

К ТЕОРИИ РЕЗОНИРУЮЩЕЙ НАГРУЗКИ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ

В. А. Малышев

Рассматривается работа определенного класса генераторов СВЧ при наличии помимо полезной активной нагрузки дополнительного резонатора, соединенного с основным резонатором через передающую линию. Исследование проводится для случая симметричных зон генерации при пренебрежении „эффектом длинной линии“ и включает вопросы об условиях появления скачков частоты, о возможности расширения диапазона электронной перестройки частоты, о крутизне электронной перестройки и об особенностях зоны генерации.

ВВЕДЕНИЕ

Любой автогенератор может быть представлен схемой рис. 1а. Если  $Y = G + jB$  — проводимость колебательной системы (к. с.), а  $F(u_0, \omega, u)$  — амплитуда первой гармоники тока, текущего в цепи нелинейного элемента (н. э.) автогенератора и в общем случае зависящего от параметров источников питания  $u_0$ , частоты генерируемых

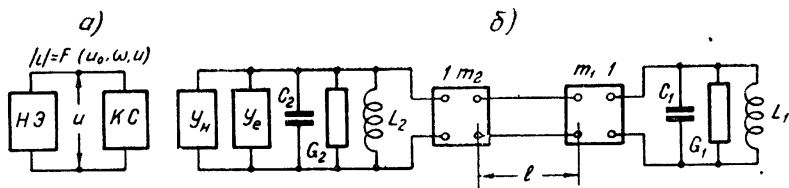


Рис. 1.

колебаний  $\omega$  и амплитуды напряжения на колебательной системе  $u$ , то работа автогенератора определяется соотношениями:

$$2P = Gu^2; F(u_0, \omega, u) \cos \delta(u_0, \omega, u) = Gu; B + G \operatorname{tg} \delta(u_0, \omega, u) = 0, \quad (1)$$

где  $P$  — мощность генерируемых колебаний,  $\delta(u_0, \omega, u)$  — отличие разности фаз между током и напряжением на колебательной системе от значения, равного  $\pi$ . Обычно зависимость  $F(u_0, \omega, u)$  от величины  $u$  называется колебательной характеристикой генератора, а  $\delta(u_0, \omega, u)$  — фазой электронной проводимости генератора. Можно показать [1], что для колебательной системы второго порядка условие устойчивости стационарной генерации имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial u} \left[ \frac{F}{u} \cos \delta \right] < 0, \quad (2)$$

а условие самовозбуждения генератора записывается в форме:

$$C \equiv \lim_{u \rightarrow u_1} \left[ \frac{F}{u} \cos \delta \right] \geq G, \quad (3)$$

причем для мягкого возбуждения  $u_1 = 0$ , а для жесткого возбуждения

$u_1$  определяется величиной  $u$ , при которой начинает нарушаться условие (2).

Рассмотрим класс автогенераторов СВЧ, удовлетворяющих следующим условиям.

1. Фаза электронной проводимости практически не меняется с изменением частоты и амплитуды генерируемых колебаний (т. е.  $\delta(u_0, \omega, u) \simeq \delta(u_0)$ ). Критерием выполнения этого условия является постоянство наклона линий равной частоты в нагрузочных характеристиках генератора.

2. Изменением какого-либо параметра источника питания  $u_0$  по определенному закону можно менять  $\delta$  таким образом, чтобы обеспечивалась симметрия изменения фазы  $\delta$  во времени относительно ее нулевого значения, соответствующего центру зоны генерации. При этом генератор будет проходить последовательно все точки зоны генерации.

3. Генератор имеет мягкий режим возбуждения.

4. Колебательная характеристика генератора практически не меняется в пределах зоны генерации, т. е.  $F(u_0, \omega, u) \simeq F(u)$ .

Можно показать, что изложенным выше условиям с хорошим приближением удовлетворяют отражательный клистрон, монотрон, некоторые конструкции пролетных клистронных генераторов и ряд других автогенераторов СВЧ.

В данной работе рассматриваются особенности поведения упомянутого класса автогенераторов СВЧ при наличии дополнительного резонатора, связанного с основным резонатором генератора посредством передающей линии без потерь. При этом разбирается случай, когда дополнительный резонатор подключен к основному с помощью отдельных элементов связи и линии связи (случай самостоятельного включения), а также рассматривается случай включения дополнительного резонатора внутри высокочастотного тракта, ведущего к полезной нагрузке (случай промежуточного включения). „Эффект длинной линии“ не учитывается.

Известно [2], что схема эквивалентного представления резонатора колебательной системой с сосредоточенными постоянными будет меняться в зависимости от выбора местоположения схемы в передающей линии. Для схемы в виде параллельного колебательного контура, включенного в передающей линии связи резонаторов, эквивалентная схема автогенератора при самостоятельном включении дополнительного резонатора изображена на рис. 16. Здесь величины  $G_1, C_1, L_1$  характеризуют дополнительную резонансную нагрузку,  $G_2, C_2$  и  $L_2$  — основную колебательную систему генератора;  $m_1$  и  $m_2$  — коэффициенты трансформации проводимости из передающей линии к зажимам контуров;  $l$  — длина линии между сечениями, в которых эквивалентные схемы резонаторов могут быть представлены в виде параллельных колебательных контуров (эти сечения легко найти из экспериментов [2, 3]). Величина  $Y_H = G_H + jB_H$  характеризует полезную нагрузку генератора;  $Y_e$  — высокочастотная электронная проводимость, определяемая соотношением

$$Y_e = u^{-1} F(u) e^{-j[\delta(u_0) + \pi]}. \quad (4)$$

Введем обозначения

$$\gamma = Q_{b1}/Q_{01} = G_1/Y_0 m_1; \quad Q_{b1} = \omega_1 C_1/Y_0 m_1 \quad (5)$$

( $Q_{b1}$  и  $Q_{01}$  — внешняя и собственная добротности дополнительного резонатора;  $Y_0$  — волновая проводимость передающей линии связи резонаторов),

$$M = \cos \beta l - \alpha \sin \beta l; \quad N = \gamma \sin \beta l, \quad (6)$$

где

$$\alpha = 2Q_{b1} (\omega - \omega_1)/\omega_1; \quad \omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1};$$

$$\beta = 2\pi/\lambda_g; \quad G_p = (G_2 + G_n)/Y_0 \quad (7)$$

( $\lambda_g$  — длина волны в передающей линии).

Тогда, пользуясь теорией линий передачи, можно записать соотношения (1) для рассматриваемого случая в виде:

$$2P_n = G_n u^2; \quad u/F(u) = \cos \delta / Y_0 [G_p + \gamma m_2 (M^2 + N^2)^{-1}]; \quad (8)$$

$$Y_0 m_2 (M^2 + N^2)^{-1} [M(\alpha \cos \beta l + \sin \beta l) - \gamma N \cos \beta l] + 2C_2 \Delta \omega_2 +$$

$$+ B_n + Y_0 [G_p + \gamma m_2 (M^2 + N^2)^{-1}] \operatorname{tg} \delta = 0, \quad (9)$$

где  $\Delta \omega_2 = \omega - \omega_2$ ;  $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ ;  $P_n$  — мощность в полезной нагрузке.

Выражения (8) и (9) характеризуют поведение генератора в случае, если известен вид функции  $u^2 = f[u/F(u)]$ . Для рассматриваемого класса автогенераторов эта функция монотонно возрастает.

### 1. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА В СЛУЧАЕ $\beta l$ , БЛИЗКОМ К $n\pi$

В случае, когда  $\beta l \simeq n\pi$ , где  $n$  — целое число, начинает проявляться „эффект длинной линии“, т. е. линия связи резонаторов сама превращается в резонатор, и генератор работает на трехконтурную систему. Ниже этот случай не исследуется. Однако если рассмотреть случай  $l \simeq 0$  и полагать, что при этом линия связи не резонирует, то соотношения (8) и (9) принимают вид:

$$u/F(u) = \cos \delta/k; \quad 2C_2 [(1 + Q_{b1} \omega_2/Q_{b2} \omega_1) \omega - (1 + Q_{b1}/Q_{b2}) \omega_2] +$$

$$+ B_n + k \operatorname{tg} \delta = 0, \quad (10)$$

где

$$k = \omega_2 C_2 [1/Q_{0n2} + Q_{b1}/Q_{01} Q_{b2}],$$

$Q_{b2} = \omega_2 C_2 / Y_0 m_2$  — внешняя добротность основного резонатора, а добротность  $Q_{0n2}$  определяется соотношением

$$Q_{0n2} = \omega_2 C_2 / (G_n + G_2). \quad (11)$$

Пусковое условие (3) при этом имеет вид:

$$C_0 \geq k/\cos \delta; \quad C_0 = \lim_{u \rightarrow 0} [F(u)/u]. \quad (12)$$

Можно показать, что диапазон электронной перестройки частоты до точек прекращения генерации определяется выражением:

$$\Delta \omega_p = \frac{\sqrt{C_0^2 - k^2}}{C_2 (1 + Q_{b1} \omega_2 / Q_{b2} \omega_1)}, \quad (13)$$

а диапазон электронной перестройки частоты до точек, в которых мощность уменьшается в  $n$  раз по сравнению с мощностью в центре зоны (где  $u = u_m$ ), определяется соотношением:

$$\Delta \omega_n = \frac{\sqrt{nF^2(u_m/\sqrt{n}) - F^2(u_m)}}{u_m C_2 (1 + Q_{b1} \omega_2 / Q_{b2} \omega_1)}. \quad (14)$$

Сравнение полученных выражений с соотношениями (1) показывает, что подключение дополнительного резонатора в этом случае эквива-

лентно изменению добротности и резонансной частоты основного резонатора и оказывает стабилизирующее действие на частоту генерируемых колебаний. При этом степень затягивания частоты нагрузкой  $\partial \omega / \partial B_n$  уменьшается от подключения дополнительного резонатора в  $S$  раз, где коэффициент стабилизации  $S$  определяется выражением:

$$S = 1 + Q_{b1} \omega_2 / Q_{b2} \omega_1. \quad (15)$$

## 2. УСЛОВИЕ СИММЕТРИИ ЗОНЫ ГЕНЕРАЦИИ

Уравнение (9), определяющее частоту генерируемых колебаний при условии  $B_n = 0$  и при введении подстановки

$$B = (Q_{01}/Q_{b1}) (\text{ctg } \beta l - \alpha), \quad (16)$$

из которой следует, что

$$M = \gamma B \sin \beta l; \quad N = \gamma \sin \beta l, \quad (17)$$

можно привести к виду:

$$y^3 + 3py + 2q = 0, \quad (18)$$

где

$$y = B - \frac{r \text{tg } \delta - \Omega}{3}; \quad p = \frac{1-z}{3} - \left( \frac{r \text{tg } \delta - \Omega}{3} \right)^2; \quad (19)$$

$$q = \frac{\Omega - r \text{tg } \delta}{3} \left[ \left( \frac{r \text{tg } \delta - \Omega}{3} \right)^2 + 1 + \frac{z}{2} + \frac{3z}{2r} \right] - \frac{z \Omega}{2r}, \quad (20)$$

причем

$$\Omega = (Q_{01}/\omega_1 Q_{b1} Q_{b2}) [(Q_{b1} \omega_2 - Q_{b2} \omega_1) \text{ctg } \beta l + 2(\omega_2 - \omega_1) Q_{b1} Q_{b2}]; \quad (21)$$

$$r = \omega_2 Q_{01}/\omega_1 Q_{0n2}; \quad z = Q_{01}^2 \omega_2 / Q_{b1} Q_{b2} \omega_1 \sin^2 \beta l. \quad (22)$$

Генератор в пределах зоны генерации будет работать без скачков частоты и мощности, если условие самовозбуждения

$$C_0 \cos \delta \geq Y_0 [G_p + \gamma m_2 (M^2 + N^2)^{-1}] \quad (23)$$

и условия устойчивости будут выполняться лишь для одного из корней уравнения (18). Поэтому достаточным условием генерации без скачков будет служить условие наличия одного действительного корня уравнения (18):

$$q^2 + p^3 \geq 0. \quad (24)$$

Из соотношений (8) и (17) следует, что зона генерации будет симметрична относительно центра, если функция  $B = f(\delta)$ , определяемая уравнением (18), будет симметрична или антисимметрична относительно точки  $\delta = 0$ . Из выражений (18) — (21) следует, что последнее условие выполняется в случае  $\Omega = 0$ . Поэтому параметр  $\Omega$  может быть назван параметром асимметрии зоны. Условие  $\Omega = 0$ , которое можно переписать в виде:

$$\lambda_1 = \lambda_2 \frac{Q_{b2} (\text{ctg } \beta l + 2Q_{b1})}{Q_{b1} (\text{ctg } \beta l + 2Q_{b2})} \quad (25)$$

( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — резонансные длины волн дополнительного и основного резонаторов), является условием получения симметричных зон генерации, представляющих существенный интерес для практики.

В дальнейшем везде условие (25) будет считаться выполненным.

### 3. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ ЗОНАХ

Будем полагать, что  $\beta l \neq n\pi$  и  $\Omega = 0$ . При этом условие (24) принимает вид:

$$t(\operatorname{rtg} \delta)^4 + l(3\operatorname{rtg} \delta)^2 + 3(1-z)^3 \geq 0, \quad (26)$$

где

$$t = 3(1+z/r); \quad 4l = [t^2 + 2t(z-1) - (1-z)^2/3].$$

В случае сильной связи ( $z > 1$ ) условие (26) не выполняется в центре зоны, где

$$\operatorname{tg}^2 \delta \leq \frac{9}{2r^2 t} \left( \sqrt{l^2 - \frac{4t(1-z)^3}{27}} - l \right). \quad (27)$$

В этой области уравнение (18) имеет три корня:

$$y_1 = 2 \sqrt{b} \frac{\operatorname{tg} \delta}{|\operatorname{tg} \delta|} \cos \frac{\Theta}{3}; \quad (28a)$$

$$y_2 = -2 \sqrt{b} \frac{\operatorname{tg} \delta}{|\operatorname{tg} \delta|} \cos \frac{\pi - \Theta}{3}; \quad (28б)$$

$$y_3 = -2 \sqrt{b} \frac{\operatorname{tg} \delta}{|\operatorname{tg} \delta|} \cos \frac{\pi + \Theta}{3}, \quad (28в)$$

где

$$b = \frac{z-1}{3} + \frac{r^2}{9} \operatorname{tg}^2 \delta; \quad \cos \Theta = \frac{r |\operatorname{tg} \delta|}{3b \sqrt{b}} \left( \frac{r^2 \operatorname{tg}^2 \delta}{9} + 1 + \frac{z}{2} + \frac{3z}{2r} \right). \quad (29)$$

Можно показать [4], что корень  $y_3$  всегда соответствует неустойчивому режиму. Для области невыполнения условия (27) частота генерируемых колебаний характеризуется корнем

$$y = 2 \sqrt{b} \frac{\operatorname{tg} \delta}{|\operatorname{tg} \delta|} \operatorname{ch} \frac{\Theta_0}{3}, \quad (30)$$

в котором  $\operatorname{ch} \Theta_0$  определяется правой частью второго выражения (29).

Общий ход функции  $y = f(\operatorname{tg} \delta)$  показан на рис. 2а. На краях области перескоков

$$y_0 = 2 \sqrt{b}, \quad (31)$$

где величина  $\operatorname{tg} \delta$  в выражении (29) для  $b$  определяется равенством (27). Если условия устойчивости генерации на той частоте, на которой происходила генерация, нарушаются на краю области перескоков, генератор испытает перескок волны, который можно определить из выражения, полученного на основе (31):

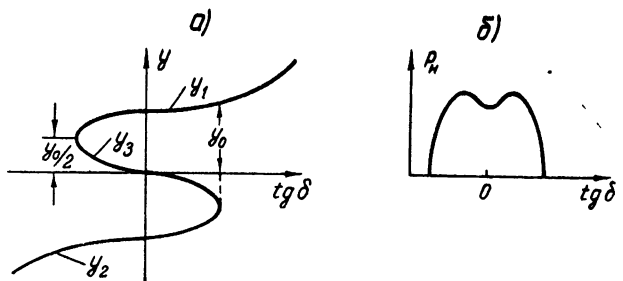


Рис. 2.

$$\Delta \lambda = 3 \lambda_1 \sqrt{b/2Q_{01}}. \quad (32a)$$

Если же условия устойчивости нарушаются в центре зоны, то перескок волны определяется соотношением:

$$\Delta \lambda = \lambda_1 \sqrt{z - 1} / Q_{01}. \quad (326)$$

Таким образом, возможны перескоки волны, лежащие между значениями, определяемыми из выражений (32а) и (32б).

В случае слабой связи ( $z < 1$ ) условие (26) может не выполняться лишь при  $l < 0$ . Но так как  $z < 1$ , то нетрудно показать, что всегда  $l > 0$  (т. е. в случае  $z < 1$  перескоки частоты отсутствуют). Параметр  $z$  характеризует связь между резонаторами. При  $z < 1$  для  $\text{tg}^2 \delta \ll 3(1 - z)r^{-2}$  частота генерируемых колебаний определяется корнем

$$y = 2\sqrt{-b} \frac{\text{tg} \delta}{|\text{tg} \delta|} \text{sh} \frac{\Theta_1}{3}; \quad \text{sh} \Theta_1 = -\frac{r \text{tg} \delta}{3b\sqrt{-b}} \left( \frac{r^2 \text{tg}^2 \delta}{9} + 1 + \frac{z}{2} + \frac{3z}{2r} \right), \quad (33)$$

а при больших  $\text{tg}^2 \delta$  частота определяется корнем (30).

Так как в центре зоны должно выполняться условие  $B = 0$ , то длина волны  $\lambda_0$ , генерируемая в центре зоны, определяется соотношением:

$$\lambda_1 - \lambda_0 = (\lambda_0 / 2Q_{b1}) \text{ctg} \beta l. \quad (34)$$

Выражение (8) при  $\Omega = 0$  принимает вид:

$$D = \frac{u}{F(u)} (G_{\text{н}} + G_2) = \frac{(1 + B^2) \cos \delta}{(1 + B^2) + z/r}. \quad (35)$$

Так как  $B$  зависит от  $\delta$ , причем  $B = 0$  при  $\delta = 0$ , функция  $u/F(u) = f(\delta)$  может уменьшаться при приближении к центру зоны. Это приведет к провалу зоны в ее центре (рис. 2б); величина этого провала будет расти с ростом  $z/r$ . Для слабой связи ( $z < 1$ ) условие генерации в центре зоны имеет вид

$$C_0 \geq Y_0 G_p (1 + z/r), \quad (36)$$

а для сильной связи ( $z > 1$ )

$$C_0 \geq Y_0 G_p (1 + 1/r). \quad (37)$$

Решая совместно уравнения (18) и (35), можно получить квадратное уравнение, определяющее связь величин  $D$  и  $B$ :

$$A^2 + [r^2(1 - D^{-2}) - (2z + 1)]A + z(2r + z + 2) = 0, \quad (38)$$

где  $A = 1 + B^2$ . Так как в точках максимальной мощности выполняется соотношение  $\partial D / \partial A = 0$ , то для этих точек справедливо равенство:

$$A^2 = (1 + B^2)^2 = z(2r + z + 2), \quad (39)$$

причем мощность в этих точках определяется соотношениями:

$$P_{\text{н}} = \frac{G_{\text{н}} u^2}{2}; \quad \frac{u}{F(u)} = \frac{r}{Y_0 G_p \sqrt{r^2 - (2z + 1) + 2\sqrt{z(2r + z + 2)}}}. \quad (40)$$

Если равенство (39) соблюдается при  $B = 0$ , то зона генерации имеет предельно плоскую вершину. Поэтому условие существования плоской вершины в зоне генерации имеет вид

$$r = \frac{1}{2z} - \frac{z}{2} - 1 \quad (41)$$

и может реализоваться при  $z < \sqrt{2} - 1$ , причем мощность, генерируемая в этом случае в центре зоны, определяется из условия

$$\frac{u}{F(u)} = \frac{1}{Y_0 G_p} \frac{1 - 2z - z^2}{1 - 2z + z^2}. \quad (42)$$

Можно показать, что диапазон электронной перестройки частоты до точек зоны, определяемых значением величины  $D$ , находится из выражения

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= (\omega_1/Q_{01}) \sqrt{A-1} = \\ &= (\omega_1/Q_{01}) \sqrt{z-1 + 2^{-1} \left[ a + \sqrt{a^2 + 4z(a-2r-2)} \right]}; \\ a &= 1 + r^2 (D^{-2} - 1). \end{aligned} \quad (43)$$

В случае, если рассматривается диапазон электронной перестройки до точек прекращения генерации, то в соотношении (43) надо положить

$$D = G_p Y_0 / C_0, \quad (44)$$

а для точек зоны, в которых полезная мощность в  $n$  раз меньше, чем в максимуме зоны (где  $u = u_m$ ), надо в (43) подставить

$$D = Y_0 G_p u_m / \sqrt{n} F(u_m / \sqrt{n}), \quad (45)$$

причем величина  $u_m$  находится из второго соотношения (40).

#### 4. ЭЛЕКТРОННАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ

Исследование подкоренного выражения в формуле (43) показывает, что функция  $A(z)$  имеет максимум в точке

$$z = \frac{r(r+1) [D^2(1+r) - r]}{r^2 - D^2(r+1)^2}. \quad (46)$$

Так как  $z > 0$ , то условие (46) выполнимо при

$$\frac{r}{1+r} > D^2 > \frac{r^2}{(1+r)^2}. \quad (47)$$

Если рассматривать область  $0 < z < 1$ , то нижний предел изменения  $D^2$  в выражении (47) следует увеличить, так что условие наличия максимума функции  $A(z)$  в области  $0 < z < 1$  будет иметь вид:

$$r(1+r)^{-1} > D^2 > r^2(r+2)(r+1)^{-3}. \quad (48)$$

Таким образом, функция  $A(z)$  будет расти с ростом  $z$  в области  $0 < z < 1$ , если

$$D^2 < r^2(r+2)(r+1)^{-3}, \quad (49)$$

и уменьшаться в случае

$$D^2 > r/(1+r). \quad (50)$$

Поведение функции  $A(z)$  характеризует изменение величины  $\Delta\omega$  в формуле (43) при изменении  $z$ . В случае выполнения условия (49) наибольший диапазон электронной перестройки будет наблюдаться при критической связи ( $z = 1$ )\*, а в случае условия (50) — при  $z = 0$ .

\* Условие  $z = 1$ , необходимое для наибольшего расширения диапазона электронной перестройки частоты, ранее было получено из других соображений, изложенных автором в докладе на II Всесоюзной конференции МВО по радиоэлектронике.

Из выражений (1) и схемы рис. 1б можно получить, что диапазон электронной перестройки частоты до точек, определяемых величиной  $D$ , при отсутствии дополнительного резонатора определяется соотношением:

$$\Delta \omega_0 = \omega_1 Q_{01}^{-1} r \sqrt{D^2 - 1}. \quad (51)$$

Рассмотрим относительное изменение диапазона электронной перестройки частоты  $\Delta \omega / \Delta \omega_0$  до точек зоны, определяемых величиной  $D$ , при включении дополнительного резонатора. Исследование показывает, что при соблюдении условия (48) максимумам функций  $\Delta \omega / \Delta \omega_0 = f(z)$  отвечают точки (46); эти максимумы лежат на кривой

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta \omega_0} = \sqrt{\frac{(z+r)(z+r+1)}{r^2 + 2rz + r + z}}. \quad (52)$$

Наибольшее значение правой части этого выражения равно  $\sqrt{2}$  и реализуется при  $z = 1$ ;  $r = 0$ . При соблюдении условия (49) наибольшее значение величины  $\Delta \omega / \Delta \omega_0$  имеет место при  $z = 1$ . Исследование случая  $z = 1$  показывает, что функции  $\Delta \omega / \Delta \omega_0 = f(r)$  растут от значений, определяемых кривой \*

$$\Delta \omega / \Delta \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{1}{2\sqrt{2r+3} - 3}}, \quad (53)$$

до максимумов, лежащих на линии

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta \omega_0} = \left[ \frac{4(3r+2)}{9r+6 - \sqrt{9r^2 + 20r + 12}} - 1 \right]^{1/2}, \quad (54)$$

причем на этой линии соблюдается равенство:

$$D = 2r (9r + 4r^2 + 6 - \sqrt{9r^2 + 20r + 12})^{-1/2}. \quad (54a)$$

При дальнейшем росте  $r$  функции  $\Delta \omega / \Delta \omega_0 = f(r)$  уменьшаются, стремясь к единице. Таким образом, наибольшее относительное расширение диапазона электронной перестройки частоты до точек зоны с неизменной величиной  $D$  (при самостоятельном включении дополнительного резонатора это — точки с неизменным уровнем полезной мощности), определяемое выражением (54) при выполнении условия (49), имеет место при  $r = 0$ , когда

$$\left( \frac{\Delta \omega}{\Delta \omega_0} \right)_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{8}{6 - \sqrt{12}} - 1} = 1,465. \quad (55)$$

При соблюдении условия (50) наибольшее значение отношения  $\Delta \omega / \Delta \omega_0$ , равное единице, будет при  $z = 0$ ; следовательно, в этом случае дополнительный резонатор уменьшает диапазон электронной перестройки. При  $z = 1$  это уменьшение наибольшее и определяется выражением (53). (Можно показать, что на кривой (53) соблюдается условие (50), а на кривой (54) — условие (49).)

\* На этой кривой выполняется условие

$$D = r (2\sqrt{2r+3} - 3 + r^2)^{-1/2},$$

что соответствует, как нетрудно видеть из выражения (40), точкам максимальной мощности.



Важным параметром генератора является крутизна электронной перестройки частоты в центре зоны. Из уравнения (18) можно найти, что для  $z < 1$  эта величина определяется выражением:

$$d \omega/d (\operatorname{tg} \delta)_0 = - \omega_1 (z + r)/2Q_{01} (1 - z); \quad (56)$$

наибольшее ее постоянство в окрестностях центра зоны определяется из условия  $d^3 \omega/d (\operatorname{tg} \delta)_0^3 = 0$  и реализуется при  $z = 0$ , когда

$$d \omega/d (\operatorname{tg} \delta)_0 = - \omega_1 r/2Q_{01}. \quad (57)$$

При самостоятельном включении дополнительного резонатора в связи с двухгорбой формой зоны (рис. 26) целесообразно ввести понятия о диапазоне электронной перестройки частоты до точек зоны, имеющих полезную мощность, одинаковую с центром зоны ( $\Delta \omega_1$ ), и о диапазоне электронной перестройки частоты до точек максимальной мощности ( $\Delta \omega_m$ ). Из выражений (35), (40) и (43) следует, что эти величины определяются соотношениями:

$$\Delta \omega_1 = \frac{\omega_1}{Q_{01}} [z(2r + z + 2) - 1]^{1/2}, \quad (58)$$

$$\Delta \omega_m = \frac{\omega_1}{Q_{01}} [\sqrt{z(2r + z + 2)} - 1]^{1/2}. \quad (59)$$

#### 5. СЛУЧАЙ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Схема рис. 16 и все проведенные выше рассуждения соответствуют случаю самостоятельного включения дополнительного резонатора. Для исследования случая промежуточного включения дополнительного резонатора необходимо величину  $Y_n$  на схеме рис. 16 перенести в контур дополнительного резонатора. При этом величины  $G_p$ ,  $Q_{0n2}$  и  $Q_{01}$ , входящие во все предыдущие вычисления, изменяют свой смысл, получив значения:

$$G_p = G_2/Y_0; \quad Q_{01} = \omega_1 C_1/(G_1 + G_n); \quad Q_{0n2} = \omega_2 C_2/G_2. \quad (60)$$

Если учесть при этом, что полезная мощность, определяемая ранее посредством выражений (8) и (40), будет теперь задаваться соотношением

$$P_n = \frac{Q_{01}^2 m_2}{2Q_{01}^2 m_1 \sin^2 \beta l} \frac{G_n u^2}{(1 + B^2)}, \quad (61)$$

то останутся в силе все выражения, полученные выше. Исключение составляют формулы (39) — (42), (45), (58) и (59), которые учитывают специфику зоны генерации. Из выражения (61) следует, что при промежуточном включении дополнительного резонатора двухгорбая форма зоны генерации может превратиться в трехгорбую для некоторых видов колебательной характеристики ( $P_n$  неоднозначно определяется величиной  $u$  и может возрастать при приближении к центру зоны генерации, когда  $B \rightarrow 0$ , хотя величина  $u$  может при этом быть постоянной или даже слегка уменьшаться).

Все выводы раздела 4 остаются в силе и для случая промежуточного включения дополнительного резонатора. Однако при этом следует помнить, что величина  $D$ , которая при самостоятельном включении дополнительного резонатора однозначно определяла полезную мощность, при промежуточном включении определяет только величину высокочастотного напряжения  $u$  в основном резонаторе.

Проведенное рассмотрение позволяет судить об особенностях работы генераторов рассматриваемого класса при наличии резонирующей нагрузки и использовать эти особенности на практике. Так, если необходимо предельно расширить диапазон электронной перестройки частоты до точек зоны, определяемых величиной  $D$  (при известной функции  $F(u)$ ), то на холодных измерениях следует подобрать такие значения величин  $Q_{01}$ ,  $Q_{b1}$ ,  $Q_{b2}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\beta l$ , чтобы удовлетворялось условие (54а) и выполнялось равенство (25) при  $z = 1$ .

Для случая отражательного клистрона колебательная характеристика имеет вид:

$$F(u) = 2M I_0 J_1(x), \quad (62)$$

где  $M$  — коэффициент электронного взаимодействия,  $I_0$  — ток, питающий зазор резонатора,  $x$  — параметр группировки,  $J_1(x)$  — функция Бесселя первого рода. Этот случай был качественно исследован в работе [5] при использовании эквивалентной схемы в виде двух связанных индуктивно контуров. Такая схема получается как частный случай схемы рис. 16 при  $\beta l = (2n + 1)\pi/2$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

Найденные в разделах 1—5 соотношения показывают, что работа генератора определяется четырьмя параметрами: параметром связи  $z$ , параметром асимметрии зоны  $\Omega$ , параметром нагрузки  $r$  и параметром  $D$ , зависящим от электроники генератора. При этом первые три параметра могут быть легко найдены из холодных измерений, что представляет значительное удобство для практики.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С. Д. Гвоздовер, Теория электронных приборов сверхвысоких частот, ГИТТЛ, М., 1956, стр. 307 ÷ 312.
2. В. А. Малышев, Труды Таганрогского радиотехнического института, 2, 55 (1958).
3. Магнетроны сантиметрового диапазона, 1, 2, изд. Сов. радио, М., 1951.
4. К. Ф. Теодорчик, Автоколебательные системы, ГИТТЛ, М., 95, 1948.
5. E. D. Reed, Bell. Syst. Techn. J., 32, 15 (1953).

Таганрогский радиотехнический институт

Поступила в редакцию  
8 января 1958 г.