

ТЕОРИЯ ГЕНЕРАТОРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

В.В.Алексеев, Е.Н.Одаренко, А.А.Шматько

*Харьковский государственный университет, радиофизический факультет, кафедра физики СВЧ,
пл. Свободы, 4, Харьков 310077, Украина.*

Поступила в редакцию 30 октября 1998 г.

Рассматривается многомерная нелинейная теория резонансного СВЧ генератора О-типа с локально - неоднородным магнитным фокусирующим полем. Используемая модель учитывает возможность подачи внешнего высокочастотного сигнала в пространство взаимодействия, а также параметрического управления характеристиками прибора посредством изменения параметров локальной магнитной неоднородности (ЛМН) фокусирующего поля. Численно исследован режим установившихся колебаний в условиях варьирования двух параметров ЛМН. Полученные результаты свидетельствуют о возможности эффективного параметрического управления характеристиками выходного сигнала приборов рассматриваемого класса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: резонансный генератор О-типа, неоднородное фокусирующее поле, комплексная крутизна колебательной характеристики, токооседание.

Параметрическое управление высокочастотными колебаниями в электронно-волновых системах СВЧ и миллиметрового диапазона связано со значительными технологическими трудностями, обусловленными высокими ускоряющими напряжениями и малыми характерными размерами колебательных систем и их элементов. Как было показано в ряде работ [1 - 2] на основе современных источников СВЧ диапазона (резонансная ЛОВ, ГДИ-орotron, клинотрон и др.) можно обеспечить относительно простое в техническом исполнении управление энергетическими и частотными выходными характеристиками за счет введения в область взаимодействия пространственно-неоднородных статических магнитных полей. Магнитная неоднородность изменяет траекторию движения электронов, которые на различных участках пространства взаимодействия могут попадать в область действия слабого или сильного СВЧ поля. Это, в свою очередь, приводит к изменению эффективности энергообмена между пучком и полем. Таким образом можно эффективно управлять формой выходного сигнала генератора, параметрически изменяя одну из величин магнитной неоднородности, например, ее амплитуду или местоположение. В данной работе как раз и рассматривается такой случай. Построена математическая модель преобразователя и разработан алгоритм расчета выходных высокочастотных колебаний.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование электронно - волновой системы проводится при характерных для данного класса приборов приближениях, обусловленных высокой добротностью используемой электродинамической системы [3]. Рассматривается нерелятивистский случай. Компоненты двумерного высокочастотного электрического поля замедленной волны представим в виде:

$$E_y = C f(y) \Psi(z) \exp[i(\beta y - \omega t)]; \quad (1)$$

$$E_z = i E_y;$$

где y и z - продольная и поперечная координата соответственно (ось Oz перпендикулярна плоскости замедляющей системы); C - комплексная амплитуда высокочастотного поля; $f(y)$ - функция, описывающая продольное распределение амплитуды высокочастотного поля в резонаторе. Для приборов типа ГДИ-орotron $f(y)$ имеет гауссовскую форму. Поперечное распределение амплитуды поля описывается формулой: $\Psi(z) = \exp(-\beta z)$; $\beta = \omega / v$; ω - частота автоколебаний; v - фазовая скорость синхронной с пучком пространственной гармоникой СВЧ-поля; t - время.

Фокусирующее магнитостатическое поле также полагается двумерным:

$$\vec{B} / B_0 = (0, B_y, B_z)$$

$$B_y = 1 + A_m \exp\left[-((\xi - \xi_m) / w_m)^2\right]; \quad (2)$$

$$B_z = \frac{2A_m}{w_m^2} \frac{H}{L} (\xi - \xi_m)(Z - Z_m) \exp\left[-((\xi - \xi_m) / w_m)^2\right], \quad (3)$$

где A_m, ξ_m, w_m - параметры ЛМН (нормированные амплитуда, координата центра ЛМН и радиус «пятна» ЛМН соответственно); w_m представляет собой нормированную на L полуширину гауссиана на уровне, где его величина уменьшается в e раз по сравнению с максимальным значением; B_0 - индукция «невозмущенного» магнитостатического поля; L - длина пространства взаимодействия; H - масштабный множитель; $\xi = y / L$; $Z = z / H$; Z_m - константа, характеризующая поперечную неоднородность фокусирующего поля.

Исходная самосогласованная система уравнений генератора с внешним высокочастотным воздействием состоит из векторного уравнения движения заряженной частицы и уравнений возбуждения:

$$\begin{aligned} \frac{dm\vec{v}}{dt} &= -e\{\vec{E} + \vec{E}_q + [\vec{v} \times \vec{B}]\}; \\ \frac{dF}{d\tau} + H[1 - GS_1(F)] &= a\cos\psi; \\ \frac{d\psi}{d\tau} + [\Delta\omega - GS_2(F)] &= \frac{a}{F}\sin\psi, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vec{E} = (0, E_y, E_z)$ - вектор высокочастотного электрического поля; $m, \vec{v}, e$ - масса, скорость и заряд электрона соответственно; $\vec{E}_q$ - поле пространственного заряда, в данной работе учитывается только его статическая часть; F - нормированная амплитуда автоколебаний. τ - безразмерное нормированное время; G - параметр эффективности взаимодействия, характеризующий величину положительной обратной связи в генераторе: $\Delta\omega = 2Q(\omega - \omega_r') / \omega_r''$ - относительная величина расстройки частот; ω_r' и ω_r'' - действительная и мнимая части комплексной собственной частоты резонатора; $S(F) = S_1(F) + iS_2(F)$ - комплексная крутизна колебательной характеристики генератора. Q - нагруженная добротность электродинамической системы. a - амплитуда внешнего сигнала, ψ - разность фаз между автоколебанием и внешним сигналом. Систему уравнений (4) необходимо дополнить соответствующими начальными условиями.

В данной работе основное внимание уделено стационарному случаю ($d/d\tau = 0$). Исследуется влияние гармонического изменения амплитуды ЛМН на выходные характеристики прибора в отсутствие внешнего высокочастотного воздействия ($a = 0$). Резонансные характеристики прибора с внешним силовым воздействием ($a \neq 0$) в установившемся режиме рассмотрены ранее в работе [4]. Фокусирующее поле считается достаточно сильным, чтобы траектории электронов можно было считать прямолинейными в случае $A_m = 0$.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты численных расчетов представлены на рис. 1. По оси абсцисс на рисунках отложено нормированное время, по оси ординат - амплитуда колебаний F (сплошные кривые) и значения параметра A_m (штриховые кривые). Все графики выполнены в едином масштабе, расчеты проведены для фиксированного значения рабочего тока пучка.

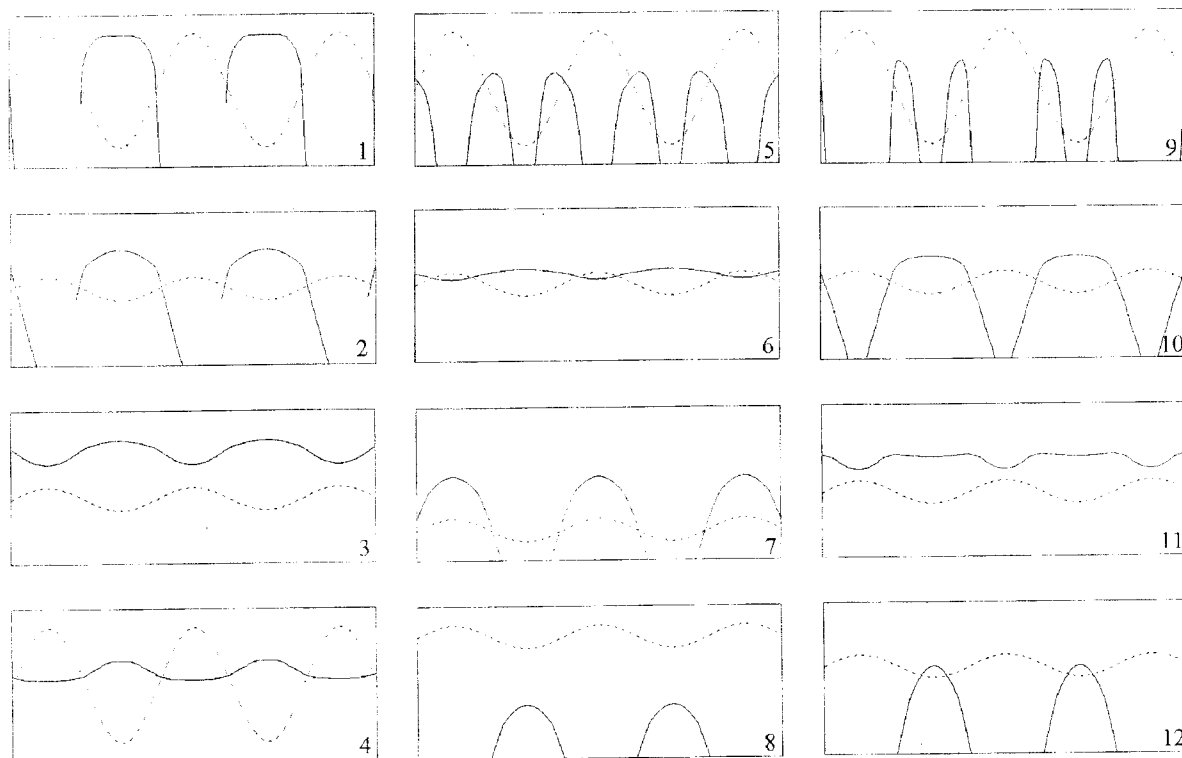


Рис. 1. Амплитуды параметрических автоколебаний.

Графики 1-4 построены для $\xi_m = 0,8$; графики 5-8 - для $\xi_m = 0,5$; графики 9-12 - для $\xi_m = 0,25$. Величина A_m изменяется от -0,25 до 0,25 на графиках 1,4,5 и 9; от -0,05 до 0,05 на графиках 2,6 и 10; от -0,1 до 0 на графиках 2 и 11; от 0 до 0,1 на графике 12; от -0,25 до -0,15 на графике 7; от 0,15 до 0,25 на графике 8.

Расчеты производились для двух режимов возбуждения колебаний - «мягкого» (графики 4-12) и «жесткого» (графики 1-3). Из графиков, представленных на рис. 1, следует, что, в зависимости от набора параметров ЛМН, реализуются качественно различные зависимости амплитуды автоколебаний от времени. Получены как непрерывные, так и разрывные зависимости, что свидетельствует о существенных изменениях условий электронно - волнового взаимодействия в процессе изменения параметров неоднородности фокусирующего поля. В частности, при расположении центра ЛМН в середине пространства взаимодействия (графики 5-8) наблюдается несколько вариантов временных зависимостей амплитуды F . Незначительные отклонения параметра A_m от нулевого значения приводят к непрерывной зависимости амплитуды от времени (график 6). В этом случае траектории электронов искажаются слабо и существенного изменения пускового тока не происходит.

Иная ситуация наблюдается при смещении параметра A_m в отрицательную или положительную область значений (графики 7 и 8 соответственно). Здесь реализуются разрывные временные зависимости амплитуды выходного сигнала. Причем срывы генерации наблюдаются при максимальных положительных или отрицательных значениях параметра A_m . Такой же вывод можно сделать и на основании результатов, представленных на графике 5 в случае наибольшего размаха значений A_m .

Отмеченные эффекты обусловлены явлениями, характерными для двумерных моделей электронно - волнового взаимодействия, - оседанием электронов пучка на поверхность замедляющей системы и поперечной неоднородностью высокочастотных полей. В области магнитной неоднородности с

отрицательным значением параметра A_m траектории электронов приближаются к замедляющей системе, т.е. реализуется возможность токооседания. При положительных A_m траектории частиц, наоборот, удаляются от замедляющей системы. В рассматриваемой ситуации ($\xi = 0,5$) оба эти явления приводят к снижению эффективности взаимодействия (увеличению пускового тока). Токооседание - из-за уменьшения количества электронов, взаимодействующих с высокочастотным полем, а удаление пучка от замедляющей системы - из-за экспоненциального снижения амплитуды высокочастотного поля, с которым взаимодействуют частицы.

Следует отметить, что смещение центра ЛМН к коллекторному концу замедляющей системы при наибольшем размахе зависимости A_m от времени сопровождается преобразованием формы выходного сигнала из разрывной в непрерывную (график 4). В этом случае существенное искажение траекторий электронов происходит за пределами области наиболее интенсивного высокочастотного поля («пятна» гауссиана) и пусковой ток изменяется незначительно при варьировании величины A_m .

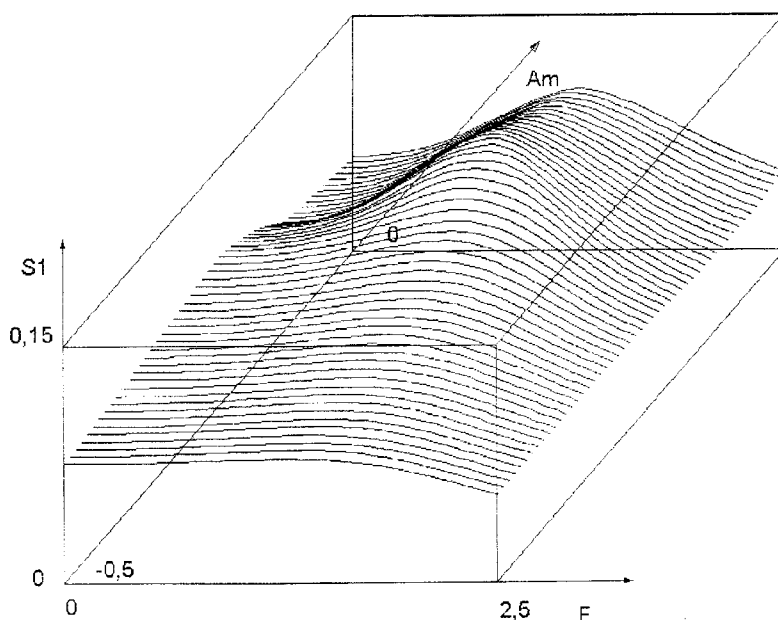


Рис 2. Крутизна амплитудных колебательных характеристик генератора.

При определенных условиях дополнительным фактором, оказывающим влияние на форму выходного сигнала, является колебательный гистерезис. Графики на рис. 2 иллюстрируют изменение режима возбуждения автоколебаний («мягкий» или «жесткий») при изменении параметра A_m . Колебательный гистерезис наблюдается в «жестком» режиме возбуждения, поэтому именно в этом случае реализуются несимметричные зависимости амплитуды колебаний (графики 1 и 2 на рис.1).

ВЫВОДЫ

Проведено теоретическое исследование электронного прибора с параметрическим управлением посредством изменения во времени амплитуды неоднородности фокусирующего поля. Выявлены основные физические причины обнаруженных явлений. Полученные результаты позволяют разрабатывать новые схемы управления выходными характеристиками приборов рассматриваемого класса на основе применения неоднородных фокусирующих полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. // Радиотехника и электроника. 1993г. Вып. 9. С. 1690-1695.
2. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. // Радиотехника и электроника. 1994г. Вып. 4. С. 653-661
3. Вайнштейн Л.Н., Солнцев В.А. // Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М. Советское радио 1973г.
4. Алексеев В.В., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. // Вестник ХГУ. 1998г. №405. С. 118-123.