

*М. Н. ПИВНЕНКО, А. А. ШМАТЬКО*, канд. физ.-мат. наук

**АВТОСИНХРОНИЗАЦИЯ И ПРИНУДИТЕЛЬНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ  
РЕЗОНАНСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ О-ТИПА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ**

---

Одной из важных задач при создании и разработке приборов СВЧ, последующем их применении в различных радиотехнических системах является улучшение стабильности колебаний при одновременном увеличении их мощности и снижении уровня технических и естественных шумов. Решение этой задачи может быть осуществлено за счет введения непосредственно в резонансную систему прибора дополнительного синхронизирующего сигнала или создания цепи дополнительной обратной связи. Различают два режима синхронизации: автосинхронизацию и принудительную синхронизацию. В режиме автосинхронизации сигнал снова возвращается в резонатор и воздействует на электронный пучок. В режиме принудительной синхронизации синхронизирующий сигнал подается в генератор от другого источника. Возможны комбинированные режимы.

В статье теоретически исследуются разновидности синхронизации применительно к резонансным генераторам О-типа с распределенным взаимодействием (резонансная ЛОВ, ладер-трон, ГДИ, оротрон).

В качестве математической модели резонансного генератора с внешней дополнительной обратной связью (ВДОС) и внешним синхронизирующим сигналом выберем систему уравнений, описывающую нелинейный нестационарный процесс взаимодей-

ствия электронного потока с полем, порождаемым им в резонансной системе прибора [1—3]. Цепь обратной связи будем

характеризовать коэффициентом передачи  $\tilde{\Gamma} = \Gamma e^{i\varphi}$ , где  $\Gamma$  — коэффициент отражения,  $\varphi$  — набег фазы. Тогда система уравнений для амплитуды  $F$  и разности фаз поля в резонаторе и внешнего колебания  $\psi$  при наличии дополнительной обратной связи и внешнего синхронизирующего сигнала принимает вид

$$\frac{dF}{d\tau} + F [1 - (G/\alpha(\Gamma, \varphi)) S_1(F)] = - \frac{a_c \cos(\psi - \tilde{\psi})}{(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi)^{1/2}}; \quad (1)$$

$$\frac{dF}{d\tau} + \Delta\omega - \tilde{\Delta\omega} - (G/\alpha(\Gamma, \varphi)) S_2(F) = \frac{a_c \sin(\psi - \tilde{\psi})}{F(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi)^{1/2}}. \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $S_1(F)$ ,  $S_2(F)$  — крутизна амплитудной и частотной колебательных характеристик генератора  $\tilde{S}(F) = S_1(F) + iS_2(F)$ ;  $G$  — эффективность взаимодействия [4], величина, которая характеризует глубину положительной обратной связи,  $\alpha(\Gamma, \varphi) = Q_n/Q_{n0} = [1 + K(1 + \Gamma^2)/(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi)]/(1 + K)$ ;  $Q_n$ ,  $Q_{n0}$  — нагруженная добротность резонатора с ВДОС и без нее;  $K$  — коэффициент связи резонатора и ВДОС;  $a_c$  — безразмерная амплитуда внешнего сигнала;  $\text{tg } \psi = (\Gamma \sin \varphi)/(1 - \Gamma \cos \varphi)$ ;  $\tilde{\Delta\omega} = 2Q_n \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_r}$  — относительная расстройка частоты внешнего синхронизирующего сигнала  $\omega_0$

и резонансной частоты «холодного» резонатора  $\omega_r$ ;  $\Delta\omega = (2K\Gamma \sin \varphi)/[(1 + K)/\alpha(\Gamma, \varphi)(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi)]$ .

Крутизна колебательной характеристики  $\tilde{S}(F)$  находится на основе решения нелинейного уравнения движения электронов в поле резонатора и в поле пространственного заряда пучка [1; 2; 5].

Система уравнений (1), (2) одинаково пригодна для анализа режимов: автосинхронизации ( $a_c = 0$ ), принудительной синхронизации ( $\Gamma = 0$ ) и комбинированной синхронизации ( $a_c \neq 0$ ,  $\Gamma \neq 0$ ). Режим принудительной синхронизации достаточно подробно исследован в работах [1; 2; 6; 7].

Рассмотрим последовательно влияние ВДОС на амплитудные и частотные характеристики в момент возникновения колебаний (пусковой режим), на переходной стадии их развития и в установившемся режиме.

Пусковой ток  $I_{st}$  и электронное смещение частоты в пусковом режиме получим из системы уравнений (1), (2) в предельном случае  $(F \rightarrow 0, \frac{dF}{d\tau} = \frac{d\psi}{d\tau} = 0)$ . Тогда

$$I_{st} = I_{st0} \alpha(\Gamma, \varphi); \quad \delta_{st} = \delta_{st0} + \tilde{\Delta\omega}, \quad (3)$$

где  $I_{t_{50}}$  — пусковой ток генератора в отсутствие ВДОС;  $\delta_{st0}$  — электронное смещение частоты [4]. На рис. 1 представлены зависимости  $I_{st}/I_{st0 \min}$  (сплошные линии) и  $\delta_{st}$  (штриховые линии) от величины относительного рассинхронизма ( $\Phi b \sim$  ускоряющему напряжению  $U$ ) для нескольких значений фазы  $\varphi$  и времени задержки сигнала в цепи ВДОС  $\Delta\tau$ . Возможны две ситуации: малые времена задержки  $\Delta\tau \lesssim 10 T$ ,  $T = 2\pi/\omega_r$  и большие  $\Delta\tau \sim 100 T$ . Анализ показывает, что при малых  $\Delta\tau$  наличие ВДОС приводит к одинаковому изменению значения пускового тока во всем интервале изменения рассинхронизма  $\Phi b$  (кривая 2 на рис. 1). Во втором случае, когда  $\Delta\tau$  достаточно велико, набег фазы в цепи ВДОС может приводить к резонансной зависимости пускового тока от  $\Phi b$ , причем минимальное его значение достигается в любой точке зоны генерации при соответствующей фазе  $\varphi$ . Этому случаю соответствуют кривые 3 и 4.

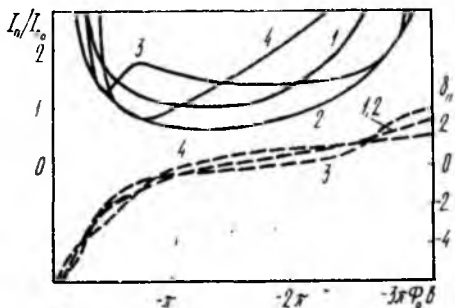


Рис. 1

Кроме этого существует область изменения  $\varphi$ , когда крутизна электронной перестройки практически во всем диапазоне изменения  $\Phi b$  остается малой величиной. Это указывает на возможность уменьшения шумов в генераторе за счет ВДОС. Такое поведение величин  $I_{st}$  и  $\delta_{st}$  при изменении набега фазы в цепи ВДОС связано с изменением эквивалентной добротности системы в целом, которая при заданном рассинхронизме  $\Phi b$  может иметь максимальное значение при оптимальном набеге фазы  $\varphi$ . Поскольку  $I_{st} \sim 1/Q$ , то это приводит в конечном счете к уменьшению пускового тока. Такой способ управления пусковыми параметрами ГДИ позволяет расширить область ускоряющих напряжений, где возможно самовозбуждение колебаний.

Другим возможным предельным случаем системы уравнений (1), (2) является стационарный режим при котором  $\frac{dF}{d\tau} = 0$ . Из (1), (2) находим уравнение для определения значений амплитуды  $F$  и разности фаз  $\psi$  для соответствующих значений расстройки  $\Delta\omega$ :

$$\Delta\omega = \Delta\omega + [G/\alpha(\Gamma, \varphi)] S_2(F) \pm \{a_c^2/F^2 (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi) - [1 - (G/\alpha(\Gamma, \varphi)) S_1(F)]^2\}^{1/2}; \quad (4)$$

$$\psi = \psi + \arctg \{[\Delta\omega - \Delta\omega - [G/\alpha(\Gamma, \varphi)] S_2(F)] / [1 - (G/\alpha(\Gamma, \varphi)) S_1(F)]\}. \quad (5)$$

Уравнение (4) определяет амплитудную резонансную характеристику генератора с ВДОС при наличии внешнего синхронизирующего сигнала, а уравнение (5) — фазовую. Проанализировав (4), (5) можно сделать вывод, что включение в схему ВДОС приводит к смещению резонансных частот за счет дополнительной расстройки частот двух сигналов в цепи ВДОС

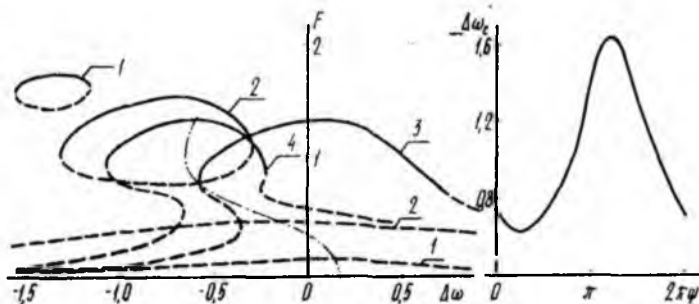


Рис. 2

и усилению или подавлению вынужденных колебаний. На рис. 2 представлены резонансные кривые (зависимость амплитуды вынужденных колебаний от расстройки частот) для ГДИ с гауссовой структурой поля в открытом резонаторе при мягком режиме возбуждения ( $\Phi b = -2\pi$ ) для различных значений набега фазы в цепи ВДОС ( $\Gamma = 0,3$ ). На этом же рисунке показана зависимость ширины полосы синхронизации  $\Delta\omega_c$  от фазы  $\varphi$ .

Устойчивость решений уравнений (1), (2) определялась согласно критерия Рауса—Гурвица. Устойчивые значения  $F$  и  $\Delta\omega$  помечены сплошными линиями, неустойчивые — штриховыми. Расчеты проводились для следующих значений фазы: 1 —  $\varphi = 0,63$ ; 2 —  $\varphi = 3,14$ ; 3 —  $\varphi = 3,77$ . Кривая 4 соответствует режиму принудительной синхронизации  $a_c = 0,51$ ,  $\Gamma = 0$  (штрихпунктирная линия — скелетная кривая). Таким образом, за счет изменения фазы в цепи ВДОС полоса синхронизации может быть расширена в 3—4 раза. Наблюдается не только количественное, но и качественное изменение характера возбуждения колебаний. Процесс установления колебаний может меняться от аperiodического к осцилляторному и наоборот, т. е. происходит изменение особых точек состояний равновесия и местоположения их на плоскости параметров  $F$  и  $\Delta\omega$ .

Время установления колебаний характеризует ширину их спектра, а при импульсном возбуждении — время фронта. Для выяснения влияния ВДОС на эти характеристики система уравнений (1), (2) решалась численно. На рис. 3 представлены зависимости амплитуды колебаний  $F$  и электронного смещения частоты  $\delta$  от времени. Кривая 1 соответствует  $\varphi = 1,26$ ; 2 —  $\varphi = 1,57$ ; 3 —  $\varphi = 2,20$ . Изменение фазы может приводить не только

к уменьшению времени установления колебаний, но и к увеличению пиковой амплитуды (кривая 1). Частотные характеристики имеют более сложную зависимость. Существуют такие  $\varphi$  (кривая 3), при которых электронное смещение частоты практически постоянно на всем интервале времени установления

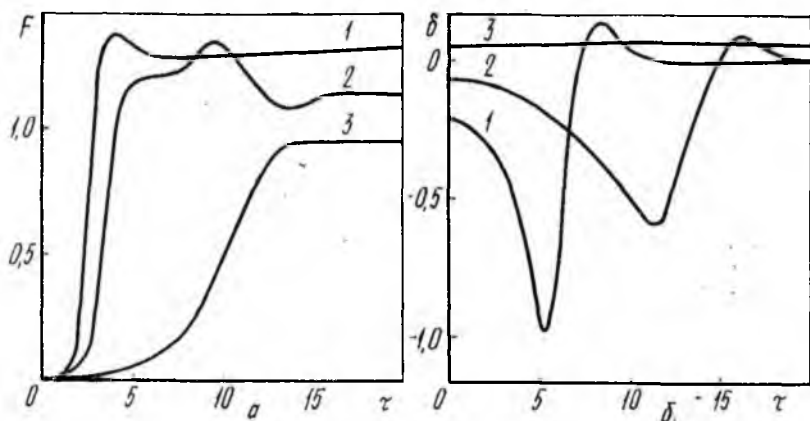


Рис. 3

амплитуды колебаний. Эти две особенности установления колебаний в генераторах с ВДОС позволяют расширить функциональные возможности резонансных генераторов О-типа с точки зрения создания источников с хорошим качеством спектра и импульсных генераторов с управляемой длительностью импульса.

Исследования показали, что есть возможность существенно улучшения ряда выходных параметров резонансных генераторов за счет введения ВДОС.

**Список литературы:** 1. Шматько А. А. Воздействие высокочастотного сигнала на резонансный автогенератор с распределенным взаимодействием О-типа//Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30, № 4. С. 761—769. 2. Шматько А. А. Синхронизация внешним сигналом резонансных генераторов О-типа с распределенным взаимодействием//Докл. АН УССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки. 1985. № 8. С. 51—54. 3. Минаев М. И. Стабилизация частоты магнетрона с внешней обратной связью//Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1980. Вып. 8. С. 58—59. 4. Вавриш Д. М., Третьяков О. А., Шматько А. А. Теория резонансных генераторов с длительным взаимодействием//Препринт ФТИНТ АН УССР. 1978. 61 с. 5. Вавриш Д. М., Третьяков О. А., Шматько А. А. Влияние поля пространственного заряда на выходные характеристики генераторов с распределенным взаимодействием О-типа//Радиотехника и электроника. 1984, Т. 29, № 8, с. 1571—1579. 6. Ефимова А. М., Шматько А. А. Воздействие малого внешнего гармонического сигнала на нелинейную распределенную систему//Радиотехника. 1985. Вып. 73. С. 119—126. 7. Вавриш Д. М. К теории синхронизации резонансных генераторов с распределенным взаимодействием//Радиотехника. 1985. Вып. 74. С. 27—29.

Поступила в редколлегию 01.09.86