

ТЕОРИЯ РЕЗОНАНСНОГО ГЕНЕРАТОРА О-ТИПА С ВНЕШНИМ СИЛОВЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ НИЗКОЧАСТОТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ.

В.В.АЛЕКСЕЕВ, Е.Н.ОДАРЕНКО, А.А.ШМАТЬКО

Введение. Тенденция развития электронных устройств СВЧ шла по пути увеличения мощности и КПД колебаний или по пути изменения их спектрального состава, начиная от одночастотных до многочастотных колебаний с непрерывным спектром. Первый и второй пути связаны с существенными конструктивными изменениями приборов. Это приводит к изменению их физических моделей при теоретическом описании электронно-волнового процесса взаимодействия. В данной работе предлагается теоретическая модель генератора с внешним силовым воздействием по высокочастотному сигналу и параметрическим воздействием по низкочастотному параметру. Такая математическая модель генератора позволяет описать довольно широкий круг явлений, происходящих в возможных реальных схемах с электронными приборами СВЧ. Более того относительно простое управление внешними параметрами силового и параметрического воздействия определяет относительную простоту создания таких устройств различного диапазона.

Физическая и математическая модель. В качестве электронного прибора СВЧ рассмотрим резонансный генератор О-типа с длительным взаимодействием (например, ГДИ-орotron, резонансная ЛОВ, клинотрон, ладдертрон и др.). Структура ВЧ поля фиксирована и определяется типом генератора. Внешний электромагнитный сигнал подается непосредственно в колебательную систему. Параметризация колебаний может осуществляться различными путями. В данной работе параметрически будет изменяться одна из величин магнитостатического фокусирующего электромагнитного поля - угол

наклона для клинотронного режима или амплитуда локальной магнитной неоднородности [1,2].

Математическая модель включает в себя самосогласованную систему уравнений: движения электронов и возбуждения электродинамической системы. Уравнения движения описывают продольное движение электронов и поперечное их смещение, вызванное конечным продольным магнитным полем и дополнительными поперечными полями (электромагнитным и статическим). Таким образом, система уравнений самосогласованного нелинейного электронно - волнового процесса для данной модели имеет вид [1-4]:

$$\frac{d\vec{m}\vec{v}}{dt} = -e\left\{\vec{E} + \vec{E}_q + \left[\vec{v} \times \vec{B}\right]\right\}. \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dt} + F[1 - GS_1(F)] &= a\cos\psi; \\ \frac{d\psi}{dt} + [\Delta\omega - GS_2(F_3)] &= \frac{a}{F}\sin\psi. \end{aligned} \quad (2)$$

Предполагается наличие двух компонент электромагнитного поля $\vec{E}$ и магнитостатического поля $\vec{B}$, т.е. рассматривается двумерная модель.

Индукция фокусирующего магнитостатического поля $\vec{B}$, нормированная на постоянное значение B_0 , предполагается известной и может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} B_y &= \cos\chi + A_m \exp\left[-((\xi - \xi_m)/W_m)^2\right]; \\ B_z &= \sin\chi + \frac{2A_m}{W_m^2} \frac{H}{L} (\xi - \xi_m)(z - z_m) \exp\left[-((\xi - \xi_m)/W_m)^2\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Все обозначения соответствуют принятым в работах [1,2]. Такое представление индукции магнитного поля является

характерным для приборов О-типа. Если угол наклона статического магнитного поля отсутствует ($\chi = 0$), то выражения (3) переходят в известные выражения для локальной магнитной неоднородности [5]. Если амплитуда локальной магнитной неоднородности $A = 0$, то выражения (2) описывают наклонное статическое поле постоянной амплитуды. При одновременном равенстве нулю величин χ и A индукция магнитного поля постоянна и направлена вдоль оси прибора.

В данной работе предполагается, что величины χ и A являются функциями времени, при чем время характерного изменения этих величин существенно превосходит период колебаний и время пролёта электронов через резонатор.

Результаты. При решении системы нелинейных уравнений был разработан численный алгоритм для нескольких пространственных распределений амплитуд высокочастотных полей в колебательной системе прибора - однородного, косинусоидального и гауссовского и двух характерных распределений фокусирующего магнитного поля - наклонного и с локальной неоднородностью. Первоначально рассчитывалась комплексная крутизна колебательной характеристики генератора $S(F) = S_1(F) + iS_2(F)$ с учетом двумерности движений электронов и наличием токооседания, как функции F и χ или F и A . Электромагнитный пучок разбивался на n слоёв в поперечном направлении, причем начальная скорость электронов в каждом слое предполагалась разной.

Предварительный анализ результатов показывает существенную зависимость $S_1(F)$ и $S_2(F)$ от χ и A при наличии токооседания на замедляющую систему. Вариация параметров χ и A может приводить к качественному изменению режима возбуждения при фиксированных начальных условиях для электронного потока. Например, мягкий режим может переходить в жесткий и наоборот.

При параметрическом изменении угла наклона вектора индукции или амплитуды локальной неоднородности фокусирующего поля во времени это приводит к возбуждению многочастотных колебаний с дискретным и непрерывным спектром.

В каждом слое число электронов, влетающих за период в колебательную систему варьировалось от 40 до 100. Число слоёв в некоторых расчетах доходило до 20. Такой подход позволяет рассмотреть процессы взаимодействия с несколькими потоками, имеющими в принципе различные начальные условия для скоростей и плотностей тока пучков. При решении дифференциальных уравнений движения и уравнений возбуждения использовался метод Рунге - Кутты.

Вещественная и мнимая части крутизны колебательной характеристики как для установившегося режима ($d/dt = 0$), так и нестационарного ($d/dt \neq 0$), рассчитывались как функции двух переменных величин F и χ или F и A при фиксированных других параметрах задачи. В общем случае считается, что F , χ и A являются функциями времени.

В качестве примера приведём результаты расчета установившихся колебаний - резонансные характеристики генератора с внешним силовым воздействием одного высокочастотного колебания, частота которого близка к частоте автоколебаний для колебательной системы с гауссовским распределением поля в открытом резонаторе (ГДИ - оротрон) для нескольких значений угла наклона χ и $A = 0$ (случай наклонного магнитостатического поля).

Резонансная кривая определялась по формулам:

$$F^2[1 - GS_1(F, \chi)]^2 + F^2[\Delta\omega - GS_2(F, \chi)]^2 = a^2;$$

$$\psi = \arctg[\Delta\omega - GS_2(F, \chi)]^2 / [1 - GS_1(F, \chi)]. \quad (4)$$

Серия графиков резонансных кривых приводится для трёх значений амплитуды внешнего сигнала и трёх значений угла наклона χ (Рис 1). Рассмотрены два характерных режима возбуждения колебаний: мягкий и жесткий (верхний и нижний ряд графиков).

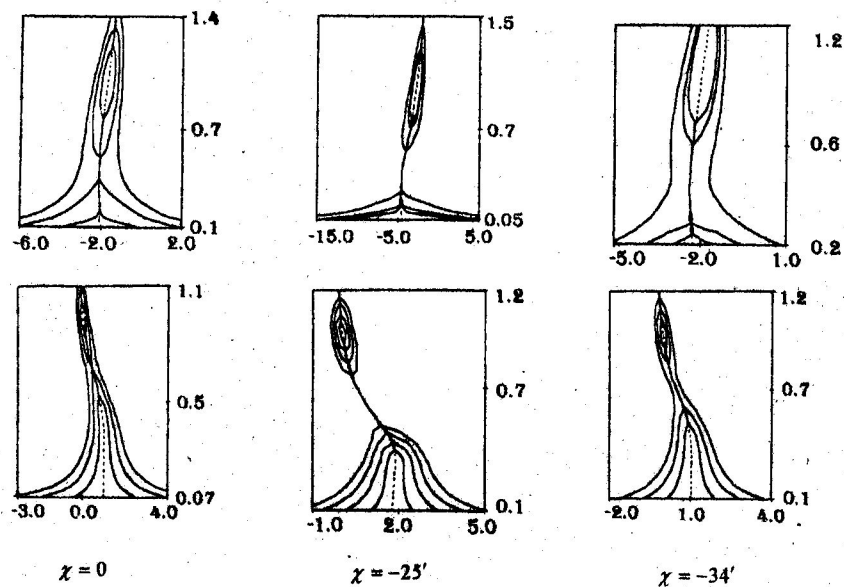


Рис 1. Резонансные кривые для различных значений амплитуды внешнего сигнала.

Из представленных графических результатов видно, что наибольшие изменения резонансных кривых наблюдаются в случае частичного токооседания электронов. Кроме этого изменением угла χ можно управлять не только шириной полосы синхронизации колебаний, но и их местоположением на частотной шкале. Амплитуда вынужденных колебаний F существенным образом зависит для выбранного режима и фиксированных параметров задачи от наклона

магнитного поля. Углублённое исследование процессов показывает количественную и качественную зависимость траекторий электронов от амплитуды A_0 и угла наклона χ . Естественно это приводит к изменению крутизны колебательной характеристики.

Выводы. Развита нелинейная самосогласованная теория резонансного генератора с внешним высокочастотным и параметрическим низкочастотным воздействием с учетом поперечных смещений электронов, токооседания и расслоения. Рассчитаны резонансные кривые генератора с высшим возбуждением для наклонного магнитного поля, указывающие на существенно нелинейную зависимость амплитуды вынужденных колебаний от параметра χ .

Список литературы: 1. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Нелинейная теория резонансных генераторов с наклонным магнитостатическим полем. // Радиотехника и электроника. Вып.9, 1993г. с.1690. 2. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Нелинейная теория СВЧ-генераторов О-типа с неоднородным магнитостатическим полем. // Радиотехника и электроника. Вып. 4, 1994г., с.653. 3. Шматько А.А. Воздействие высокочастотного сигнала на резонансный автогенератор с распределённым взаимодействием О-типа. // Радиотехника и электроника. - 1985. - т.30, N 4. - с.761. 4. Шматько А.А. Возбуждение колебаний в нелинейных электронно - волновых резонансных системах О-типа миллиметрового диапазона: Дис. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.04. - Харьков 1987. - с.392.

SUMMARY

Theory of the resonant O-type oscillator with the external signal is described within the framework of the two-dimensional model. The previous numerical results are obtained by means of solution of the initial self-consistent equations set.