

УДК 537.87

## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА МНОГОМОДОВОГО ГИРОТРОНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

В. Л. Бакунин, Г. Г. Денисов, Ю. В. Новожилова

Институт прикладной физики Российской академии наук,  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова. 46

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2019 г.

**Аннотация.** Теоретически исследована возможность управления частотой излучения мощного многомодового гиротрона при воздействии внешнего сигнала с гармонически меняющейся частотой или амплитудой, а также двух монохроматических сигналов. Эти задачи актуальны для различных практических приложений, таких как подавление неустойчивостей плазмы в токамаках и стеллараторах, спектроскопия, а также создание в перспективе комплекса когерентно излучающих гиротронов. Найдены условия, при которых происходит захват частоты и фазы рабочей моды внешним сигналом. В этом случае имеет место генерация на рабочей моде с периодически меняющейся частотой и амплитудой. Исследованы режимы, наблюдающиеся при выходе из зон захвата. Расчеты проведены на примере разработанного в ИПФ гиротрона мегаваттного уровня мощности на частоте 170 ГГц с рабочей модой  $TE_{28,12}$ .

**Ключевые слова:** многомодовый гиротрон, нелинейная конкуренция мод, захват частоты, управление спектром.

**Annotation.** The possibility of controlling the radiation frequency of a powerful multimode gyrotron under the influence of an external signal with a harmonically varying frequency or amplitude, as well as two monochromatic signals, has been theoretically studied. These tasks are important for various practical applications, such as suppressing plasma instabilities in tokamaks and stellarators, spectroscopy, as well as creating a complex of coherently emitting gyrotrons in the future. The conditions are found when the frequency and phase of the operating mode are locked by an external signal. In this case, generation occurs at the operating mode with a

periodically changing frequency and amplitude. The regimes observed at the exit from the locking zones are investigated. The calculations were carried out on the example of a megawatt power level gyrotron developed at IAP at a frequency of 170 GHz with an operating mode  $TE_{28,12}$ .

When the gyrotron is exposed to an external signal with a harmonically changing frequency close to the frequency of the operating mode, the frequency of this mode can be locked. The frequency control are possible if the changes in the frequency of the external signal are quite slow compared to the locking time, and the instantaneous frequency of the external signal lies within the locking band at all times. If the frequency of the external signal leaves the locking band, beating of the operating mode or excitation of spurious modes occur.

Under the influence of an amplitude-modulated signal with a harmonically changing amplitude or two monochromatic external signals, periodic changes in the frequency and amplitude of the operating mode occur with a period of signal amplitude modulation. If the beat of the amplitude of the external signal is rather deep and slow in the locking time scale, and if there are no free-running single-mode operation for the specified gyrotron parameters, decay into spurious modes takes place. If the amplitude fluctuations are sufficiently small, the parasitic modes are not excited.

When changes in the frequency and amplitude of the external signal are rapid in the locking time scale, parasitic modes are not excited, because the amplitude and frequency of radiation do not have time to track changes in the parameters of an external signal and fluctuate in a small range of values.

**Key words:** multimode gyrotron, nonlinear mode competition, frequency locking, spectrum control.

## **Введение**

Вопросы захвата частоты мощного многомодового гиротрона внешним сигналом являются объектом исследований на протяжении нескольких десятилетий. В ранних работах рассматривались достаточно простые одно- и двухмодовые модели гиротронов [1,2]. В последние годы интерес к таким

задачам возрос в связи с разработкой и созданием синтезированного квазиоптического преобразователя [3,4], позволяющего вводить внешний сигнал в резонатор гиротрона в виде рабочей моды.

В гиротроне с таким преобразователем появляется возможность стабилизации частоты излучения при воздействии монохроматического сигнала или управления частотой при изменении параметров внешнего сигнала [5]. Данная работа посвящена исследованию возможности управления частотой и режимами генерации в мощном гиротроне под воздействием сигнала с гармонически промодулированной частотой или амплитудой, а также под воздействием двух монохроматических сигналов. Подобные задачи рассматривались для одномодовых генераторов типа Ван-дер-Поля с квадратичной нелинейностью [6-8]. Кроме того, экспериментально и теоретически исследовался гиротрон с одной с гармонически колеблющимся отражателем [9,10]. Во всех этих задачах при периодическом изменении параметров внешнего или отраженного сигнала частота и амплитуда излучения тоже менялись периодически. Однако в многомодовом гиротроне есть специфические черты, которые не рассматривались в указанных работах – это прежде всего возможность возбуждения паразитных мод при изменении параметров внешнего сигнала. Как было показано ранее [11-13], в мощных гиротронах с достаточно густым спектром мод в полосе циклотронного резонанса нелинейная конкуренция оказывает существенное влияние на режим генерации как в автономном режиме, так и под воздействием внешнего сигнала.

### **1. Модель и уравнения. Сценарии выхода из зоны захвата при воздействии монохроматического сигнала**

Рассмотрим модель гиротрона в приближении фиксированной продольной структуры поля, справедливом при высокой добротности резонатора. Предполагаем, что внешний сигнал поступает из выходного волновода. Его мощность невелика по сравнению с максимально достижимой мощностью автономной генерации, частота близка к частоте рабочей моды, поперечные структуры сигнала и рабочей моды одинаковые. Такой внешний сигнал

линейно связан только с рабочей модой, но через нелинейность высокочастотного тока электронного пучка влияет на все остальные моды резонатора, лежащие в полосе циклотронного резонанса. Ток, напряжение, питч-фактор и циклотронная расстройка меняются в соответствии с реально используемым сценарием включения. Модель описывается уравнениями

$$\frac{2Q_s}{\bar{\omega}_s} \frac{dF_s}{dt} + F_s + i \frac{2Q_s}{\bar{\omega}_s} (\omega - \omega_0) F_s - 2i\delta_{s0} B_{in}(t) e^{i\varphi(t)} = iI_s F_s \chi_s \quad (1)$$

$$\frac{dp}{d\zeta} + i\tilde{a}(\tilde{\Delta} + |p|^2 - 1)p = i\tilde{b} \sum_s F_s f(\zeta) \exp(i\Phi_s), \quad (2)$$

где  $F_s$  – безразмерные комплексные амплитуды мод,  $B_{in}(t)$ ,  $\varphi(t)$  – соответственно модуль и фаза безразмерной комплексной амплитуды внешнего сигнала,  $s$  – номер моды, номер рабочей моды принят равным нулю,  $Q_s$  – добротности мод,  $\omega_0$  – собственная частота рабочей моды,  $\omega$  – средняя частота внешнего сигнала,  $\delta_{s0}$  – символ Кронекера,

$$\chi_s = \frac{1}{F_s} \tilde{c} \int_0^{\zeta_{ex}} f^*(\zeta) \langle \langle p \rangle_g \exp(-i\Phi_s) \rangle_\psi d\zeta \quad (3)$$

- электронная восприимчивость для  $s$ -й моды,  $\Phi_s = (\omega_s - \omega_0)t - (m_s - m_0)\psi$  – фаза  $s$ -й моды относительно фазы рабочей моды,  $\omega_s$  – собственные частоты мод,  $m_s$  – их азимутальные индексы,  $p$  – безразмерный поперечный импульс электрона. На входе в пространство взаимодействия электроны равномерно распределены по фазам циклотронного вращения  $\vartheta$  :  $p(\zeta = 0) = \exp(i\vartheta)$ ,  $0 \leq \vartheta < 2\pi$ ,  $\tilde{\Delta}$  – безразмерная расстройка циклотронного резонанса,  $\zeta$  – безразмерная продольная координата,  $\psi$  – азимутальная координата,  $I_s$  – параметр тока для  $s$ -й моды, параметры с с тильдой  $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}$  меняются в процессе включения напряжения, в конце процесса включения они

равны единице,  $f(\zeta)$  - продольная структура поля, которая предполагается одинаковой для всех мод. Все безразмерные величины определены в [11,13].

Уравнения (1),(2) решались численно на примере гиротрона на частоте 170ГГц мегаваттного уровня мощности, работающего на моде  $TE_{28,12}$ , разработанного в ИПФ РАН. Рассматривалось взаимодействие семи мод, частоты которых лежат внутри полосы циклотронного резонанса:  $TE_{26,12}$ ,  $TE_{27,12}$ ,  $TE_{28,12}$ ,  $TE_{29,12}$ ,  $TE_{30,12}$  эквидистантного спектра и мод  $TE_{-25,13}$ ,  $TE_{-26,13}$  с противоположным направлением вращения полей.

Как было показано в работах [11,13], при захвате частоты рабочей моды монохроматическом внешним сигналом в результате подавления паразитных мод становится возможной генерация в области оптимального тока и расстройки циклотронного резонанса (т.е. расстройки между собственной частотой рабочей моды и циклотронной частотой). При этом в рассматриваемом гиротроне повышаются максимально достижимые токи и поперечный КПД (с 61% до 80%), а также в несколько раз увеличивается полоса перестройки частоты генерации по сравнению с автономным гиротроном. Если разность частоты внешнего сигнала и частоты автономной генерации достаточно велика, происходит выход из режима захвата. При этом в гиротроне, параметры которого (ток и расстройка циклотронного резонанса) соответствуют области, где существует автономная одномодовая генерация, паразитные моды не возбуждаются даже при выходе из режима захвата, и наблюдаются биения частоты и амплитуды рабочей моды. В области параметров, где в отсутствие внешнего сигнала одномодовая генерация на рабочей моде невозможна, при выходе частоты внешнего сигнала из полосы захвата возбуждаются паразитные моды.

## **2. Воздействие на гиротрон сигнала с гармонически меняющейся частотой.**

Если в гиротрон поступает внешний сигнал с гармонически меняющейся частотой, то в (1)  $B_{in}(t) = const$ , а медленная фаза и отклонение мгновенной

частоты сигнала от ее среднего значения  $f_{ext} = \omega/2\pi$  зависят от времени по гармоническому закону:

$$\varphi(t) = \varphi_0 - \varphi_{mod} \cos(2\pi t / T_{mod}), \quad (4)$$

$$\tilde{f}_{ext}(t) = \varphi'_t / 2\pi = \Delta f_{mod} \sin(2\pi t / T_{mod}) \quad (5)$$

Для интерпретации воздействия квазимонохроматического сигнала на гиротрон удобно пользоваться амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) рабочей моды гиротрона в режиме захвата частоты монохроматическим сигналом – зависимостью амплитуды излучения от разности частоты сигнала  $f_{ext}$  и собственной частоты рабочей моды  $f_0 = \omega_0/2\pi$  – и представить изменения частоты внешнего сигнала как скольжение вдоль АЧХ (рис. 1).

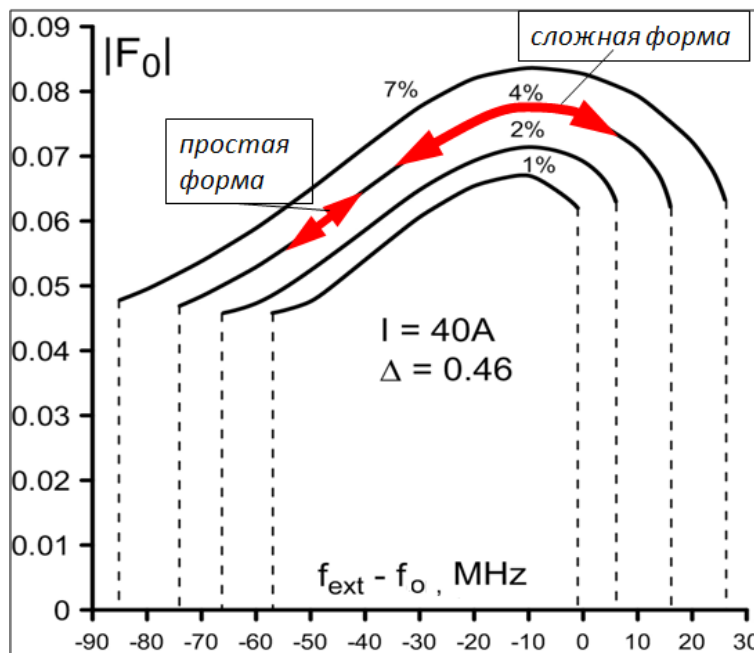


Рис. 1. Скольжение по АЧХ гиротрона при воздействии внешнего сигнала с периодически промодулированной частотой. Разные АЧХ соответствуют внешнему сигналу с разным уровнем мощности, в процентах указано отношение мощности внешнего сигнала к максимально достижимой мощности автономной одномодовой генерации  $P_{ext} / P_{0rad}$ . Напряжение  $U=100$  кВ, ток  $I=40A$ , расстройка  $\Delta=0.46$ .

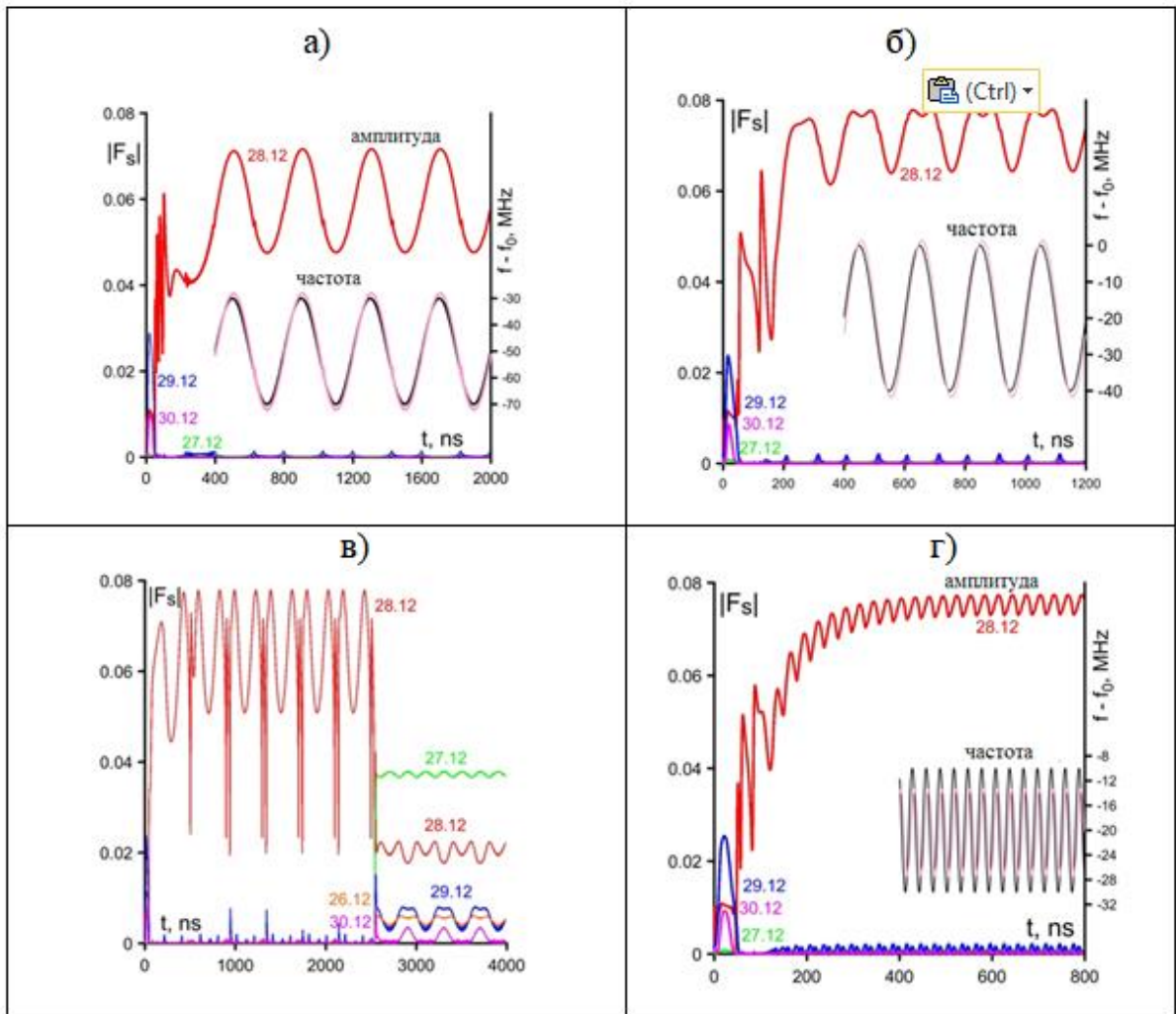


Рис.2. Осциллограммы модулей комплексных амплитуд мод, частот сигнала и излучения на рабочей моде в случае гармонической модуляции частоты сигнала при  $U = 100kV$ ,  $I = 40 A$ ,  $\Delta = 0.46$ ,  $P_{ext} / P_{0rad} = 4\%$ , а)  $f_{ext} - f_0 = -50 M\ddot{A}\ddot{o}$ ,  $\Delta f_{mod} = 20 MГц$ ,  $T_{mod} = 400 нс$ ; б)  $f_{ext} - f_0 = -20 MГц$ ,  $\Delta f_{mod} = 20 MГц$ ,  $T_{mod} = 200 нс$ ; в)  $f_{ext} - f_0 = -20 MГц$ ,  $\Delta f_{mod} = 40 MГц$ ,  $T_{mod} = 400 нс$ ; г)  $f_{ext} - f_0 = -20 MГц$ ,  $\Delta f_{mod} = 10 MГц$ ,  $T_{mod} = 30 нс$ . На осциллограммах частот кривые черного цвета соответствуют сигналу, красного – излучению. Величина  $f$  для красной кривой равна мгновенной частоте излучения  $f_0 + (d(arg F_0)) / 2\pi$ , для черной – мгновенной частоте сигнала  $f_{ext} + \tilde{f}_{ext}$ . Цифрами на рисунке указаны индексы мод.

Если изменения частоты медленные в масштабе времени захвата, и интервал изменения частоты сигнала лежит внутри полосы захвата, то мгновенные частоты сигнала и излучения совпадают. Поскольку характерное время захвата обратно пропорционально ширине полосы захвата при малых сигналах, условие малости времени захвата по сравнению с периодом  $T_{mod}$

означает, что основная часть спектра внешнего сигнала (центральные гармоники, интенсивность которых много больше, чем у высоких гармоник), лежит внутри полосы захвата. При этом форма модуляции амплитуды может быть как достаточно простой, так и более сложной, в зависимости от того, попадает ли максимум АЧХ в область изменения мгновенной частоты сигнала. Если при изменении частоты амплитуда излучения проходит максимум АЧХ, то форма модуляции сложная, в случае, когда амплитуда рабочей моды остается на монотонном участке АЧХ, форма модуляции простая (Рис. 1, 2а,б).

При увеличении размаха колебаний частоты сигнала и выходе мгновенной частоты сигнала за пределы полосы захвата возникают биения и могут возбуждаться паразитные моды (рис. 2в). Если период изменения частоты сигнала  $T_{mod}$  сравним или меньше времени захвата, изменения амплитуды и частоты излучения не успевают отслеживать изменения частоты сигнала, интервал изменений частоты излучения мал по сравнению с интервалом изменения частоты сигнала, амплитуда излучения также колеблется в малом интервале значений (рис. 2г).

### **3. Воздействие на гиротрон внешнего сигнала с гармонически меняющейся амплитудой или двух внешних монохроматических сигналов**

Сигнал с постоянной фазой комплексной амплитуды и гармонически меняющимся модулем этой амплитуды

$$B_{in}(t) = B_0 \left( 1 + \varepsilon \sin(2\pi t / T_{mod}) \right), \varphi = \varphi_0 \quad (6)$$

можно рассматривать как сумму трех монохроматических сигналов: сильного центрального и двух симметрично отстоящих по частоте слабых сателлитов. Поэтому для объяснения возникающих под воздействием такого сигнала эффектов представим биения амплитуды внешнего сигнала (6) либо как периодическое движение поперек амплитудно-частотных характеристик, соответствующих разным значениям мощности внешнего сигнала, либо как воздействие трех монохроматических сигналов с разной мощностью (рис.3).



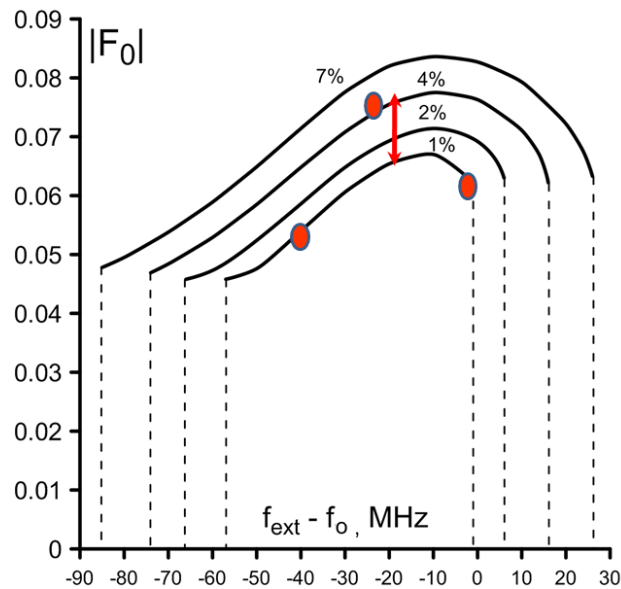


Рис.3. Интерпретация гармонической амплитудной модуляции сигнала: периодическое движение поперек АЧХ, соответствующих разным уровням мощности сигнала (красная стрелка) или одновременно действующие на гиротрон три монохроматических сигнала (три красные точки) при  $U = 100kV$ ,  $I = 40 A$ ,  $\Delta = 0.46$ .

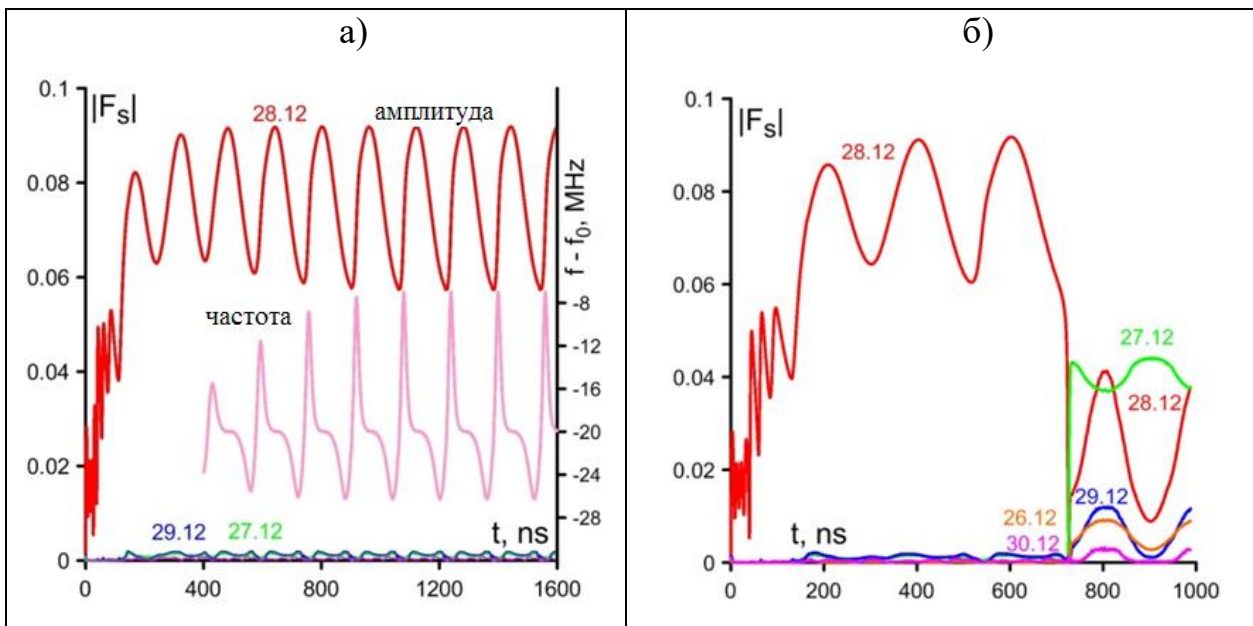


Рис.4. Осциллограммы модулей комплексных амплитуд мод (а,б) и частоты рабочей моды (а) в случае гармонической модуляции амплитуды сигнала при  $U = 100kV$ ,  $\varepsilon = 0.6$ ,  $T_{mod} = 100нс$ ,  $P_{ext} / P_{0rad} = 4\%$ ,  $I = 40 A$ ,  $\Delta = 0.5$ ,  $f_{ext} - f_0 = -20 MГц$ ; а)  $T_{mod} = 160нс$ , б)  $T_{mod} = 200нс$ .

Если рабочая точка, соответствующая центральной частоте, лежит внутри зоны захвата и внутри зоны одномодовой автономной генерации, то происходят периодические изменения частоты и амплитуды рабочей моды, а паразитные

моды не возникают или очень малы. Это связано с тем, что даже в минимуме амплитуды внешнего сигнала, когда захвата нет, возможна генерация на единственной рабочей моде. Если же рабочая точка, соответствующая центральной частоте сигнала, лежит в зоне захвата, но не в зоне автономных одномодовых колебаний, то режимы могут быть различными в зависимости от глубины модуляции амплитуды и периода модуляции (рис. 4). При малой глубине модуляции амплитуды или при малом в масштабе времени захвата периоде модуляции паразитные моды не возбуждаются, при этом амплитуда и частота рабочей моды периодически промодулированы (рис. 4а). При глубокой достаточно медленной модуляции возбуждаются паразитные моды (рис.4б).

При воздействии на гиротрон двух монохроматических сигналов

$$B_{in}(t)e^{i\varphi(t)} = B_0(1 + 0.5\varepsilon \exp(i2\pi t/T_{mod}))e^{i\varphi_0} \quad (7)$$

происходят процессы, аналогичные воздействию трех монохроматических сигналов, но менее выраженные при одинаковых значениях  $\varepsilon$  и  $T_{mod}$ . Если амплитуда обоих сигналов одинакова ( $\varepsilon = 2$ ) происходят глубокие, до нуля, биения амплитуды внешнего сигнала. Если эти биения медленные в масштабе времени захвата, то в каждый момент времени частота и амплитуда излучения успевают отслеживать изменения внешнего сигнала. В моменты времени, когда амплитуда внешнего сигнала находится на дне биений, захвата нет, и режим гиротрона определяется циклотронной расстройкой на средней частоте  $\Delta$  и током. Если эти параметры лежат вне области одномодовой автономной генерации, происходит возбуждение паразитных мод (рис.5а). В случае, когда один из сигналов слабее основного сигнала и (или) сильно отстроен от него по частоте, (т.е. колебания амплитуды достаточно быстрые) происходит захват частоты гиротрона более сильным сигналом, а слабый сигнал приводит лишь к периодическим изменениям частоты и амплитуды поля излучения на рабочей моде (рис.5б).

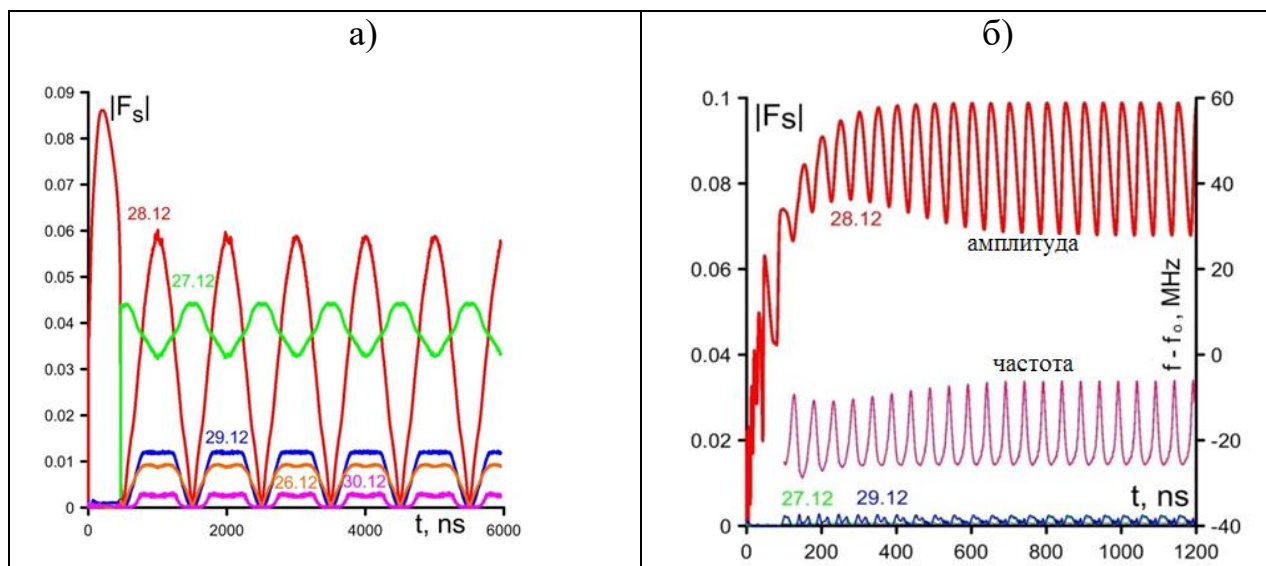


Рис.5. Осциллограммы модулей комплексных амплитуд мод (а,б) и частоты рабочей моды (б) в случае гармонической модуляции амплитуды сигнала при  $U = 100kV$ ,  $P_{ext1}/P_{0rad} = 4\%$ ; а)  $f_{ext1} - f_0 = -20 МГц$ ,  $f_{ext2} - f_0 = -19 МГц$ ,  $T_{mod} = 1000нс$ ,  $\varepsilon = 2$ ,  $I = 40 A$ ,  $\Delta = 0.5$ ; б)  $f_{ext1} - f_0 = -20 МГц$ ,  $f_{ext2} - f_0 = -40 МГц$ ,  $T_{mod} = 50нс$ ,  $\varepsilon = 1$ ,  $I = 50 A$ ,  $\Delta = 0.52$ .

Приведенные выше рассуждения подтверждаются разбиением плоскости двух параметров: глубины модуляции амплитуды  $\varepsilon$  и периода колебаний внешнего сигнала  $T_{mod}$  (рис. 6) на области одномодовой и многомодовой (с паразитными модами) генерации. Разбиение выполнено при таком токе и циклотронной расстройке  $\Delta$ , когда не существует автономных одномодовых колебаний. Кривая, разделяющая плоскость параметров амплитуды бокового сателлита  $\varepsilon$  и периода изменений внешнего сигнала  $T_{mod}$ , на области одномодовой и многомодовой генерации лежит для двух сигналов выше, чем для трех (рис.6).

Заметим, что если период модуляции амплитуды сравним или меньше времени захвата, то как и в случае модуляции частоты внешнего сигнала, изменения частоты и амплитуды излучения не успевают отслеживать изменения амплитуды внешнего сигнала и происходят в меньшем интервале (рис. 5б).

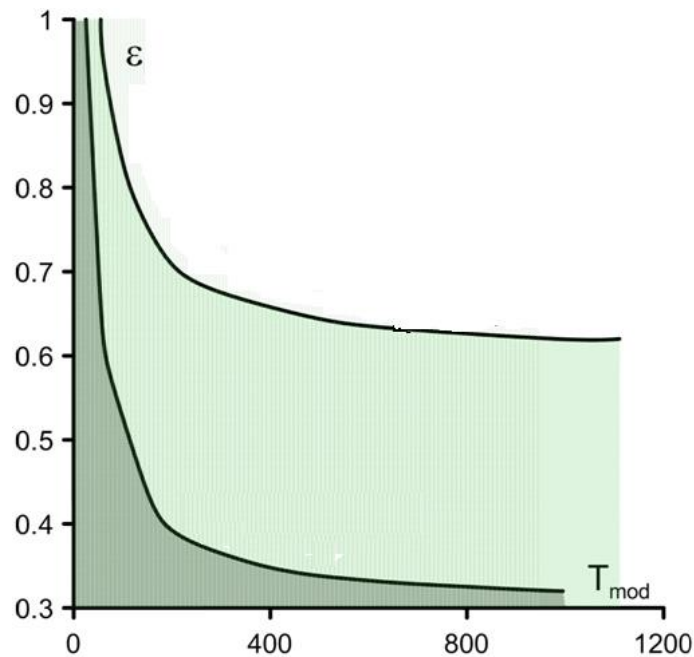


Рис.6. Кривые, разделяющие плоскость параметров  $\varepsilon$  и  $T_{mod}$  на зоны одномодовой генерации (под кривыми), и возбуждения паразитных мод (над кривыми) при  $P_{ext}/P_{0rad} = 4\%$ ,  $U = 100kV$ ,  $f_{ext} - f_0 = -20 МГц$ ,  $I = 50 А$ ,  $\Delta = 0.52$ . Нижняя кривая соответствует амплитудной модуляции сигнала, верхняя – двум монохроматическим сигналам.

## Выводы

При воздействии на гиротрон внешнего сигнала с гармонически меняющейся частотой, близкой к частоте рабочей моды, может происходить захват частоты колебаний этой моды, когда мгновенная частота излучения отслеживает изменения частоты внешнего сигнала, а амплитуда излучения оказывается промодулированной во времени с периодом модуляции частоты внешнего сигнала. Захват и управление частотой возможны, если изменения частоты внешнего сигнала достаточно медленные по сравнению с временем захвата, и мгновенная частота внешнего сигнала лежит внутри полосы захвата во все моменты времени. Если частота внешнего сигнала выходит из полосы захвата, возникают биения рабочей моды или возбуждение паразитных мод.

При воздействии амплитудно-модулированного сигнала с гармонически меняющейся амплитудой или двух монохроматических внешних сигналов происходят периодические изменения частоты и амплитуды рабочей моды с

периодом модуляции амплитуды внешнего сигнала. Если биения амплитуды внешнего сигнала достаточно медленные в масштабе времени захвата и глубокие, и если при заданных параметрах гиротрона автономных одномодовых колебаний не существует, происходит распад на паразитные моды, амплитуды которых также меняются периодически. Если же колебания амплитуды достаточно малы, паразитные моды не возбуждаются.

При быстрых в масштабе времени захвата изменениях как частоты, так и амплитуды внешнего сигнала паразитные моды не возбуждаются, т.к. амплитуда и частота излучения не успевают отслеживать изменения параметров внешнего сигнала и колеблются в небольшом интервале значений.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант №19-79-30071.

### Литература

1. Ергаков В.С., Моисеев М.А., Хижняк В.И. К теории синхронизации МЦР-монотрона. *Радиотехника и электроника*. 1978. № 12. С.2591-2599.
2. Нусинович Г.С.. К теории синхронизации многомодовых электронных СВЧ-генераторов. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975. Т.18. No 11. С.1689.
3. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. Perspective gyrotron with mode converter for co- and counter-rotation operating modes. *Applied Physics Letters*. 2015. Vol.106. P.263501. DOI: [10.1063/1.4923269](https://doi.org/10.1063/1.4923269)
4. Бакунин В.Л., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г., Зайцев Н.И., Запевалов С.А., Куфтин А.Н., Новожилова Ю.В., Фокин А.П., Чирков А.В., Шевченко А.С. Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности. *Письма в ЖТФ*. 2018. Т.44. №11. С.38-45.
5. Novozhilova Yu.V., Denisov G.G., Bakunin V.L. Dynamics of Multimode Gyrotron Locked by Quasi-Monochromatic External Signal. *Proc. of 44 Int. Conf. on Infrared Millimeter and Terahertz Waves*. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2019.8874580](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874580)

6. Воронин Э.С. О синхронизации автогенератора модулированной внешней силой. *Радиотехника*. 1959. Т.14. №2. С.48-56.
7. Мартыненко Д.П., Хохлов Р.В. О захватывании автогенератора амплитудно-модулированной внешней силой. *Радиотехника и электроника*. 1957. №8. С.1001-1011.
8. Яковлев В.П. Синхронизация автогенератора слабомодулированной внешней силой. *Радиотехника и электроника*. 1961. №10. С.1609-1616.
9. Kharchev N., Coppa A., Malakhov D., Mart'inez J., Konchekov E., Tolkachev A., Borzosekov V., Sarksyun K., Petelin M. Influence of controlled reflected power on gyrotron performance. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2015. Vol.36. No.12. P.1145–1156. DOI: [10.1007/s10762-015-0206-0](https://doi.org/10.1007/s10762-015-0206-0).
10. Фернандез А., Харчев Н.К., Новожилова Ю.В., Батанов Г.М., Бондарь Ю.Ф., Колик Л.В., Сарксян К.А., Толкачѳв А.В. Реакция гиротрона на малое отражение от нестационарной нагрузки. *Прикладная физика*. 2009. №6. С.158-165 .
11. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. Зоны захвата частоты многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощностью внешним сигналом. *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2015. Т. 58. № 12. С.999-1011.
12. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators. *Physics of Plasmas*. 2015. Vol.22. P.033101-1-5.
13. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В., Фокин А.П. Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом. *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2016. Т.5. №8-9. С.709-719.

**Для цитирования:**

Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. Нелинейная динамика многомодового гиротрона под воздействием внешнего квазимонохроматического сигнала. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/1/text.pdf>  
 DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.1