

**РАСЧЕТ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА,
СОДЕРЖАЩЕГО СТЕРЖЕНЬ ИЗ ДИЭЛЕКТРИКА
С ПОТЕРЯМИ**

В работе производится расчет резонатора прямоугольного поперечного сечения для колебаний основного типа (H_{101}) с диэлектрическим стержнем, расположенным параллельно силовым линиям электрического поля. В реальном случае такая конструкция используется, например, в устройстве для СВЧ нагрева ди-

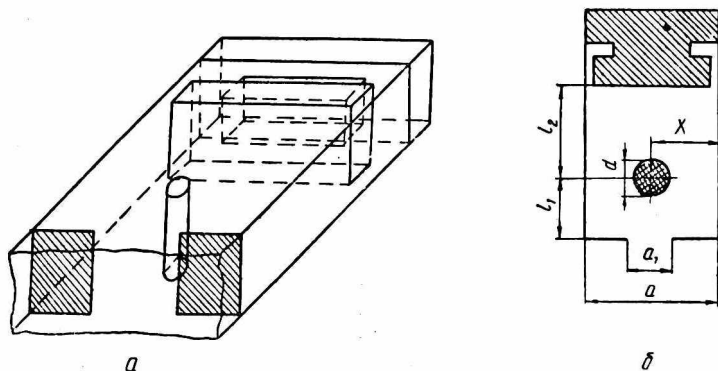


Рис. 1.

электриков. Диэлектрический стержень может быть однородным и слоистым, и в частном случае представляет собой диэлектрическую трубку с потоком жидкости. Для наиболее эффективной передачи СВЧ-мощности в обрабатываемый диэлектрик необходимо полное согласование резонатора с подводящим трактом. С этой целью между резонатором и волноводом ставится согласующая индуктивная диафрагма.

Взаимное расположение элементов рассматриваемой системы и их размеры ясны из рис. 1, а (аксонометрия) и 1, б (сечение резонатора горизонтальной плоскостью).

Будем решать задачу методом эквивалентных схем. Для упрощения предполагаем, что стенки резонатора идеально проводящие, а диафрагма бесконечно тонкая.

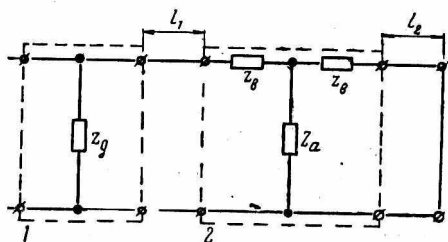


Рис. 2.

Эквивалентная схема резонатора со стержнем и диафрагмой показана на рис. 2, где I — диафрагма с сопротивлением Z_g , 2 — отрезок волновода со штырем, имеющим последовательное сопротивление $2Z_b$ и параллельное сопротивление Z_a . На входе и на выходе эти

элементы согласуются с сопротивлением волновода Z_0 .

Согласно [1], полные нормированные сопротивления

$$\frac{Z_b}{Z_0} \cong \frac{a}{8\Delta} \left(\frac{a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{\pi d}{a}\right)^4 \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \left[\epsilon_r'' \left(\frac{\alpha^2}{3} \epsilon_r' - \frac{\alpha^2}{2} + 1\right) + j \left(\epsilon_r' - 1 - \frac{\alpha^2}{6} (\epsilon_r'')^2 + \frac{\alpha^2}{6} (\epsilon_r' - 1) (\epsilon_r' - 2) \right) \right];$$

$$\frac{Z_a}{Z_0} \cong -\frac{Z_b}{2Z_0} + \frac{a}{2\Lambda} \operatorname{csc}^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \left\{ \frac{2\epsilon_r''}{\alpha^2 [(\epsilon_r' - 1)^2 + (\epsilon_r'')^2]} + \frac{2\epsilon_r''}{4 [(\epsilon_r' - 1)^2 + (\epsilon_r'')^2]} + j \left(\frac{(\epsilon_r' - 3)(\epsilon_r' - 1) + (\epsilon_r'')^2}{4 [(\epsilon_r' - 1)^2 + (\epsilon_r'')^2]} + S_0 - \frac{2(\epsilon_r' - 1)}{\alpha^2 [(\epsilon_r' - 1)^2 + (\epsilon_r'')^2]} \right) \right\};$$

где

$$S_0 = \ln \left[\frac{4a}{\pi d} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right] - 2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) + 2 \sum_{n=2}^{\infty} \sin^2\left(n \frac{\pi x}{a}\right) \times \left[\frac{1}{\sqrt{n^2 - \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2}} - \frac{1}{n} \right]; \quad \alpha = \frac{\pi d}{\lambda}; \quad \Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}};$$

λ — длина волны в свободном пространстве;
 ϵ_r' и ϵ_r'' — вещественная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости стержня.

Для решения задачи необходимо найти полное сопротивление резонатора в сечении диафрагмы.

Вначале определяется входное сопротивление волновода с волновым сопротивлением Z_0 и длиной l_2 , закороченного на

конце [2]:
$$Z_{\text{вх}2} = jZ_0 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2\right).$$

Трансформируем его с учетом сопротивления диафрагмы и диэлектрического штыря в сечение диафрагмы и приравняем волновому сопротивлению Z_0 (случай полного согласования). Разрешая полученное выражение относительно нормированного сопротивления диафрагмы, имеем

$$\begin{aligned} \frac{Z_g}{Z_0} = & \left\{ 2 \frac{Z_a Z_b}{Z_0 Z_0} + \left(\frac{Z_b}{Z_0} \right)^2 - \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_1 \right) \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) + j \left(\frac{Z_a}{Z_0} + \frac{Z_b}{Z_0} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_1 \right) + \right. \\ & \left. + j \left(\frac{Z_a}{Z_0} + \frac{Z_b}{Z_0} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) \right\} : \left\{ 2 \frac{Z_a Z_b}{Z_0 Z_0} + \left(\frac{Z_b}{Z_0} \right)^2 + \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_1 \right) \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) \times \right. \\ & \times \left(\frac{Z_a}{Z_0} + \frac{Z_b}{Z_0} - 1 \right) - \left(\frac{Z_a}{Z_0} + \frac{Z_b}{Z_0} \right) + j \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) \left(\frac{Z_a}{Z_0} + \frac{Z_b}{Z_0} - 1 \right) + \\ & \left. + j \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_1 \right) \left[\left(\frac{Z_a}{Z_0} + \frac{Z_b}{Z_0} \right) - 2 \frac{Z_a Z_b}{Z_0 Z_0} - \left(\frac{Z_a}{Z_0} \right)^2 \right] \right\}. \end{aligned}$$

Выделим в этом выражении вещественную и мнимую части:

$$\frac{Z_g}{Z_0} = \frac{m + jn}{q + jp} = \frac{(mq + np) + j(nq - mp)}{q^2 + p^2}; \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} m = & 2ge + g^2 - k^2 - 2kz - (k + z) \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) - \\ & - \left[z + k + \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) \right] \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_1 \right); \end{aligned}$$

$$n = 2gz + 2ke + 2gk + (e + g) \left[\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) + \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_1 \right) \right];$$

$$q = m - (e + g) + \left[2gz + 2kl + 2gk + (e + g) \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) \right] \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_1 \right);$$

$$\begin{aligned} p = & n - \left[z + k + \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) \right] - \left[2qe - 2kz + g^2 - k^2 - (k + z) \operatorname{tg} \times \right. \\ & \times \left. \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_2 \right) \right] \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} l_1 \right); \quad g = \frac{a}{8\Lambda} \frac{a^2}{6} \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{\pi d}{a} \right)^4 \varepsilon_r' \left(2\varepsilon_r' + \frac{6}{a^2} - 3 \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x}{a} \right); \end{aligned}$$

$$k = \frac{a}{8\Lambda} \frac{a^2}{6} \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{\pi d}{a} \right)^4 \left[(\varepsilon_r'')^2 - (\varepsilon_r')^2 + \varepsilon_r' \left(\frac{6}{a^2} - 3 \right) - \frac{6}{a^2} + 2 \right] \sin^2 \left(\frac{\pi x}{a} \right);$$

$$e = -\frac{1}{2} g + \frac{\varepsilon_r'' a \left(1 - \frac{a^2}{4} \right)}{a^2 \Lambda \left[(\varepsilon_r' - 1)^2 + (\varepsilon_r'')^2 \right]} \operatorname{csc}^2 \left(\frac{\pi x}{a} \right);$$

$$\begin{aligned} z = & -\frac{1}{2} k + \frac{a \operatorname{csc}^2 \left(\frac{\pi x}{a} \right)}{2a^2 \Lambda \left[(\varepsilon_r' - 1)^2 + (\varepsilon_r'')^2 \right]} \left\{ (\varepsilon_r'')^2 a^2 \left(S_0 + \frac{1}{4} \right) - \right. \\ & \left. - (\varepsilon_r' - 1) \left[2 - S_0 a^2 (\varepsilon_r' - 1) - \frac{a^2}{4} (\varepsilon_r' - 3) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Учитывая, что для индуктивной диафрагмы $\frac{Z_g}{Z_0} = 0 + j \frac{X_g}{Z_0}$,
 (при фиксированном значении l_1):

$$mq + np = 0;$$

$$\frac{nq - mp}{q^2 + p^2} = \frac{X_g}{Z_0}.$$

При численном решении данной системы уравнений на ЭВМ для фиксированных значений $\frac{d}{a}$; $\frac{\lambda}{a}$; $\frac{x}{a}$; $\frac{l_1}{a}$; ϵ'_r и ϵ''_r из первого уравнения находилось резонансное положение поршня $\frac{l_2}{a}$ (рис. 1, б). Подставляя найденное отсюда значение $\frac{l_2}{a}$ во второе уравнение, определялась проводимость диафрагмы $\tilde{B}_g = \frac{Z_0}{X_g}$, которая обеспечивает критическую связь резонатора с трактом. Оптимальный размер диафрагмы выбирался по графику, приведенному в [3] для параметра B_0 , где величина B_0 связана с полной проводимостью диафрагмы \tilde{B}_g соотношением

$$\tilde{B}_g = \frac{B_0}{\sqrt{\left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 - 1}}.$$

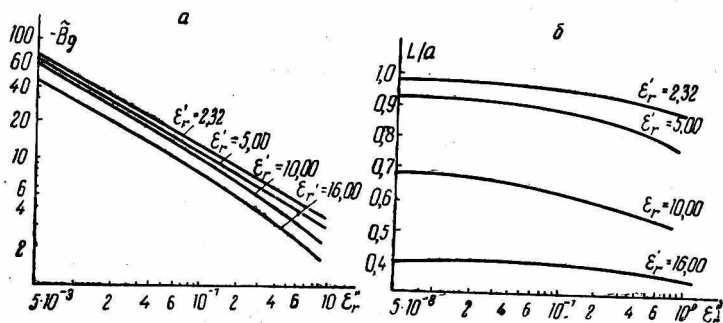


Рис. 3.

Ввиду большого числа параметров $\left(\frac{d}{a}; \frac{x}{a}; \frac{l_1}{a}; \frac{\lambda}{a}; \epsilon'_r; \epsilon''_r \text{ и т. д.}\right)$, расчеты были выполнены только для случая $\frac{x}{a} = 0,5$ (стержень в центре волновода); $\frac{a}{\lambda} = 0,7$; $\frac{d}{a} = 0,11$; $\frac{l_1}{a} = 0,22$; $\epsilon'_r = 2,32; 5,00; 10,00; 16,00$. Для каждого значения ϵ'_r величина ϵ''_r пробегала значения 0,001; 0,003; 0,010; 0,014; 0,024; 0,050; 0,073; 0,107; 1,000.

Результаты теоретического анализа представлены в виде графиков. Зависимости нормированной проводимости диафрагмы \tilde{B}_g , обеспечивающей критическую связь, и общей длины резонатора $L = l_1 + l_2$, нормированной по отношению к размеру широкой стенки волновода, от величины ϵ'_r при фиксированных ϵ''_r и указанных выше значениях геометрических размеров показаны на рис. 3.

Экспериментально изготовленный в соответствии с расчетом резонатор испытывался в лабораторной установке для обработки диэлектриков энергией СВЧ. Это испытание ставило целью проверку результатов расчета, а также исследование влияния отклонения размера диафрагмы от оптимального на режим работы волноводного тракта. Измерения велись по стандартной методике с применением серийной аппаратуры на частоте $f = 2344$ МГц. Резонатор был изготовлен из волновода сечения 90×45 мм². Как следует из приводимой таблицы, данные расчета и эксперимента находятся в хорошем соответствии (расхождение не более 2%).

Чтобы оценить влияние отклонения размеров диафрагмы от оптимального снималась зависимость КСВН в тракте от величины $\frac{a'}{a'_{\text{опт}}}$ при изменении последней в пределах 0,7—1,4. График этой зависимости имел вид параболы, причем на краях указанного диапазона изменений $\frac{a'}{a'_{\text{опт}}}$ КСВН, например для диэлектрика № 1, равен трем.

Величина сравнения	Диэлектрик № 1		Диэлектрик № 2	
	$\epsilon'_r = 2,87$	$\epsilon'_r = 0,08$	$\epsilon''_r = 2,68$	$\epsilon''_r = 0,008$
	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент
$a'_{\text{опт}}$ мм	22,05	22,00	13,05	13,00
$L_{\text{опт}}$ мм	85,6	84,6	87,5	87,0

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по волноводам. Под ред. Я. Н. Фельда. М., «Советское радио», 1952. 431 с.
2. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. I. М., «Высшая школа», 1971. 439 с.
3. Саусворт Дж. К. Принципы и применения волноводной передачи. М., «Советское радио», 1955. 670 с.