в несколько раз ниже, чем для конического.

2. Ниже приводятся результаты расчетов модового содержания излучения резонаторов формы (2) с другими видами рабочих колебаний. Критические числа $\nu_{m,p}$, соответствующие видам колебаний $H_{m,p,1}$ и равные p -м нулям производной функции Бесселя 1-го рода m -го порядка ($J'_m(\nu_{m,p}) = 0$), выбирались вблизи значений 10, 20, 40. Около каждого из них анализировались несколько видов колебаний, одним из которых был тип с $m=1 \ll \nu_{m,p}$, а другие с $m \approx 0,5 \nu_{m,p}$ и с $p=2$. Так, в районе $\nu_{m,p} \approx 10$ рассматривались моды $H_{1,4,1}$ и $H_{5,2,1}$. Около $\nu_{m,p} \approx 20$ это были виды $H_{1,7,1}$, $H_{10,3,1}$, $H_{13,2,1}$, а вблизи $\nu_{m,p} \approx 40$ — $H_{1,13,1}$, $H_{20,5,1}$, $H_{31,2,1}$. Радиус выходного волновода не менялся и был равен $R_4 = 1,4R_p$.

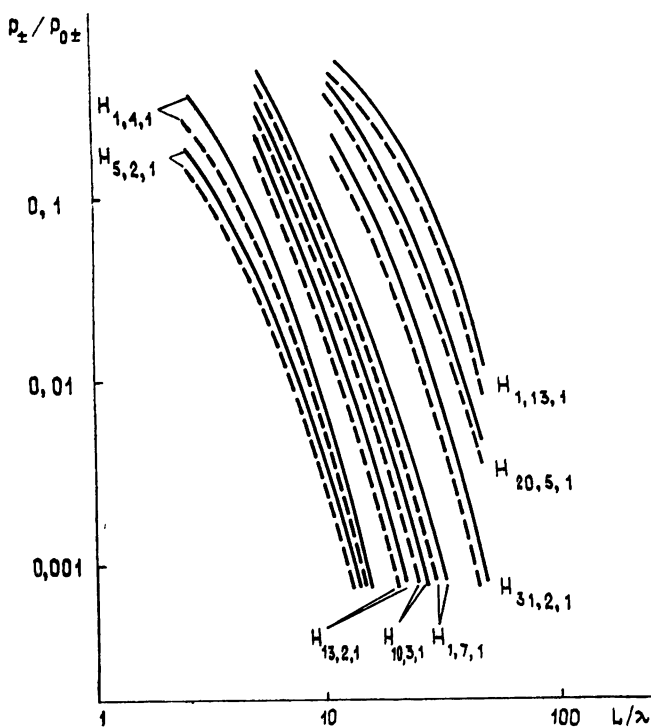


Рис. 2.

На рис. 2 изображены зависимости отношений P_+/P_{0+} (сплошные кривые) и P_-/P_{0-} (пунктирные кривые) максимально и минимально возможных суммарных мощностей паразитных волн к общей выходной мощности от длины $L = z_4 - z_3$ выходного волноводного перехода для всех перечисленных выше колебаний. Параметры левого волноводного перехода соответствовали одинаковой кривизне поверхности $R(z)$ вблизи обеих границ регулярной области. Характерная длина поля $L_\pi = 10\lambda$. Из графиков рис. 2 видно, что чистота излучения ухудшается с ростом $\nu_{m,p}$, а при фиксированном $\nu_{m,p}$ — с уменьшением m . Детальный анализ примесных составляющих выявил рост с увеличением m доли мощности, уносимой E -волнами, которая при $m \rightarrow \nu_{m,p}$ сравнима с мощностью паразитных H -волн.

3. Близость сплошных и пунктирных кривых на рис. 2 свидетельствует о преимущественном влиянии выходного волноводного перехода на формирование модового спектра излучаемой мощности. Процесс трансформации волн в этой области осуществляется в два этапа:

1) преобразование волны цилиндрического волновода радиуса R_p в набор конических волн в области увеличения угла между стенкой и продольной осью;

2) трансформация конических волн в совокупность волн цилиндрического выходного волновода.

Подробный анализ электромагнитного поля в выходном переходе показал, что в резонаторах плавного профиля на длине L_1 области увеличения угла наклона образующей происходит довольно чистое преобразование волны $H_{m,p}$ цилиндрического волновода в коническую волну того же вида. Основную же ответственность за загрязнение модового спектра несет область L_2 спрямления волновода. Следовательно, можно ожидать лучшей чистоты излучения, не прибегая к удлинению волноводных переходов, а путем увеличения L_2 за счет разумного сокращения длины L_1 .

Зависимость отношения мощности примесей P_{π} , образующихся в выходном волноводном переходе, к общей выходной мощности P_0 от величины L_1/L , изображенная на рис. 3, была рассчитана для колебаний $H_{20,5,1}$ в резонаторе, нерегулярные участки которого были образованы плавным сочленением дуг окружностей. Как и прежде, использовалась одинаковая кривизна профиля $R(z)$ по обе стороны от регулярного участка, $L_{\pi}=10\lambda$, $R_k=1,4R_p$. Сохранялось также расстояние от плоскости максимума электрического поля в резонаторе, близкой к середине регулярного участка, до начала выходного волновода $L+L_p/2=30\lambda$.

Согласно рис. 3 минимальный уровень примесей, появляющихся на выходном переходе, соответствует отношению $L_1/L=0,3$ и близок к 1%, в то время как конический аналог исследуемого резонатора характеризуется содержанием 16% примесей.

Результаты работы свидетельствуют о возможности достижения практически одномодового излучения исследуемых резонаторов. Анализ модового состава излучения резонатора, настроенного на тип колебаний $H_{m,p,q}$, с достаточной точностью можно производить методом плоских поперечных сечений в приближении связи пяти волн $H_{m,p-1}$, $E_{m,p-1}$, $H_{m,p}$, $E_{m,p}$, $H_{m,p+1}$. Чистота модового спектра излучения резонаторов с плавным изменением радиуса лучше, чем в случае кусочно-линейного профиля $R(z)$ при одинаковых длинах волноводных переходов. Уровень паразитной мощности увеличивается при переходе к высшим видам колебаний. Уменьшить этот рост можно, сглаживая поверхность системы за счет удлинения нерегулярных участков и оптимизируя кривизну профиля выходного волноводного перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мейерова Р. С., Попов А. В., Хозиоский С. А. — Радиотехника и электроника, 1985, 30, № 11, с. 2106.
2. Doane J. L. — Int. J. Infrared Millimeter Waves, 1984, 5, № 5, p. 737.
3. Цимринг Ш. Е., Павельев В. Г. — Радиотехника и электроника, 1982, 27, № 6, с. 1099.

Поступила в редакцию
11 апреля 1986 г.

RADIATION MODE COMPOSITION OF THE OPEN RESONATORS IN THE FORM OF AXIALLY SYMMETRIC WEAKLY IRREGULAR WAVEGUIDES

G. I. Zarudneva, Yu. K. Kalynov, S. A. Malygin

The reduction possibilities of the spurious wave conversion at the irregular sections of the open cylindrical resonator are examined. The relative power level of the extraneous waves at the resonator output with the radius changing according to the sinusoidal law is calculated. The radiation purity increase is shown to be possible due to the profile curvature optimization of the output waveguide transition.