

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

А. И. Терещенко

Выпускаемые промышленностью металлические трубы, идущие на изготовление волноводных деталей, имеют установленные стандартом размеры, при выборе которых учтены многие факторы: тип и длина распространяющейся электромагнитной волны, затухание, ширина рабочей полосы, пробивная мощность. Таким образом обеспечивается нормальная работа волноводов при выполнении ими основного назначения — использования в качестве линий передачи.

На практике встречаются и отступления от стандарта. Например, в приемных устройствах малой мощности применяется уменьшение, а в трактах для передачи больших мощностей — увеличение высоты волновода. Изменение сечения волновода имеет смысл также при изготовлении ряда волноводных деталей и узлов, где это связано со спецификой условий работы. Однако конструкторы предпочитают использовать трубы стандартных размеров. Это объясняется, с одной стороны, желанием максимально упростить и удешевить процесс производства, а с другой стороны — недостаточно четкими представлениями о влиянии граничных поверхностей* на характеристики тех или иных СВЧ-устройств. Ввиду этого далеко не всегда принимаются меры по достижению оптимальных параметров и выбору наиболее рациональной конструкции деталей и узлов.

Исключительно важная проблема синтеза сверхвысокочастотных устройств с заданными параметрами не только далека от решения, но даже недостаточно четко сформулирована. В настоящее время происходит накопление фактического материала, обобщение и анализ которого позволит сделать некоторые общие выводы и впоследствии перейти к синтезу. В качестве примера назовем нашу работу [1], где рассматривается влияние формы и размеров поперечного сечения на дисперсионные свойства волноводов вблизи критической частоты и даются некоторые рекомендации. В более общей постановке (для волноводов произвольной формы поперечного сечения, при изменении сечения вдоль системы, на произвольном типе волн, с рассмотрением физической картины происходящих процессов и т. д.) подобные вопросы, насколько нам известно, не исследовались, хотя это можно было бы сделать, используя материалы многочисленных теоретических и экспериментальных работ по волноводам.

* Здесь речь идет как о геометрической форме металлической поверхности, так и о соотношении размеров между собой и с длиной рабочей волны.

Все сказанное относительно волноводов в равной, если не в большей, степени касается волноводных объемных резонаторов. Обычно их изготовляют из тех же металлических труб, что и волноводы, совершенно не учитывая различия в характере электромагнитного поля и в условиях работы. Это отрицательно сказывается даже на характеристиках резонаторов с фиксированной геометрией и рабочей частотой, не говоря уже о системах с перестройкой путем изменения размеров или параметров заполняющей среды. Поскольку отличие характеристик от оптимальных может быть весьма значительным, необходимо произвести соответствующие исследования, которые дали бы основания для рационального выбора геометрии объемных резонаторов.

Прямоугольный объемный резонатор, перестраиваемый изменением одного из размеров (смещением стенки), исследован нами в работе [2]. На основании общих формул были рассчитаны и построены графически зависимости относительного изменения частоты $\frac{f-f_0}{f_0}$ и добротности $\frac{Q-Q_0}{Q_0}$ для колебаний типа H_{101} от изменения $\lambda/2a$ (где λ — собственная длина волны, a — изменяющийся размер резонатора в плоскости, параллельной магнитным силовым линиям). Пределы и крутизна изменения частоты и добротности существенно зависят от начального соотношения размеров резонатора, выбранного в качестве параметра для семейства кривых. Приведенные в работе данные могут быть использованы при конструировании резонаторов, к которым предъявляются требования максимальной или минимальной крутизны перестройки, достижения максимального диапазона перестройки при заданных пределах изменения добротности и т. п.

Ниже приводятся результаты более полного исследования влияния геометрии на характеристики объемных резонаторов. Рассматриваются прямоугольные и цилиндрические волноводные резонаторы, имеющие наибольшее практическое значение.

Рассмотрим прямоугольный резонатор с размерами a , b и c (стенки обладают идеальной проводимостью), заполненный средой с параметрами $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = \varepsilon_0$. Внутри такого объемного резонатора могут существовать электромагнитные колебания.

Для произвольного типа колебаний H_{mnl} (и E_{mnl}) собственная частота связана с размерами резонатора соотношением

$$f = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{c} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Здесь m , n и l — число вариаций поля вдоль a , b и c соответственно.

В наиболее общем случае изменение геометрии прямоугольного объемного резонатора может производиться одновременным изменением всех его линейных размеров. Если положить, что

$$\frac{\Delta a}{a_0} = n_a, \quad \frac{\Delta b}{b_0} = n_b, \quad \frac{\Delta c}{c_0} = n_c, \quad (2)$$

где нулевой индекс обозначает начальные размеры, то относительное изменение частоты выразится формулой

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f-f_0}{f_0} = \frac{1}{1+n_a} \left[\frac{1 + (N_{mn} \cdot m_b)^2 + (N_{ml} \cdot m_c)^2}{1 + N_{mn}^2 + N_{ml}^2} \right]^{\frac{1}{2}} - 1, \quad (3)$$

где введена следующая система обозначений:

$$\frac{b_0}{a_0} = p_b; \quad \frac{c_0}{a_0} = p_c; \quad (4)$$

$$n_b = s_b \cdot n_a; \quad n_c = s_c n_a; \quad (5)$$

$$\frac{1+n_a}{1+n_b} = \frac{1+n_a}{1+s_b n_a} = m_b; \quad \frac{1+n_a}{1+n_c} = \frac{1+n_a}{1+s_c n_a} = m_c; \quad (6)$$

$$\frac{n}{m} \cdot \frac{1}{p_b} = N_{mn}; \quad \frac{l}{m} \cdot \frac{1}{p_c} = N_{ml}. \quad (7)$$

При этом n_a , n_b и n_c в принципе могут изменяться в таких пределах:

$$-1 < n_a < \infty; \quad 1 < n_b < \infty; \quad -1 < n_c < \infty.$$

С точки зрения перестройки изменением всех трех размеров единственный физически реализуемый случай — это тепловое расширение (или сжатие), при котором $n_a = n_b = n_c$. Но перестройку можно понимать и в более широком смысле как изменение частоты при переходе от одного соотношения размеров резонатора к другому. Тогда формула (3) приобретает дополнительное практическое значение.

Из общей формулы (3) можно получить выражения для изменения частоты при изменении двух или одного размера резонатора.

Запишем выражения, определяющие изменение частоты прямоугольного объемного резонатора при колебаниях типа H_{101} , представляющих наибольший практический интерес. При изменении всех трех линейных размеров a , b и c

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{1+n_a} \left[\frac{1+(N_{11} \cdot m_c)^2}{1+N_{11}^2} \right]^{\frac{1}{2}} - 1, \quad (8)$$

где все входящие в формулу величины определяются соотношениями (2) и (4)—(7). Как видно из (8), величина перестройки по частоте в этом случае не зависит от p_b и p_c , так что, фактически, перестройка определяется изменением двух размеров — a и c .

Изменение одного размера рассмотрено в упомянутой ранее работе [2].

Учет конечной проводимости материала стенок мало скажется на частоте, но сильно повлияет на распределение энергии, т. е. на добротность резонатора $Q = \frac{\omega W}{P}$ (здесь $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, W — энергия, запасенная в объеме, P — мощность потерь в стенках).

Общее выражение для добротности прямоугольного объемного резонатора при колебаниях типа H_{mnl}

$$Q = \frac{\pi}{4R_s} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \frac{abc \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \left(\frac{m^2}{a^2} - \frac{n^2}{b^2} - \frac{l^2}{c^2} \right)^{3/2}}{\left[c(a+b) \left(\frac{m^2}{a^2} - \frac{n^2}{b^2} \right)^2 + b(a+c) \frac{n^2 l^2}{b^2 c^2} + a(b+c) \frac{m^2 l^2}{a^2 c^2} \right]} \quad (9a)$$

при $m \neq 0$, $n \neq 0$ и

$$Q = \frac{\pi}{2R_s} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \frac{abc \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right)^{3/2}}{\left[c(a+2b) \frac{m^2}{a^2} + a(c+2b) \frac{l^2}{c^2} \right]} \quad (9b)$$

при $m \neq 0$, $n = 0$,

а при колебаниях типа E_{mnl}

$$Q = \frac{\pi}{4R_s} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \frac{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right)^{1/2} abc \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)}{\left[b(a+c) \frac{m^2}{a^2} + a(b+c) \frac{n^2}{b^2} \right]} \quad (10a)$$

при $l \neq 0$ и

$$Q = \frac{\pi}{2R_s} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \frac{abc \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^{3/2}}{\left[b(a+2c) \frac{m^2}{a^2} + a(b+2c) \frac{n^2}{b^2} \right]} \quad (10b)$$

при $l = 0$.

Здесь поверхностное сопротивление $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}$, где μ и σ — магнитная проницаемость и проводимость материала стенок.

Введя приращения размеров согласно (2) и учитывая соотношения (4)—(7), путем несложных выкладок можно получить формулы для изменения добротности при колебаниях типа H_{mnl} :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{Q - Q_0}{Q_0} &= \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_b \cdot m_c} \cdot \left[\frac{1 + (N_{mn} \cdot m_b)^2 + (N_{ml} \cdot m_c)^2}{1 + N_{mn}^2 + N_{ml}^2} \right]^{\frac{3}{2}} \times \\ &\times \left[\frac{\rho_c (1 + \rho_b) (1 + N_{mn}^2)^2 + \rho_b (1 + \rho_c) N_{mn}^2 N_{ml}^2 + (\rho_b + \rho_c) N_{ml}^2}{\frac{\rho_c}{m_c} \left(1 + \frac{\rho_b}{m_b} \right) \left[1 + (N_{mn} \cdot m_b)^2 \right]^2 + \frac{\rho_b}{m_b} \left(1 + \frac{\rho_c}{m_c} \right) (N_{mn} \cdot m_b)^2 (N_{ml} \cdot m_c)^2 + \right.} \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(\frac{\rho_b}{m_b} + \frac{\rho_c}{m_c} \right) (N_{ml} \cdot m_c)^2 \right] \right] \times \\ &\times \left[\frac{1 + (N_{mn} \cdot m_b)^2}{1 + N_{mn}^2} \right] - 1 \quad \text{при } m \neq 0, n \neq 0 \text{ и} \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{Q_0} &= \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_b \cdot m_c} \cdot \left[\frac{1 + (N_{ml} \cdot m_c)^2}{1 + N_{ml}^2} \right]^{\frac{3}{2}} \times \\ &\times \left[\frac{\rho_c (1 + 2\rho_b) + (\rho_c + 2\rho_b) N_{ml}^2}{\frac{\rho_c}{m_c} \left(1 + 2 \frac{\rho_b}{m_b} \right) + \left(\frac{\rho_c}{m_c} + 2 \frac{\rho_b}{m_b} \right) (N_{ml} \cdot m_c)^2} \right] - 1 \end{aligned} \quad (11b)$$

при $m \neq 0, n \neq 0$,

а при колебаниях типа E_{mnl} :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{Q_0} &= \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_b \cdot m_c} \cdot \left[\frac{1 + (N_{mn} \cdot m_b)^2 + (N_{ml} \cdot m_c)^2}{1 + N_{mn}^2 + N_{ml}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \times \\ &\times \left[\frac{1 + (N_{mn} \cdot m_b)^2}{1 + N_{mn}^2} \right] \cdot \left[\frac{\rho_b (1 + \rho_c) + (\rho_b + \rho_c) N_{mn}^2}{\frac{\rho_b}{m_b} \left(1 + \frac{\rho_c}{m_c} \right) + \left(\frac{\rho_b}{m_b} + \frac{\rho_c}{m_c} \right) (N_{mn} \cdot m_b)^2} \right] - 1 \end{aligned} \quad (12a)$$

при $l \neq 0$ и

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_b \cdot m_c} \cdot \left[\frac{1 + (N_{mn} \cdot m_b)^2}{1 + N_{mn}^2} \right]^{\frac{3}{2}} \times \\ \times \left[\frac{\rho_b (1 + 2\rho_c) + (\rho_b + 2\rho_c) N_{mn}^2}{\frac{\rho_b}{m_b} \left(1 + 2 \frac{\rho_c}{m_c} \right) + \left(\frac{\rho_b}{m_b} + 2 \frac{\rho_c}{m_c} \right) (N_{mn} \cdot m_b)^2} \right] - 1 \quad (126)$$

при $l = 0$.

В соответствии с изложенными выше соображениями по тепловой перестройке прямоугольного объемного резонатора можно записать:

$$n_a = n_b = n_c = \alpha (t - t_0), \quad (13)$$

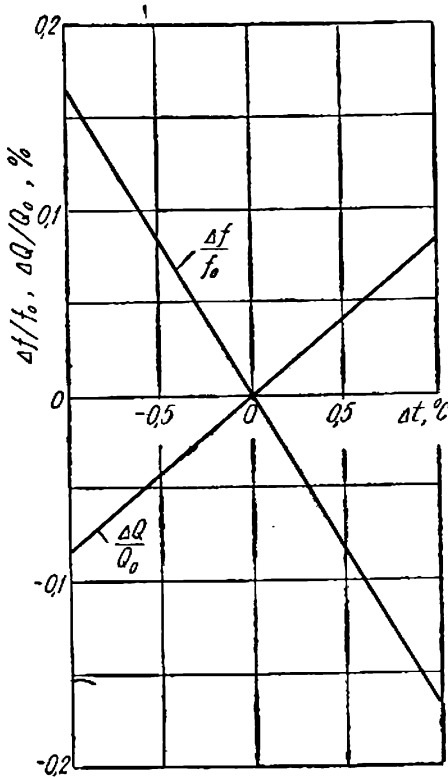


Рис. 1.

ков. Рисунок 1 иллюстрирует изменение частоты и добротности при тепловом изменении размеров резонатора из меди. Для меди $\alpha \cong \cong 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град.}$

На рис. 2 показан случай изменения двух размеров резонатора для колебаний типа H_{101} при различных начальных соотношениях и скоростях изменения размеров. Очевидно, что, изменяя начальные соотношения и скорости изменения размеров, удастся в широких пределах варьировать крутизну и диапазон изменения f и Q прямоугольного объемного резонатора, причем величина перестройки в данном случае

где α — коэффициент линейного расширения материала стенок;

$t - t_0 = \Delta t$ — разность температур между интересующим и начальным моментами перестройки резонатора.

Учитывая соотношение (13), из (6) получаем: $m_b = m_c = 1$, в силу чего формула (3) с учетом малости величины α запишется в виде

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\alpha (t - t_0), \quad (14)$$

а формулы (11) и (12) — в виде

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{\alpha}{2} (t - t_0). \quad (15)$$

Из выражений (14) и (15) видно, что с увеличением температуры частота колебаний прямоугольного объемного резонатора уменьшается, а добротность увеличивается. В данном случае отсутствует зависимость от начального соотношения размеров резонатора и типа колебаний.

Приведенные математические соотношения для наглядности целесообразно представить в виде графиков.

может быть получена большей, чем в случае изменения одного размера резонатора.

Перейдем к рассмотрению колебаний в цилиндрическом объемном резонаторе, имеющем радиус R и длину L . Собственная частота для произвольного типа колебаний H_{mnl}

$$f = \left\{ \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \left[\left(\frac{l}{2L} \right)^2 + \left(\frac{\beta_{mn}}{2\pi R} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (16)$$

где m, n и l — количество вариаций поля вдоль азимутального угла, радиуса и длины резонатора соответственно; β_{mn} — n -й корень уравнения $\frac{d}{dx} I_m(x) = 0$ (здесь $I_m(x)$ — функция Бесселя первого рода m -го порядка).

Для колебаний типа E_{mnl}

$$f = \left\{ \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \left[\left(\frac{l}{2L} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{mn}}{2\pi R} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (17)$$

где α_{mn} — n -й корень уравнения $I_m(x) = 0$.

Введем относительные приращения размеров:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = n_R, \quad \frac{\Delta L}{L_0} = n_L. \quad (18)$$

Их изменения возможны в следующих пределах:

$$-1 < n_R < \infty, \quad -1 < n_L < \infty.$$

Теперь, аналогично случаю прямоугольного объемного резонатора, можно записать общие формулы для одновременного изменения радиуса и длины резонатора:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{1+n_R} \left[\frac{1+(N_{mnl} \cdot m_L)^2}{1+N_{mnl}^2} \right]^{1/2} - 1 \quad (19)$$

при колебаниях типа H_{mnl} и

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{1+n_R} \left[\frac{1+(M_{mnl} \cdot m_L)^2}{1+M_{mnl}^2} \right]^{1/2} - 1 \quad (20)$$

при колебаниях типа E_{mnl} .

Здесь введена следующая система обозначений:

$$\frac{L_0}{R_0} = p; \quad (21)$$

$$n_L = s_L \cdot n_R \quad \text{или} \quad n_R = s_R \cdot n_L; \quad (22)$$

$$\frac{1+n_R}{1+n_L} = \frac{1+n_R}{1+s_L \cdot n_R} = \frac{1+s_R \cdot n_L}{1+n_L} = m_L; \quad (23)$$

$$\frac{\pi l}{\beta_{mn}} \cdot \frac{1}{p} = N_{mnl}; \quad \frac{\pi l}{\alpha_{mn}} \cdot \frac{1}{p} = M_{mnl}. \quad (24)$$

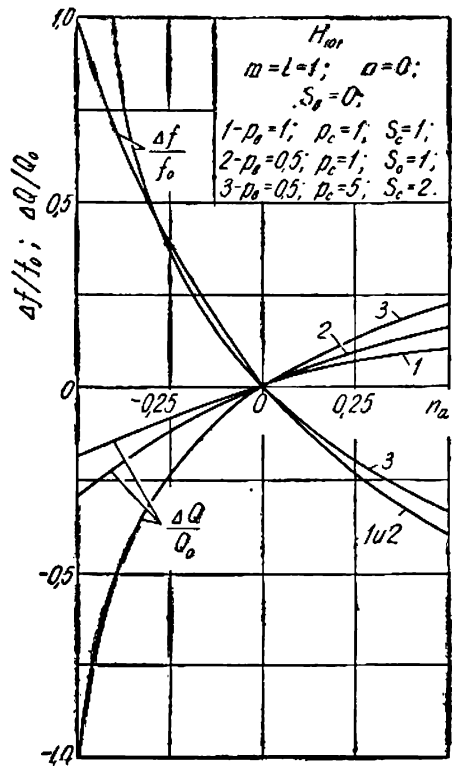


Рис. 2.

Наиболее интересные частные случаи — это изменение длины резонатора при колебаниях типа H_{011} , для которого с учетом равенства $s_R = 0$ в формуле (19)

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \left[\frac{1 + \left(N_{011} \frac{1}{1 + n_L} \right)^2}{1 + N_{011}^2} \right]^{\frac{1}{2}} - 1; \quad (25)$$

изменение радиуса резонатора при колебаниях типа H_{011} , для которого с учетом равенства $s_L = 0$ в формуле (19)

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{1 + n_R} \left[\frac{1 + N_{011} (1 + n_R)}{1 + N_{011}^2} \right]^{\frac{1}{2}} - 1, \quad (26)$$

и изменение радиуса цилиндра при колебаниях типа E_{010} , приводящее к изменению частоты (20):

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{1 + n_R} - 1. \quad (27)$$

Общие формулы для добротности цилиндрического резонатора (для перестройки представляют особый интерес аксиально симметричные поля, т. е. $m = 0$) при колебаниях типа H_{0nl}

$$Q = \frac{2\pi \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} LR \left[\left(\frac{l}{2L} \right)^2 + \left(\frac{\beta_{0nl}}{2\pi R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{R_s \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left[2R \left(\frac{l}{2L} \right)^2 + L \left(\frac{\beta_{0nl}}{2\pi R} \right)^2 \right]} \quad (28)$$

и для колебаний типа E_{0nl}

$$Q = \frac{\pi \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{l}{2L} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{0nl}}{2\pi R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} RL}{R_s \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} L + 2R} \quad (29a)$$

при $l \neq 0$ и

$$\text{при } l = 0 \quad Q = \frac{\alpha_{0nl} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} L}{2R_s \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} L + R} \quad (29b)$$

позволяют получить соответствующие выражения для изменения добротности:

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_L} \cdot \left[\frac{1 + (N_{0nl} \cdot m_L)^2}{1 + N_{0nl}^2} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \left[\frac{2N_{0nl}^2 + p}{2(N_{0nl} \cdot m_L)^2 + \frac{p}{m_L}} \right] - 1 \quad (30)$$

при колебаниях типа H_{0nl} , а при колебаниях типа E_{0nl}

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_L} \cdot \left[\frac{1 + (M_{0nl} \cdot m_L)^2}{1 + M_{0nl}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{2 + p}{2 + \frac{p}{m_L}} \right] - 1 \quad (31a)$$

при $l \neq 0$ и

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_L} \cdot \frac{(1 + p)}{\left(1 + \frac{p}{m_L} \right)} - 1 \quad (31b)$$

при $l = 0$

Отсюда получаем для колебаний типа H_{011} :

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_L} \cdot \left[\frac{1 + (N_{011} \cdot m_L)^2}{1 + N_{011}^2}\right]^{\frac{3}{2}} \cdot \left[\frac{2N_{011}^2 + p}{2(N_{011} \cdot m_L)^2 + \frac{p}{m_L}}\right] - 1, \quad (32)$$

а $\frac{\Delta Q}{Q_0}$ для колебаний типа E_{010} совпадает с выражением (31б).

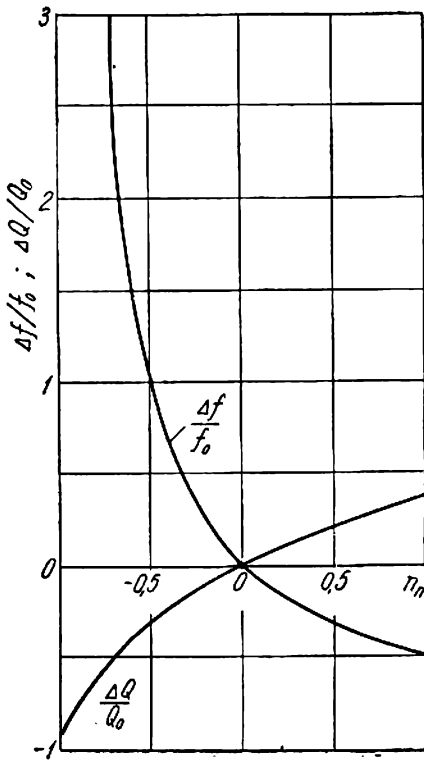


Рис. 3.

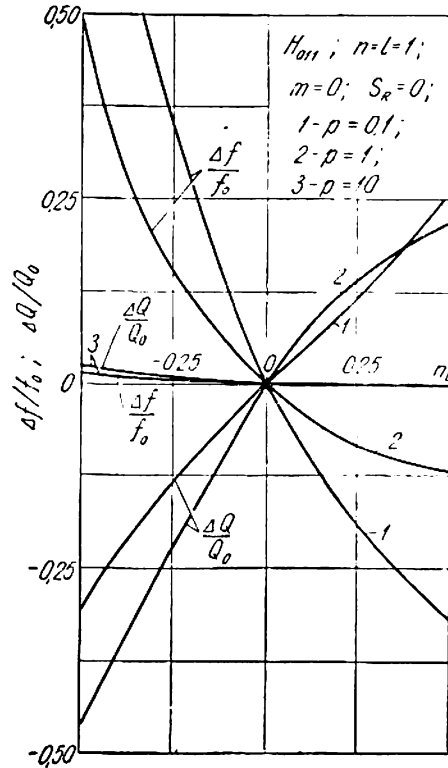


Рис. 4.

Рассмотрение теплового изменения размеров, при котором $n_R = n_L = \alpha(t - t_0)$, приводит к уравнениям (14) и (15), не содержащим зависимости от начального соотношения размеров резонатора и типа колебаний.

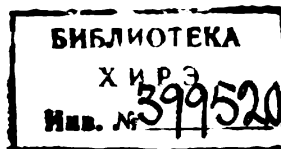
Обобщая полученные данные для прямоугольных и цилиндрических резонаторов, можно утверждать, что при пропорциональном изменении размеров, т. е. при

$$n_a = n_b = n_c = n_R = n_L = n_n \quad (33)$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{1 + n_n} - 1, \quad \text{а}$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \left(\frac{\Delta f}{f_0} + 1\right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \quad (34)$$

и не зависят от формы резонатора и типа колебаний.



Зависимости изменения частоты и добротности при пропорциональном изменении всех размеров резонатора, описываемые уравнениями (33) и (34), представлены на рис. 3. Рисунок 4 соответствует смещению торцевой стенки цилиндрического резонатора при колебаниях типа H_{011} , рисунок 5 — изменению радиуса цилиндрического резонатора при колебаниях типа E_{010} . Анализ изменения частоты и добротности при произвольном изменении размеров довольно сложен и может быть произведен в каждом конкретном случае с помощью полученных ранее выражений.

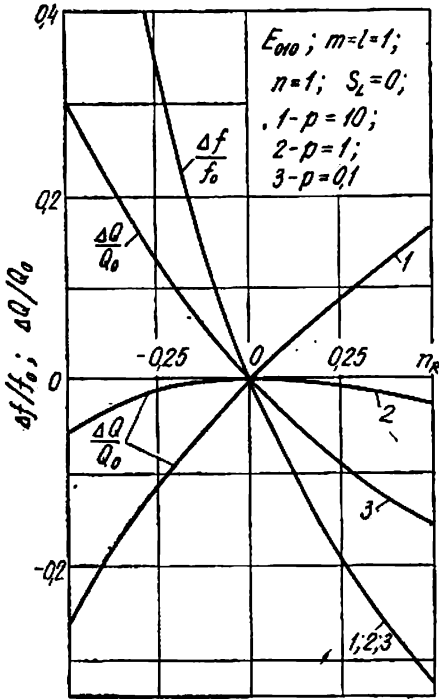


Рис. 5.

Так, например, из рис. 5 можно заключить, что для типа колебаний E_{010} в цилиндрическом резонаторе при перестройке изменением радиуса существует оптимальное отношение размеров p , которое обеспечивает максимальную перестройку по частоте при минимальном изменении добротности в заданном диапазоне частот или перестройки.

Остановимся вкратце на возможном практическом применении приведенных формул и графиков.

Во-первых, как было указано выше, вовсе не обязательно представлять себе изменение размеров в динамике с обязательной физической реализацией (такой случай, например, для изменения только радиуса цилиндрического резонатора неосуществим). Полученные формулы и графики позволяют определить изменения частоты и добротности при переходе от резонатора с одним соотношением размеров к другому и, следовательно, наметить тенденцию в выборе соответствующей конфигурации резонатора.

Далее, такие случаи, как изменение одного из размеров прямоугольного или длины цилиндрического резонатора, осуществляются путем перемещения стенки (практически — поршня). Одновременное и пропорциональное изменение всех размеров (в относительно небольших пределах) реализуется при тепловом расширении и сжатии.

Наконец, одновременное перемещение двух стенок в прямоугольном или изменении радиуса в цилиндрическом резонаторе можно сопоставить с влиянием тонких ферритовых пластин или трубки, помещенных на соответствующих стенках и находящихся в изменяемом магнитном поле. Основанием для данного предположения могут служить результаты работ [3] и [4]. В них теоретически и экспериментально рассмотрено влияние соотношения размеров на частоту прямоугольного объемного резонатора с частичным ферритовым заполнением и сделан вывод о возможности увеличения диапазона перестройки рациональным выбором геометрии резонатора.

В заключение считаю необходимым выразить признательность В. М. Бондаренко за помощь в расчетной части и оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Терещенко. Влияние различных факторов на дисперсионные свойства волноводов вблизи критической частоты. «Тр. радиофиз. ф-та ХГУ», 7, 90, Харьков, 1962.
 2. А. И. Терещенко и О. Е. Закуренко. Перестройка прямоугольного объемного резонатора смещением стенки. «Тр. радиофиз. ф-та ХГУ», 7, 90, 1962, стр. 86.
 3. А. И. Терещенко, В. А. Коробкин и Н. М. Ковтун. О возможности увеличения диапазона перестройки прямоугольного резонатора ферритом. ЖТФ, 31, 11, 1388, 1961.
 4. Н. М. Ковтун, В. А. Коробкин и А. И. Терещенко. К вопросу о перестройке прямоугольного волноводного резонатора ферритом. «Тр. радиофиз. ф-та ХГУ», 5, 44, Харьков, 1962.
-