

УДК 621.35.6

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ СОГЛАСОВАННОГО РУПОРНОГО ПЕРЕХОДА НА H_{01} РАБОЧЕЙ МОДЕ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА

А.А. КУРАЕВ, Т.Л. ПОПКОВА, С.И. ЯРОМЕНОК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 10 сентября 2004*

Предложены модели и методы расчета и оптимизации профиля нерегулярного рупорного перехода с рабочей модой H_{01} . Приведен пример оптимизации профиля короткого рупора длиной менее $2,5 \lambda$ и выходным радиусом волновода $b=3,37 b_{кр}$ с уровнем суммарной мощности паразитных мод менее 5 % от рабочей. Показано, что в линейном рупоре такой результат достигается только при длине более 10λ , т.е. в четыре раза большей.

Ключевые слова: рупорный переход, T -функции, оптимизация профиля.

Введение

Одной из важнейших проблем разработки мощных приборов СВЧ-гиротронов и релятивистских ЛБВ является расчет и оптимизация согласованного непреобразующего рупорного перехода в выходном устройстве, сопряженного со сверхразмерным выходным волноводом или со свободным пространством (в последнем случае рупор служит облучателем выходной параболической антенны системы). Такой рупорный переход должен обеспечивать при большом соотношении входного и выходного диаметров волновода как согласование на входе, так и минимальность мощности высших мод на выходе. Обычный линейный рупор, как известно из работ [1, 2] и показано в статье, при ограниченной длине такие требования обеспечить не может.

Теория произвольно-нерегулярных волноводов детально разработана в [3]. В ее основе лежит метод преобразования координат [4], который в сочетании с проекционным методом Глеркина позволяет свести исходную трехмерную краевую задачу к одномерной двухточечной задаче для амплитуд связанных мод нерегулярного волновода. Решение этой задачи традиционными методами не встречает затруднений, если рассматриваются только распространяющиеся волны. Для точного расчета рупорного перехода необходим учет и связанных с распространяющимися закритических волн, которые при расширении рупора также становятся распространяющимися. Однако для закритических волн численное решение граничной (двухточечной) задачи с использованием обычной процедуры типа Рунге-Кутта или Хемминга невозможно из-за их быстрой расходимости. Поэтому необходима разработка специальных методов и процедур.

В данной статье для расчета и оптимизации профиля рупорного перехода использован предложенный авторами метод, базирующийся на аппарате специальных дискретно определенных T -функций.

Рупорный переход на отрезке нерегулярного круглого волновода для H_{01} моды

Воспользуемся общей теорией нерегулярных волноводов, развитой в [3]. В рассматриваемом случае система дифференциальных уравнений для амплитуд связанных волн $H_{01}(\dot{A}_1), \dots, H_{0i}(\dot{A}_i)$ имеет вид (источники внутри отрезка волновода отсутствуют):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{A}_i}{dT^2} + \left(1 - \left(\frac{\mu_i}{\mu_1} \right)^2 \frac{1}{g^2} - \frac{1}{3} \mu_i^2 \left(\frac{1}{g} \frac{dg}{dT} \right)^2 \right) \dot{A}_i - \\ - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^I \left[\frac{1}{g} \frac{dg}{dT} \gamma_{ij}^{(4)} \frac{d\dot{A}_j}{dT} + \left[\left(\frac{1}{g} \frac{dg}{dT} \right)^2 \gamma_{ij}^{(5)} - \frac{1}{g} \frac{d^2 g}{dT^2} \gamma_{ij}^{(6)} \right] \dot{A}_j \right] = 0, \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $T = (2\pi/\lambda)z$, z — расстояние вдоль оси волновода, $0 \leq T \leq L_0$, λ — длина волны в свободном пространстве; $g(T) = b(z)/b_{1cr}$, $b(z)$ — радиус внутренней поверхности нерегулярного волновода, b_{1cr} — критический радиус для волны H_{01} , $b_{1cr} = \lambda\mu_1/2\pi$, μ_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) — корни производной функции Бесселя 1-го рода нулевого порядка ($J'_0(\mu_i) = 0$);

$$\gamma_{ij}^{(4)} = \frac{\mu_i \mu_j}{\mu_i^2 - \mu_j^2} \frac{2J_0(\mu_i)}{J_0(\mu_j)}, \quad \gamma_{ij}^{(5)} = \left[\frac{\mu_i \mu_j (\mu_i^2 + 3\mu_j^2)}{(\mu_i^2 - \mu_j^2)^2} \right] \cdot \frac{2J_0(\mu_i)}{J_0(\mu_j)}, \quad \gamma_{ij}^{(6)} = -\frac{\mu_i \mu_j}{\mu_i^2 - \mu_j^2} \frac{2J_0(\mu_i)}{J_0(\mu_j)}.$$

В случае, когда а) вход и выход отрезка нерегулярного волновода согласованы; б) на входе и выходе выполняются условия: $\frac{dg}{dT}(0) = \frac{dg}{dT}(L_0) = 0$; в) сигнал подается только с левого конца и только на волне H_{01} , граничные условия в системе (1) имеют вид [3]

$$\frac{d\dot{A}_i}{dT}(0) = j \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_i}{\mu_1} \right)^2} / g_0^2 \dot{A}_i(0), \quad \frac{d\dot{A}_i}{dT}(L_0) = -j \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_i}{\mu_1} \right)^2} / g_L^2 \dot{A}_i(L_0), \quad (2)$$

причем при $\left(\frac{\mu_i}{\mu_1} \right)^2 / g^2 > 1$ $\sqrt{1 - \left(\frac{\mu_i}{\mu_1} \right)^2} / g^2 = -j \sqrt{\left(\frac{\mu_i}{\mu_1} \right)^2 / g^2 - 1}$. Здесь $g_0 = g(0)$, $g_L = g(L_0)$.

Исходный профиль волновода зададим следующим образом:

$$g(T) = g_1 + \left[g_2 + \sum_{i=1}^{n_1} g_{vi} \sin^2 \left(\frac{iT}{L_0} \right) \right] \sin^2 \left[\left(\frac{T}{L_0} \right) \left(g_3 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_2} g_{pj} \right) \right]. \quad (3)$$

Далее представим $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_3, \dots, \dot{A}_I$ в виде разложения в ряды по T -функциям [5]:

$$\dot{A}_i(t_m) = \sum_{k=-N_1}^{N_2} c_{ik} t e_{Nk} \left(\frac{kt_m}{r} \right), \quad N = N_1 + N_2 + 1, \quad i = 1, 2, \dots \text{ (обычно } N_1 = N_2 \text{)}. \quad (4)$$

Здесь N — число точек на интервале $[0; L_0]$; $r = L_0 / L_N$, где L_N — период T -функций.

Подставляя (4) в (1) с учетом свойств T -функций (для всех точек t_m , исключая первую t_1 и последнюю t_N), переходим к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). В крайних точках (t_1 и t_N) используется уравнение (2), выражающее граничные условия задачи. После решения СЛАУ искомые распределения комплексных амплитуд волн $\dot{A}_1(t_m), \dots, \dot{A}_i(t_m)$ определяются по формулам (4).

Приведенная методика использована при оптимизации профиля рупорного перехода с рабочей волной H_{01} при заданном выходном радиусе: $b/b_{cr}=3,37$. При таком соотношении рупор практически согласован со свободным пространством на волне H_{01} . Длина перехода была ограничена: $\Delta T = 2\pi/\lambda\Delta z$ между регулярными частями — менее 15 ($\Delta z < 15\lambda/2\pi$).

На рис. 1,*a* изображен профиль рупора, на рис. 1,*б* — распределения относительных мощностей соответственно рабочей H_{01} моды (P_1), H_{02} (P_2) и H_{03} (P_3) мод. Всего в расчете учитывалось пять мод (H_{04} и H_{05} — закритические). Как видно из рис. 1,*б*, паразитные моды H_{02} и H_{03} имеют в сумме мощность менее 5 % от основной. Для сравнения на рис. 2 изображены аналогичные характеристики линейного рупора той же длины и с тем же расширением (рис. 2,*a*). Как видно из рис. 2,*б*, в таком рупоре уровень мощности паразитных мод недопустимо велик. Для достижения тех же результатов в линейном рупоре, как в приведенном нерегулярном, его длину необходимо увеличить более чем в четыре раза.

Таким образом, для сокращения габаритов рупорных переходов, как показано в статье, необходима оптимизация профиля таких переходов, которая может быть реализована на основании развитых в статье моделей и математического аппарата T -функций.

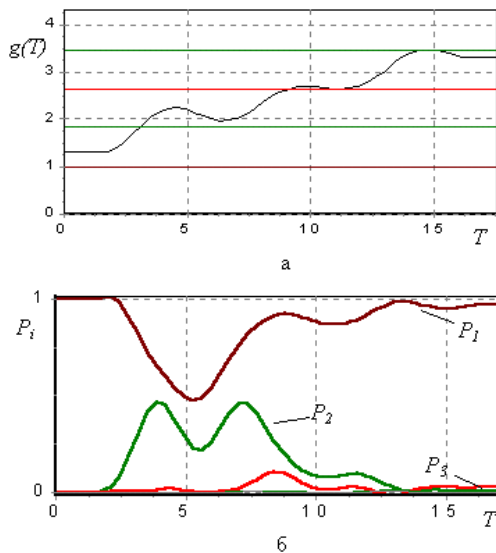


Рис. 1 Характеристики рупорного перехода с оптимизированным профилем: *a* — профиль рупора; *б* — распределение мощностей рабочей (P_1) и паразитных (P_2, P_3) мод

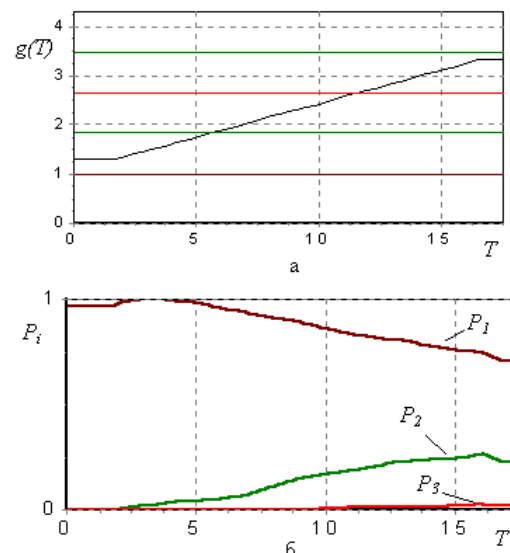


Рис. 2 Характеристики линейного рупора: *a* — профиль рупора; *б* — распределение мощностей рабочей (P_1) и паразитных (P_2, P_3) мод

Заключение

Приведенные в статье результаты указывают на эффективность предложенного метода расчета нерегулярных волноводов с учетом закритических мод. Отметим, что в статье не исследовались полосовые свойства полученной конфигурации рупорного перехода. Для решаемой задачи в этом нет необходимости: гиротроны работают на фиксированной частоте без модуляции сигнала.

COMPUTATION AND OPTIMIZATION OF THE MATCHING HORN JUNCTION SHAPE AT THE WORKING MODE TE_{01} IN CIRCULAR WAVEGUIDE

A.A. KURAYEV, T.L. POPKOVA, S.I. YAROMENOK

Abstract

Models and methods for computation and optimization of irregular horn junction shape at the working mode TE_{01} is given. The optimized shape example of the short horn is given, where horn length is less than $2,5 \lambda$, the output waveguide radius is $b=3,37 b_{cr}$ and the total level of spurious modes power is less than 5 % from working one. Such the results are obtainable in regular horn only at the length more than 10λ what is shown in the paper.

Литература

1. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. М., 1957.
2. *Вайнштейн Л.А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы. М., 1966.
3. *Кураев А.А.* Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров. М., 1986.
4. *Стрэттон Дж.А.* Теория электромагнетизма. М., Л., 1948.
5. *Кураев А.А., Луцицкая И.В., Попкова Т.Л., Яроменок С.И.* // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, №4. С. 49–52.