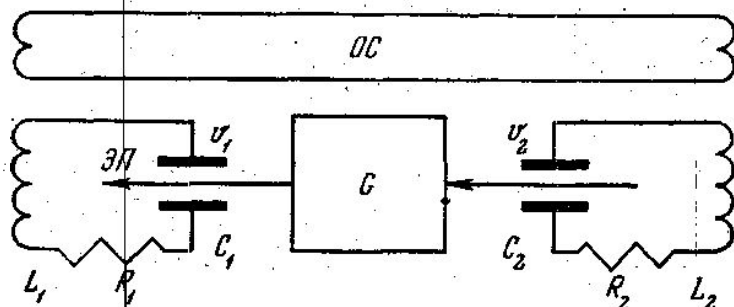


С. К. ЛЕСОТА

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Проведено теоретическое исследование генератора, выполненного на основе электростатического усилителя с внешней цепью обратной связи. Найдены условия для максимальной амплитуды генерации работы генератора в одночастотном режиме и оценена ширина полосы электронной перестройки частоты.

В последнее время разработан малошумящий усилитель СВЧ с электростатической накачкой типа «дифтрон», обладающий гладкой нелинейной амплитудной характеристикой [1]. В работе [2] исследованы нелинейные свойства амплитудной характеристики электростати-



Эквивалентная блок-схема электростатического генератора.  $(L, C, R)_{1,2}$  — эквивалентные параметры входного и выходного контуров,  $G$  — зона усиления,  $ОС$  — цепь обратной связи,  $ЭП$  — электронный поток,  $U_{1,2}$  — напряжение колебаний на емкостях

ческого усилителя, причем отмечено, что на базе его может быть выполнен малошумящий генератор СВЧ. В настоящей заметке проводится теоретическое исследование амплитудно-частотных характеристик такого генератора.

Рассмотрим электростатический усилитель с цепью пассивной обратной связи между входным и выходным контурами (см. рисунок). Его эквивалентную блок-схему можно представить в виде двухконтурного генератора с «перекрестной» связью [3], в котором для сигнала в цепи обратной связи и в области усиления имеются задержки по фазе.

Рассмотрим в генераторе одночастотный режим колебаний

$$U_1 = x e^{-j\omega t}, \quad U_2 = y e^{-j(\omega t - \varphi)}, \quad (1)$$

где  $x$  и  $y$  — амплитуды колебаний в контурах,  $\omega$  — частота колебаний,  $\varphi$  — разность фаз колебаний в контурах и  $t$  — время. Будем считать,

что частота колебаний совпадает с циклотронной частотой электронного потока. Используя эквивалентное представление взаимодействия поперечных волн электронного потока с резонаторами [4], запишем уравнения колебаний в генераторе в виде

$$v_2'' + 2\delta_2 v_2' + \omega_2^2 v_2 = k_1 (\gamma^{-1} v_2'' + 2\beta_1 v_2') e^{-i\psi}, \quad (2)$$

$$v_1'' + 2\delta_1 v_1' + \omega_1^2 v_1 = - [k_2 (\gamma v_1'' + 2\beta_2 v_1') e^{-i\psi} + 4\beta_2 (v_1' + 2\alpha_2 v_1) G(x) e^{-i\kappa}],$$

где

$$\omega_n^2 = (L_n C_n)^{-1} + 4\alpha_n \beta_n, \quad 2\alpha_n = R_n L_n^{-1}, \quad 2\beta_n = G_e C_n^{-1}, \quad \delta_n = \alpha_n + \beta_n.$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \beta_1 k_1 G(x) e^{-i(\kappa + \psi)}, \quad \gamma = C_1 C_2^{-1}, \quad n = 1, 2,$$

$G_e$  — электронная проводимость потока,  $k_n$  — модуль коэффициента обратной связи,  $\psi$  — фазовый угол в цепи обратной связи на частоте  $\omega$ ,  $G(x)$  — коэффициент усиления,  $\kappa$  — полный электронный пролетный угол между резонаторами, включая зону усиления.

Нелинейный коэффициент усиления электростатического квадрупольного поля  $G(x)$  при достаточно малых амплитудах входного сигнала  $x$  может быть записан приближенно в виде [2]

$$G(x) = S_0 + S_1 x^2 - S_2 x^4. \quad (3)$$

Коэффициенты  $S_0$ ,  $S_1$  и  $S_2$  в (3) зависят от некоторого безразмерного параметра, характеризующего усилительные свойства квадрупольного и пропорционального пролетному углу  $\kappa$ , и от расстройки  $\Delta_e$  между эффективной частотой квадрупольного поля  $\omega_e$  и циклотронной частотой  $\omega_c$ :  $\Delta_e = \omega_c - \omega_e = 1 - \omega_c \omega_e^{-1}$ . Причем  $S_1$  является нечетной функцией  $\Delta_e$ ,  $S_0$  и  $S_2$  — четной.

Для решения уравнений (2) введем малые параметры, частотные расстройки  $f$ ,  $\Delta$  и затухание  $d$ :

$$f = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \quad \Delta = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2\omega_0^2}, \quad d_{1,2} = \frac{2\delta_{1,2}}{\omega_0}, \quad \omega_0^2 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2}. \quad (4)$$

Тогда система уравнений (2) с точностью до членов третьего порядка по  $f$ ,  $\Delta$ ,  $d_{1,2} \approx d$  и при  $k_{1,2} \approx k$  запишется в виде

$$(f^2 - \Delta^2 - d^2) \cos(\kappa + \psi) + 2df \sin(\kappa + \psi) - k^2 \cos(\kappa - \psi) = 0,$$

$$\sqrt{(2df - k^2 \sin 2\psi)^2 + (f^2 - \Delta^2 - k^2 \cos 2\psi)^2} = dkG(x), \quad (5)$$

$$((f - \Delta)^2 + d^2) x^2 = k^2 y^2.$$

Система уравнений (5) является в общем случае системой трансцендентных уравнений и не может быть разрешена в явном виде относительно расстройки  $f$  и амплитуды  $x$ , так как коэффициент усиления  $G(x)$  и фазовые углы  $\kappa$  и  $\psi$  имеют в общем случае зависимость от частоты колебаний  $\omega$  и от амплитуды входного сигнала  $x$ .

В то же время по структуре уравнений амплитуда и частота колебаний в генераторе имеют в основном зависимость от фазовых углов  $\kappa$  и  $\psi$ , близкую к периодической, и колебательная характеристика генератора по этим параметрам имеет периодическую структуру с периодом, близким к  $2\pi$ . Поэтому анализ амплитуды и частоты (расстройки  $f$ ) колебаний генератора в пределах отдельной области колебаний

или в некотором интервале около максимума амплитуды в области будет являться достаточно полным для характеристики генератора.

В то же время из уравнений (5) может быть получена общая амплитудная характеристика генератора, которая, как известно, определяется в основном характером зависимости функции усиления отрицательного сопротивления генератора от амплитуды колебаний (3). Отсюда для квадрата амплитуды  $x^2$  имеем по (3) и (5)

$$x^2 = \frac{S_1 + \sqrt{S_1^2 + 4S_2 \left( S_0 - \frac{g}{dk} \right)}}{2S_2}, \quad (6)$$

где

$$g \equiv \sqrt{(2df - k^2 \sin 2\psi)^2 + (f^2 - \Delta^2 - d^2 - k^2 \cos 2\psi)^2}.$$

В (3) зависимость функции усиления  $G(x)$  от входной амплитуды  $x$  имеет параболический характер. Так как коэффициенты  $S_0$  и  $S_2$  всегда положительны, а коэффициент  $S_1$  может быть положительным или отрицательным в зависимости от знака расстройки  $\Delta_e$ , режим работы генератора при  $\Delta_e \leq 0$  будет соответствовать «мягкому», а при  $\Delta_e > 0$  «жесткому» режиму работы (6). Действительные значения амплитуд  $x$  получаются из (6), когда  $g \leq S_0 dk$  при «мягком» режиме и  $g \leq S_0 (1 + S_1^2/S_2) dk$  при «жестком» режиме работы генератора. «Мягкий» режим работы генератора может быть осуществлен и при достаточно больших отрицательных расстройках  $\Delta_e$  и малых амплитудах  $x$ , когда  $x^2 S_2 \ll -S_1$ .

Рассмотрим уравнения (5) в пределах отдельной области колебаний и, предполагая, что  $\psi$  и  $G(x)$  не зависят от частоты колебаний, найдем максимум амплитуды колебаний в выходном контуре  $y_M$  по параметрам  $\psi$ ,  $k$  и  $f$ :

$$y_M^2 \cong 0,64 \frac{b^2}{c^2} \frac{S_0^2}{1 + (m + n)^2} (r + \sqrt{\zeta}) \sqrt{\frac{S_0}{S_2}}, \quad (7)$$

где

$$m = \frac{f}{d}, \quad n = \frac{\Delta}{d}, \quad r = \frac{S_1}{2\sqrt{S_0 S_2}}, \quad \zeta = \beta^2 - \frac{4b}{5c} + \frac{k_M}{S_0 d},$$

$$b = \beta(\beta + r), \quad c = 1 + \frac{2r}{5\beta}, \quad \beta = \sqrt{1 + r^2}.$$

Запишем значения параметров  $\psi_M$ ,  $k_M$  и  $m_M$ . При этом

$$\operatorname{tg} 2\psi_M = \frac{2m_M}{m_M^2 - n^2 - 1} \quad (8)$$

(8) соответствует с точностью до потерь условию баланса фаз

$$x_M - \psi_M \cong \left( 2l + \frac{1}{2} \right) \pi, \quad l = 0, 1, 2, \dots;$$

$$k_M = \frac{5c}{4b} \frac{d}{S_0} p_M,$$

где

$$p = \sqrt{(1 + (m + n)^2)(1 + (m - n)^2)}$$

и амплитуда  $x$  не слишком мала,  $\beta^2 > \frac{\rho_M d^2 - k_M^2}{S_0 dk_M}$ , и  $m_M$  из уравнения

$$(m+n)(1+(m-n)^2) = (\lambda + \mu \rho)(m-n)(1+(m+n)^2), \quad (9)$$

где

$$\lambda = 5 \frac{c}{b} \left( \sqrt{\xi} - 0,6 \frac{\beta^2}{c} \right) r, \quad \mu = \frac{25c^2}{4b^2 S_0^2}.$$

Уравнение (9) показывает, что в генераторе в общем случае возможен многочастотный режим колебаний. Одночастотный режим или режимы, когда частоты колебаний достаточно далеко разнесены, более интересны для малошумящего генератора, как соответствующие большей стабильности колебаний. Такие режимы, как следует из уравнения (9), имеют место при малых расстройках  $n^2 < 1$ , достаточно большом усилении  $S_0 > 15$  и  $|\lambda| < 1$ . Частота колебаний, соответствующая наибольшей амплитуде колебаний (7), записывается по уравнению (9) приближенно в виде

$$m_M \cong -n(1 + O(n, \lambda, 1 | S_0)).$$

Из уравнения (8) следует, в частности, что при непосредственной связи между контурами  $\psi = 0, \pi$  (7) имеет место только при  $\Delta = 0$ , т. е. когда генератор работает в режиме полного синхронизма.

Относительная амплитуда колебаний около максимума (7) при  $r \cong \cong 1 | S_0^2 \cong 0$  равна

$$\frac{y^2}{y_M^2} = \frac{1 + (\varphi - n)^2}{1 + n^2} \sqrt{5 - 4 \sqrt{\frac{(1 + \varphi(\varphi - n)^2)^2 + 4n^2}{1 + 4n^2}}}, \quad \varphi = m - m_M. \quad (10)$$

Выражение (10) характерно для генератора с двумя контурами; при малой расстройке между парциальными частотами эквивалентных контуров системы  $|\Delta| < d$  область колебаний имеет один максимум по расстройке  $\varphi$  при  $\varphi = 0$ ; второй максимум появляется при  $|\Delta| > 3d$ , он расположен около значений частотной расстройки  $\varphi \cong \Delta$  и на порядок меньше основного.

Из выражения (10) можно определить полосу частотной перестройки генератора по  $\varphi$ . Так, на уровне половинной мощности при  $\Delta = 0$  относительная ширина полосы частотной перестройки равна  $0,45 d$ , при  $|\Delta| \cong d$  она имеет максимальное значение, равное  $0,66 d$ . При «горячей» добротности контуров системы  $Q_T = 15$  имеем, соответственно, 3% и 4,4%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hrbek G., Adler R. Low noise cyclotron wave amplifier, Tubes pour hyperfrequency, Proc. of 5th Internat. co kongress on microwave tubes, Paris, 1964.
2. Ванке В. А., Саввин В. Л. «Радиотехника и электроника», 15, 2317—2321, 1970.
3. Теодорчик К. Ф. Автоколебательные системы. М., 1952.
4. Лопухин В. М., Магалинский В. Б., Мартынов В. П., Рошаль А. С. Шумы и параметрические явления в электронных приборах сверхвысоких частот. М., 1966.

Поступила в редакцию  
18.7.1973 г.

Кафедра  
радиотехники