

СОВМЕСТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ВКЛЮЧАЯ РЕЖИМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ, В ГИРОГЕНЕРАТОРАХ СО ВСТРЕЧНОЙ ВОЛНОЙ И СВЯЗАННЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

© 2004 г. А. А. Короновский, Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов

Поступила в редакцию 01.11.2002 г.

Впервые исследована синхронизация колебаний в гиrolампах со встречной волной со связанными волноведущими системами (гиро-ЛВВ СВС). Показано, что в gyro-ЛВВ СВС наблюдается два устойчивых бистабильных состояния, установление которых определяется характером возбуждения колебаний в системе. Изучены характеристики совместных пространственно-временных колебаний в связанной системе. Рассмотрены физические процессы, сопровождающие переход связанных распределенных автоколебательных систем в режим синхронизации.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание привлекают вопросы генерации и усиления высокочастотного электромагнитного излучения при взаимодействии винтовых электронных пучков с бегущими волнами волноводов (мазеры на циклотронном резонансе) [1–10]. Подобные системы, основанные на взаимодействии с прямой волной (гиrolампа с бегущей волной – gyro-ЛВВ) и обратной (встречной) волной (гиrolампа со встречной волной – gyro-ЛВВ) рассматриваются как одни из наиболее перспективных усилителей и генераторов миллиметрового диапазона длин волн. В представленной работе рассматривается модель, основанная на использовании взаимодействия встречной волны с электронами-осцилляторами винтового пучка. В такой системе (гиро-ЛВВ) при выполнении условия синхронизма электронной и встречной электромагнитной волн в регулярном волноводе

$$\omega \approx \hat{\omega}, \quad \hat{\omega} - \beta_0(\hat{\omega})v_{\parallel} - \omega_c = 0 \quad (1)$$

имеет место генерация высокочастотного излучения [11–16]. Здесь $\hat{\omega}$ – частота синхронизма, ω_c – циклотронная частота, v_{\parallel} – продольная скорость электронов, то есть скорость, направленная вдоль приложенного магнитного поля, $\beta_0(\hat{\omega}) = \pm \frac{\omega_{кр}}{c} \sqrt{(\omega/\omega_{кр})^2 - 1}$ – постоянная распространения в волноводе без электронного потока, $\omega_{кр}$ – критическая частота рассматриваемой моды (см. дисперсионную диаграмму рис. 1).

Гиrolампа со встречной волной отличается возможностью получения генерации с мощностью до нескольких десятков мегаватт в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн с легко перестраиваемой частотой излучения за

счет изменения продольной скорости электронов или статического магнитного поля [1, 17]. Неприятной особенностью gyro-ЛВВ является сравнительно низкий коэффициент полезного действия (КПД), максимальное значение которого порядка 20% [18]. Столь низкий КПД связан с особенностями взаимодействия электронов-осцилляторов пучка с высокочастотным полем вдоль пространства взаимодействия: высокочастотная (ВЧ) мощность распространяется навстречу пучку, и электроны-осцилляторы группируются в сильном выходном поле. Быстро сгруппировавшись, пучок также быстро

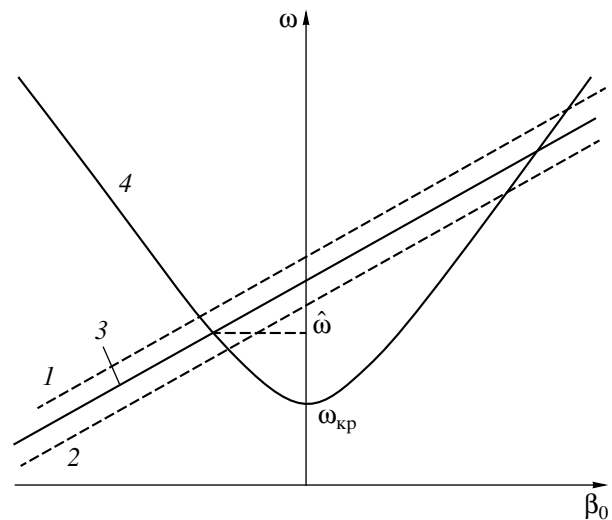


Рис. 1. Дисперсионная диаграмма пучка и волноводной моды при реализации генерации на встречной волне в мазере на циклотронном резонансе: 1 и 2 – соответственно дисперсионные линии медленной I_M и быстрой I_B электронных волн, 3 – дисперсионная линия, соответствующая винтовому пучку, 4 – дисперсионная линия волноводной моды $\omega = \sqrt{\omega_{кр}^2 + \beta_0^2 c^2}$

разгруппировывается, не успев отдать всю свою энергию. Далее происходит образование вторичного фазового сгустка на длине системы. В результате характерными для гиро-ЛВВ оказываются многогорбые распределения тока и поля, которые обусловлены многократной перегруппировкой пучка [8, 19]. Как следствие, с увеличением длины системы или тока пучка в гиро-ЛВВ быстро возникает автомодуляция выходного сигнала – спектр генерации становится многочастотным [18, 19]. Одним из путей повышения выходной мощности с сохранением одночастотной генерации может стать использование связанных гиро-ЛВВ, в которых связь осуществляется за счет использования связанных волноведущих систем (СВС). В связанных электродинамических системах имеет место распределенная связь, реализующаяся за счет воздействия поля электромагнитной волны одной из гиро-ЛВВ на пучок в другой гиролампе вдоль всего пространства взаимодействия. Связанные волноведущие системы в гиро-ЛВВ могут быть реализованы, например, за счет введения связи между двумя круглыми волноводами с помощью щелей, направленных вдоль распространения бегущих электромагнитных волн в каждой из электродинамических систем. Параметры связи могут изменяться путем увеличения расстояния между структурами или ширины щели связи.

Использование СВС в приборах с длительным взаимодействием рассматривалось в усилителях и генераторах *O*-типа (ЛВВ) и лампе обратной волны (ЛОВ) [20–22]. Отметим, что в усилителях и генераторах с длительным взаимодействием СВС возможна генерация сложного стохастического сигнала, что делает систему связанных гиро-ЛВВ возможным источником узкополосного хаотического сигнала в миллиметровом диапазоне длин волн.

В данной работе с помощью численного моделирования в рамках предложенной математической модели исследуются автоколебания в связанных гиро-ЛВВ СВС и, в частности, анализируются синхронизация автоколебаний и сложные совместные колебательные режимы в связанной системе.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Получим уравнения, описывающие усиление и генерацию сигнала в связанных гиро-ЛВВ СВС. Предположим, что электромагнитное поле в поперечном сечении электронного пучка однородно. Пренебрежем взаимодействием электронов-осцилляторов винтового пучка с ВЧ составляющими магнитного поля, что означает постоянство продольной скорости потока $v_{\parallel} \approx \text{const}$. Будем также считать, что в рабочей полосе частот можно учитывать взаимодействие винтового пучка только со встречной волной. Тогда для амплитуд полей E_1 и E_2 напряженностей электрических по-

лей двух слабосвязанных волноведущих систем, через каждую из которых пропускается винтовой электронный пучок, в стационарном случае можно записать [23, 24]

$$\frac{dE_1}{dx} + j\beta_0 E_1 + \alpha_1 E_2 = i_1, \quad (2)$$

$$\frac{dE_2}{dx} + j\beta_0 E_2 + \alpha_2 E_1 = i_2, \quad (3)$$

где величины $i_{1,2}$ пропорциональны амплитудам ВЧ токов винтовых электронных пучков, $\alpha_{1,2}$ – параметры связи.

Вследствие идентичности систем $|\alpha_1| = |\alpha_2| = \hat{\alpha}$, а из закона сохранения потока мощности при $i_1 = i_2 = 0$ следует, что $\alpha_1 = -\alpha_2^* = j\hat{\alpha}$.

Перепишем уравнения (2) и (3) в форме нормальных волн:

$$\frac{dE_M}{dx} + j(\beta_0 + \hat{\alpha})E_M = i_1 + i_2, \quad (4)$$

$$\frac{dE_S}{dx} + j(\beta_0 - \hat{\alpha})E_S = i_1 - i_2, \quad (5)$$

где $E_M = E_1 + E_2$ – амплитуда “медленной” нормальной волны (ее постоянная распространения $\beta_M = \beta_0 + \hat{\alpha}$; β_0 – постоянная распространения встречной волны на частоте “холодного” синхронизма) и $E_S = E_2 - E_1$ – амплитуда “быстрой” ($\beta_S = \beta_0 - \hat{\alpha}$) нормальной волны связанной системы.

Перейдем в системе уравнений (4)–(5) к новым переменным $\hat{E}_S = E_S \exp[-j\beta_S x]$ и $\hat{E}_M = E_M \exp[-j\beta_M x]$ и используем следующую нормировку переменных. Пусть $\xi = \beta_0(\hat{\omega})\epsilon x$ – безразмерная координата и $\tau = \hat{\omega}\epsilon(t - x/v_{\parallel})(1 + v_{\parallel}/|v_g|)^{-1}$ – безразмерное время; $F_{S,M} = \hat{E}_{S,M}/2\epsilon^2 V_0 \beta_0$; $I_{1,2} = (2i_{1,2}/\beta_0^2 KI_0) \exp[-j\beta_0 x]$; $\alpha = \hat{\alpha}/\beta_0 \epsilon$, где $\epsilon = \sqrt{I_0 K/4V_0(1 + v_{\perp 0}^2/v_{\parallel}^2)}$ – параметр взаимодействия; K – сопротивление связи; $v_{\perp 0}$ – начальная поперечная скорость электронов.

Тогда, осуществляя переход от стационарных уравнений к нестационарным [25], получаем следующую систему уравнений в безразмерных переменных относительно медленно меняющихся комплексных амплитуд быстрой и медленной волн:

$$\frac{\partial F_M}{\partial \tau} - \frac{\partial F_M}{\partial \xi} = -I_M, \quad (6)$$

$$\frac{\partial F_S}{\partial \tau} - \frac{\partial F_S}{\partial \xi} = -I_S, \quad (7)$$

которая определяет полевую часть задачи об усилении и генерации сигналов в гиро-ЛВВ СВС. Нормальные волны $F_{S,M}$ системы связаны с поля-

ми $F_{1,2}$ каждой из волноредущих систем соотношениями вида

$$\begin{aligned} F_m &= (F_1 + F_2)\exp(j\alpha\xi), \\ F_6 &= (F_2 - F_1)\exp(-j\alpha\xi). \end{aligned} \quad (8)$$

Медленная и быстрая волны тока $I_{6,m}$ введены по аналогии с выражениями (8) и определяются как

$$\begin{aligned} I_m &= (I_1 + I_2)\exp(j\alpha\xi), \\ I_6 &= (I_2 - I_1)\exp(-j\alpha\xi). \end{aligned} \quad (9)$$

Система уравнений (6)–(7) решается при следующих начальных и граничных условиях

$$F_{1,2}(\xi, \tau = 0) = f_{1,2}^0(\xi), \quad F_{1,2}(\xi = A, \tau) = 0, \quad (10)$$

где A – безразмерная длина системы; функция $f_{1,2}^0$ описывает начальное распределение полей вдоль длины каждой из ламп.

Рассмотрим теперь электронную часть задачи. Уравнения движения электронов слаборелятивистских винтовых пучков в электромагнитном поле были впервые получены в работах [14, 15]. В наших переменных для пучков, пропускаемых через каждую из электродинамических систем, они записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\beta_1}{d\xi} - j\mu_1(1 - |\beta_1|^2)\beta_1 &= \\ = \frac{1}{2}(F_m \exp[-j\alpha\xi] - F_6 \exp[j\alpha\xi]), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\beta_2}{d\xi} - j\mu_2(1 - |\beta_2|^2)\beta_2 &= \\ = \frac{1}{2}(F_m \exp[-j\alpha\xi] + F_6 \exp[j\alpha\xi]), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\beta_{1,2} = r_{1,2}\exp[j\theta_{1,2}]$ – комплексный радиус траекторий электронов каждого из электронных пучков, первоначально равномерно распределенных по фазе относительно ВЧ поля $\beta_{1,2}(\xi = 0) = \exp[j\theta_0]$ ($\theta_0 \in [0, 2\pi]$); $\mu_{1,2}$ – параметры неизохронности электронов-осцилляторов соответственно первого и второго потока. Параметр неизохронности связан с релятивистской зависимостью массы электронов от энергии и определяет меру инерционности системы. Амплитуды ВЧ токов пучков $I_{1,2}$, пропускаемых через каждую из волноредущих структур, определяются соотношениями

$$I_{1,2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \beta_{1,2} d\theta_0. \quad (13)$$

Таким образом, управляющими параметрами сформулированной модели являются длина системы A , параметры неизохронности $\mu_{1,2}$ и коэффициент связи α между волноредущими структурами.

Отметим, что если рассматривается система с постоянным током пучка I_0 , то при постоянных $\mu_{1,2}$ изменение A соответствует изменению длины системы l . При неизменной длине l и изменении A за счет изменения тока I_0 постоянные значения сохраняют параметры $(\mu_{1,2}A)$.

2. МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ И ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ ГИРО-ЛВВ

Рассмотрим результаты моделирования динамики giro-ЛВВ СВС с помощью нелинейных нестационарных уравнений (6)–(12). Уравнения решались численно с использованием метода “крупных частиц”, двухшаговой схемы “предиктор-корректор” для интегрирования уравнений движения и схемы Лакс–Вендроффа для интегрирования уравнения возбуждения нормальных волн (уравнения в частных производных), которые имеют второй порядок точности [26, 27].

Исследование показало, что в связанных через волноредущие системы giro-ЛВВ имеет место мультистабильность (точнее, бистабильность), когда в зависимости от начальных условий связанная система приходит к одному из двух устойчивых состояний, которые характеризуются различными распределениями ВЧ-поля и тока вдоль пространства взаимодействия и, соответственно, различными выходными мощностями и КПД генерации.

Каждое из состояний соответствует преимущественному возбуждению в начальный момент времени либо быстрой, либо медленной нормальной волны связанной системы, что наиболее просто достичь путем задания начальных условий в виде

$$\begin{aligned} F_m(\tau = 0, \xi) &= \delta^0 \cos(\pi(A - \xi)/2), \\ F_6(\tau = 0, \xi) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

или

$$\begin{aligned} F_m(\tau = 0, \xi) &= 0, \\ F_6(\tau = 0, \xi) &= \delta^0 \cos(\pi(A - \xi)/2), \end{aligned} \quad (15)$$

где δ^0 – амплитуда начального возмущения.

Состояние, которое будет реализовываться в системе при задании в начальный момент времени распределений вида (14) (т.е. при преимущественном возбуждении медленной нормальной волны), назовем медленным, а то, которое реализуется при задании распределения (15) – быстрым.

Для иллюстрации мультистабильности в giro-ЛВВ СВС на рис. 2 представлены распределения ВЧ тока и поля в одной из связанных giro-ЛВВ, построенные при одинаковых управляющих параметрах, но различных начальных условиях, задаваемых выражениями (14) и (15) соответственно. Из представленных зависимостей F_1 и I_1 видно, что

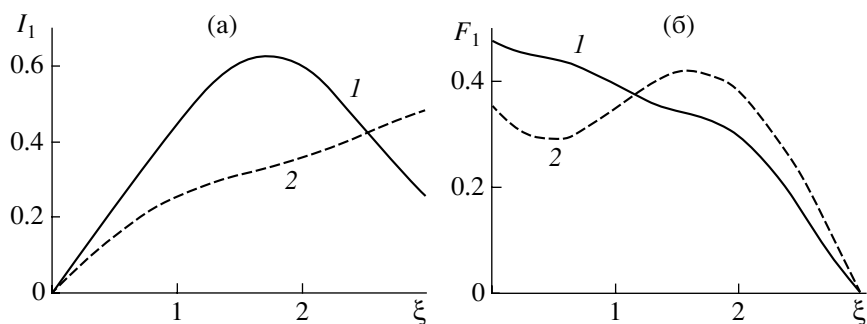


Рис. 2. Стационарные распределения ВЧ-тока I_1 и поля F_1 при $A = 3.0$, $\mu_1 = 2.0$, $\mu_2 = 3.0$, и $\alpha = 0.8$ и различных начальных условиях: (14) (а) и (15) (б); 1 – быстрое состояние, 2 – медленное. Амплитуда начального возмущения $\delta^0 = 0.01$.

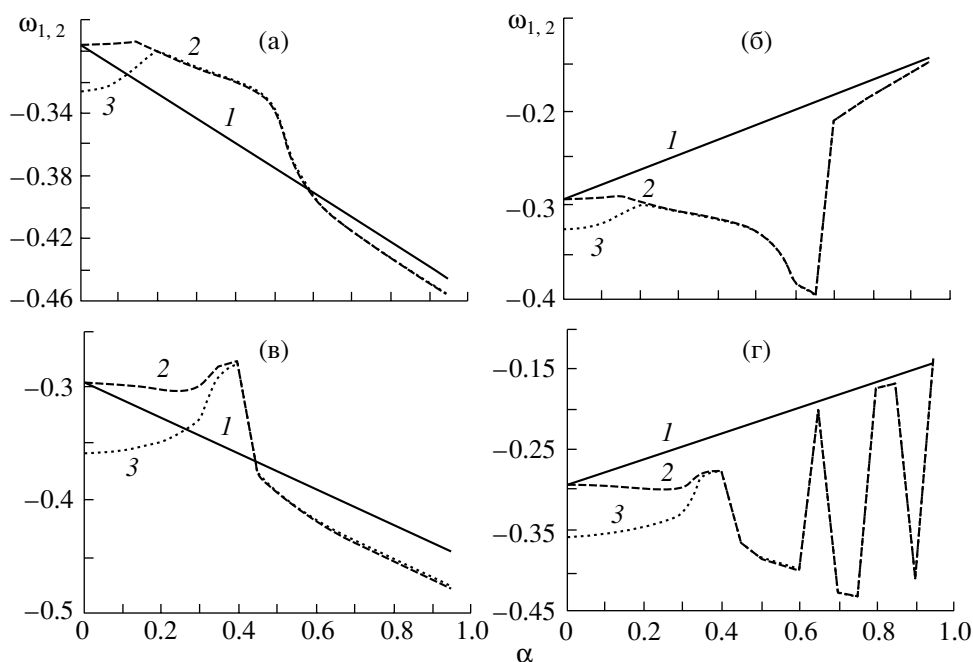


Рис. 3. Зависимости частоты генерации каждой из связанных gyro-LVB СВС от коэффициента связи для длины системы $A = 3.0$ (а, б) и 4.0 (в, г) для быстрого (а, в) и медленного (б, г) состояний системы. Кривая 1 – частота генерации в случае $\mu_1 = \mu_2 = 2.0$, кривая 2 соответствует гиролампе с параметром $\mu_1 = 2.0$, кривая 3 – $\mu_2 = 3.0$.

в связанной системе при одинаковых управляющих параметрах реализуются принципиально различные режимы генерации, характеризуемые топологически различными распределениями амплитуд тока и поля в зависимости от того, какая из нормальных волн (медленная или быстрая) в начальный момент времени $\tau = 0$ преобладает.

Для различных мультистабильных состояний различаются частоты ВЧ совместных колебаний связанной системы. На рис. 3 представлены зависимости частоты колебаний (сплошная линия) при изменении коэффициента связи α между волноведущими структурами для быстрого и медленного состояний связанной системы при одинаковых управляющих параметрах gyro-LVB ($\mu_1 = \mu_2 = 2.0$).

Видно, что с увеличением связи частота генерации в быстром состоянии уменьшается, а в медленном – наоборот, растет. Такое поведение частоты генерации связано с видом дисперсионной кривой волновода. Введение связи между волноведущими структурами изменяет скорость распространения нормальных волн системы. Дисперсионная линия медленной волны I_M , поддерживаемой электронным пучком, располагается выше дисперсионной линии пучка $\omega - \beta_0 v_{\parallel} - \omega_c = 0$ (см. рис. 1, кривая 1), следовательно, частота синхронизма электромагнитной и медленной нормальной волн больше, чем электромагнитной и электронной волн в случае отсутствия связи. Обратная ситуация складывается при преимущественном возбуждении быст-

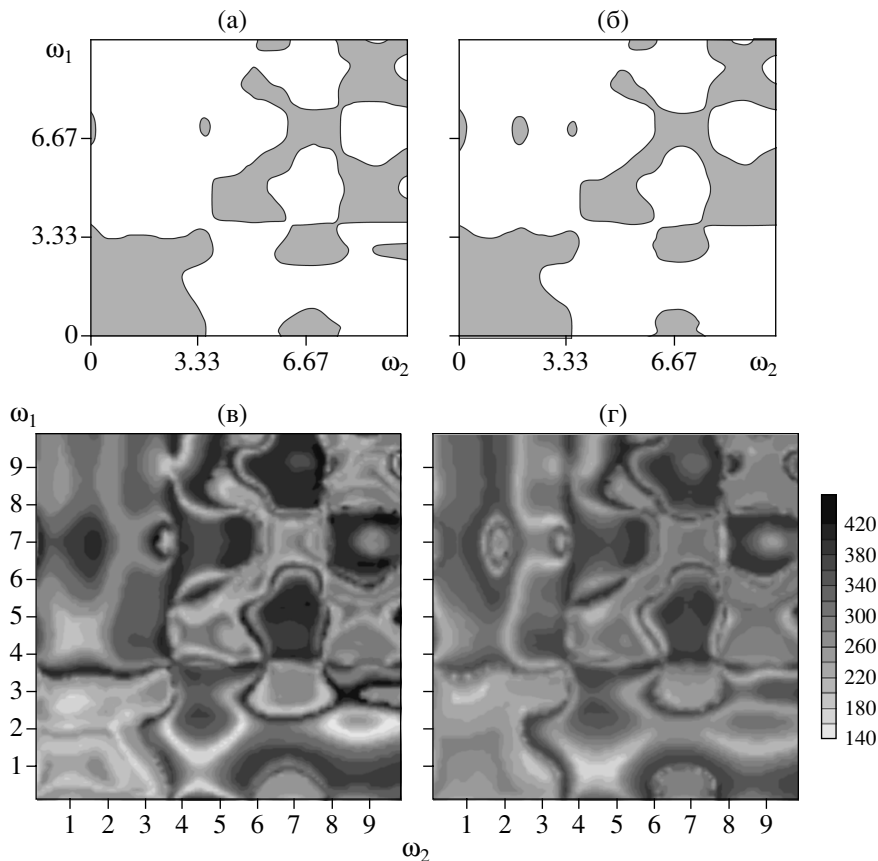


Рис. 4. Бассейны притяжения медленного (белая область) и быстрого (серая область) состояний (а, б) и длительность переходного процесса, приводящего к этим состояниям, системы связанных giro-ЛВВ СВС на плоскости начальных условий (f_1, f_2) (см. формулу (16)) для $\alpha = 0.8$ (в) и 1.0 (г)

рой нормальной волны I_6 – в этом случае дисперсионная линия располагается ниже дисперсионной линии пучка (см. рис. 1, кривая 2) и частота генерации меньше, чем в несвязанной системе.

Следует отметить, что обнаруженное явление мультистабильности (бистабильности) в системе двух связанных giro-ЛВВ аналогично хорошо известным в теории колебаний и волн процессу конкуренций колебаний, когда установление вида колебания определяется начальными условиями [28]. Явление мультистабильности подробно описано как для простейших динамических систем (отображений) [29, 30], так и для распределенных автоколебательных систем, в том числе нелинейной оптики и СВЧ-электроники (лазеры на свободных электронах, гиротроны с нефиксированной структурой поля и т.п.) [31–33].

Задание начальных условий в виде (14) или (15) не дает возможности изучить, какое из состояний установится при произвольном виде начального возмущения полей в связанных линиях передачи. Поэтому вызывает интерес рассмотреть некоторый класс начальных распределений полей в связанных линиях передачи, не ограничиваясь

преимущественным возбуждением в начальный момент медленной (14) или быстрой (15) волны. Для изучения бассейнов притяжения каждого из устойчивых (медленного и быстрого) состояний giro-ЛВВ СВС нами было выбраны начальные условия следующего вида:

$$\begin{aligned} F_1(\tau = 0, \xi) &= \delta^0 \sin(\omega_1 \pi(1 - \xi)/2), \\ F_2(\tau = 0, \xi) &= \delta^0 \sin(\omega_2 \pi(1 - \xi)/2), \end{aligned} \quad (16)$$

Исследование установления бистабильных состояний осуществлялось при $A = 3.0$, $\mu_1 = 2.0$, $\mu_2 = 3.0$ и различных коэффициентах связи α .

На рис. 4а–г на плоскости (ω_1, ω_2) показаны конфигурации бассейнов притяжения медленного и быстрого состояния системы, а также длительность T_t переходного процесса для двух значений коэффициента связи. Длительность переходного процесса на рисунках отмечена градиентами серого цвета. Его длительность в условных единицах (100 условных единиц соответствует примерно 10 периодам высокочастотных колебаний) показана на шкале рядом с рисунками. Из рис. 4 следует, что границы областей “притяжения” каждого

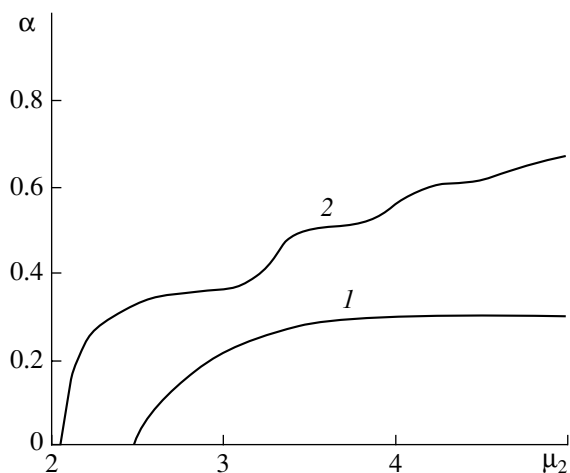


Рис. 5. Области синхронизации совместных колебаний гиро-ЛВВ СВС на плоскости “параметр неизохронности μ_2 – коэффициент связи α ”, построенные при $\mu_1 = 2.0$; $A = 3$ (1) и 4 (2).

из состояния связанной системы при достаточно произвольном выборе начальных распределений высокочастотных полей $F_{1,2}(\tau = 0, \xi)$ имеют сложный вид, поэтому без использования специальных мер для предпочтительного возбуждения медленной или быстрой нормальной волны вопрос об установлении того или иного режима генерации в связанной системе является сложной задачей.

Из рис. 4 следует также, что длительность установления режима стационарной генерации в связанной системе очень сильно зависит от выбора начальных условий. Отметим сразу, что длительность переходного процесса резко возрастает на границах областей притяжения медленного и быстрого состояния гиро-ЛВВ СВС. Однако и внутри областей притяжения каждого из устойчивых состояний длительность переходного процесса сложным образом зависит от начальных условий. Ранее подобная сложная зависимость длительности переходных процессов от начальных условий была обнаружена в работах [34, 35] для систем с дискретным временем с малым числом степеней свободы (отображений). На карте длительностей переходных процессов (рис. 4) можно четко выделить те начальные условия, которые соответствуют минимальной длительности установления режима стационарной генерации (белые области, в которых длительность переходных процессов составляет менее 10 периодов высокочастотных колебаний). Отметим, что средняя длительность $\langle T_i \rangle$ переходного процесса по ансамблю начальных условий вида (16) медленно растет с ростом коэффициента связи α . Одновременно уменьшается разница между максимальной и минимальной длительностью переходного процесса. Так, с увеличением коэффициента связи в 2 раза

(с $\alpha = 0.5$ до $\alpha = 1.0$ средняя длительность переходного процесса увеличивается примерно на 10%).

3. СИНХРОНИЗАЦИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ГИРО-ЛВВ СВС

Изучим синхронные режимы связанных гиро-ЛВВ СВС. На рис. 5 на плоскости управляющих параметров (μ_2, α) показаны зоны квазисинхронизации для различных значений безразмерной длины лампы A . Режимы квазисинхронизации в автоколебательных системах сверхвысокочастотной электроники, согласно работам [9, 10, 36], названы неавтономные динамические режимы, для которых характерен захват базовой частоты в спектре генерации внешним сигналом. При этом амплитуда колебаний может вести себя достаточно сложно, демонстрируя режимы как периодической, так и хаотической автомодуляции.

Области квазисинхронизации совместных колебаний в связанных гиро-ЛВВ СВС располагаются выше соответствующей линии на плоскости параметров. В области квазисинхронизации базовые частоты высокочастотной генерации каждой из гиро-ЛВВ после переходного процесса устанавливаются равными друг другу: $\omega_1 = \omega_2$. При этом амплитуды $|F_{1,2}|$ выходных полей каждой из гиро-ЛВВ могут демонстрировать различные сложные колебательные режимы.

Области синхронных колебаний совпадают как для быстрого, так и для медленного состояний системы, поэтому рис. 5 справедлив при задании начальных условий как в виде (14), так и (15). Частоты синхронных колебаний различаются для быстрого и медленного состояния связанной системы (см. рис. 3, кривые 2 и 3). Сравнение рис. 3 а, в и рис. 3 б, г показывает, что частоты синхронных колебаний отличаются в различных мультистабильных состояниях и стремятся с ростом коэффициента связи к частоте генерации, близкой к средней частоте $f \approx (f(\mu_1) + f(\mu_2))/2$ автономных режимов генерации при параметрах неизохронности μ_1 и μ_2 . Отметим также, что в области квазисинхронизации для “медленного” состояния связанной системы характерными оказываются скачки частоты выходного сигнала при изменении управляющих параметров каждой из парциальных систем, а также связи между ними (см. рис. 3б, г)¹. Появление скачков определяется конкуренцией быстрой и медленной нормальных волн системы, и как следствие, перескоками связанной системы при небольшом изменении управляющих параметров (в данном случае коэффициента связи α) между быстрым и медленным состоянием гиро-ЛВВ СВС. При этом такие скачки наблюдаются

¹ Скачки частоты генерации сопровождаются скачками амплитуды выходных сигналов каждой из связанных гиро-ЛВВ.

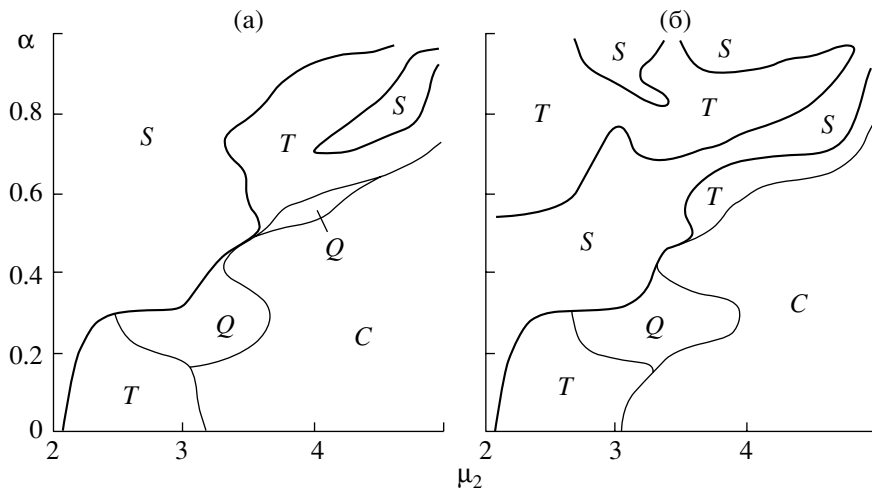


Рис. 6. Области стационарной генерации и автомодуляции выходного сигнала совместных колебаний giro-ЛВВ СВС на плоскости “параметр неизохронности μ_2 – коэффициент связи α ”, построенные при $\mu_1 = 2.0$ для быстрого (а) и медленного (б) состояния при $A = 4.0$. Область S – стационарный режим генерации, T – периодическая автомодуляция выходного сигнала, Q – сложнопериодический режим автомодуляции, C – хаотическая генерация.

только при преимущественном возбуждении медленной нормальной волны, т.е. при задании начальных условий в виде (14). При большой длине системы наблюдается несколько таких скачков с увеличением величины коэффициента связи (см. рис. 3 г). Поэтому для стабильной перестройки частоты генерации связанной системы при изменении коэффициента связи между волноведущими системами предпочтительно добиваться установления быстрого состояния путем соответствующего выбора параметров прибора.

Вернемся снова к рис. 5, на котором представлена граница области режима квазисинхронизации giro-ЛВВ СВС. Из рисунка следует, что взаимная синхронизация двух giro-ЛВВ возникает при малой связи между волноведущими системами и при небольшой расстройке частот автономной генерации каждой из парциальных систем (малой разности параметров неизохронности $\Delta\mu = |\mu_1 - \mu_2|$). С ростом $\Delta\mu$ режим квазисинхронизации возникает при больших значениях коэффициента связи α , т.е. область синхронных колебаний сужается на плоскости (μ_2, α) . Это сужение тем больше, чем больше безразмерная длина гиролампы A (ср. границы области квазисинхронизации на рис. 5, построенные при параметрах $A = 3.0$ и $A = 4.0$). Одновременно с ростом параметра A форма границы синхронизации становится изрезанной, что обуславливается конкуренцией на границе области синхронизации режимов с различными пространственными распределениями полей $|F_{m, \delta}|$ нормальных волн связанной системы.

Сложная форма области квазисинхронизации совместных колебаний в giro-ЛВВ СВС тесно связана с возникновением режимов автомодуляции выходных сигналов, поэтому в следующем разделе

кратко рассмотрим автомодуляционные режимы, реализующиеся в связанной системе при изменении управляющих параметров. Отметим, что в зависимости от того, в каком мультистабильном состоянии находится система, картина перестройки режимов генерации в giro-ЛВВ СВС различна.

4. НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ ГИРО-ЛВВ СВС

На рис. 6 показаны карты режимов на плоскости параметров (μ_2, α) , построенные для быстрого и медленного состояний системы с безразмерной длиной пространства взаимодействия $A = 4.0$. Из рисунка видно, что граница области стационарной генерации и автомодуляции выходных сигналов имеет сложную сильно изрезанную форму. Как и для giro-ЛВВ со связанными волноведущими структурами [37, 38], только через одну из которых пропускается электронный пучок, и для релятивистского карсинотрона [39, 40] такая форма границы связана с реализующимися в системе устойчивыми “многогорбыми” распределениями амплитуды электромагнитных полей в каждой из ламп при большой длине системы. Появление многогорбых распределений обусловлено конкуренцией фазового и инерционного механизмов нелинейности в винтовом пучке, взаимодействующем со встречной волной. Устойчивость “многогорбых” пространственных распределений определяется величиной связи и расстройкой по частоте между связанными giro-ЛВВ. Поэтому сложная форма границы стационарной генерации, как и сложная форма границы области квазисинхронизации, определяется устойчивостью наблюдающихся состояний $F_{1,2}(\xi, \tau)$ и $I_{1,2}(\xi, \tau)$, возникаю-

щих в результате многократной фазовой перегруппировки электронов-осцилляторов винтового пучка на длине лампы².

Отметим одно обстоятельство, важное с точки зрения применения giro-ЛВВ как мощного перестраиваемого по частоте генератора миллиметрового диапазона обстоятельство: в связанной системе наблюдается расширение области стационарной генерации по сравнению со случаем автономной генерации. Так, при $A = 4.0$ в автономной giro-ЛВВ автомодуляция выходного сигнала возникает при $\mu_{\text{вмх}} \approx 2.8$. В giro-ЛВВ СВС (рис. 6) режимы стационарной генерации возникает при значительно больших значениях параметра μ . Так в быстром состоянии стационарная генерация наблюдается при коэффициентах связи $\alpha > 0.3$ и $\mu_2 < 3.5$. В области $\alpha \in (0.7, 1.0)$ и $\mu_2 > 4.0$ также имеется сравнительно узкая область режима стационарной генерации. В "медленном" состоянии связанной системы область стационарной генерации занимает меньшую область на плоскости управляющих параметров и имеет значительно более сложную границу. В режимах стационарной генерации в системе наблюдается квазисинхронизация колебаний в каждой из giro-ЛВВ, что позволяет эффективно повысить суммарную выходную мощность комплекса в одночастотном режиме генерации.

При переходе к режиму автомодуляции в связанной системе наблюдаются различные режимы колебаний амплитуды выходного поля $|F_{1,2}|$. Так, вблизи границы области стационарной генерации автомодуляция носит регулярный периодический характер (области T и Q на рис. 6). При больших расстройках $\Delta\alpha$ и коэффициентах связи $\alpha < 0.6$ в системе наблюдаются режимы хаотической генерации (область C на рис. 6). Изменяя параметр связи α можно эффективно перестраивать спектральный состав шумового сигнала: ширину полосы, частоту, изрезанность спектра, что делает систему связанных giro-ЛВВ перспективным управляемым источником шумового сигнала в миллиметровом диапазоне длин волн.

Отметим, что суммарная эффективность преобразования энергии электронов-осцилляторов винтовых пучков в энергию ВЧ полей (электронный КПД η_Σ) в giro-ЛВВ СВС, определяемая как

$$\eta_\Sigma = 1 - \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} (|\beta_1|^2 + |\beta_2|^2) d\theta_0, \quad (17)$$

² Отметим, что при $A = 3.0$ не наблюдается столь сложной форм, как области квазисинхронизации (см. рис. 5) и области стационарной генерации. Это связано с тем, что при малой длине системы распределения полей в лампах имеют более простой вид.

существенно зависит от коэффициента связи α . Для режимов нестационарной генерации определение КПД генерации по формуле (17) не корректно, и приходится использовать усредненное по времени значение

$$\langle \eta_\Sigma \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \eta_\Sigma(\tau) d\tau, \quad (18)$$

которое определяет среднюю эффективность энергообмена за временной промежуток T в системе.

Как показал анализ, максимальный КПД реализуется при коэффициентах связи $\alpha > 0.5 \dots 0.7$, что связано с установлением оптимальной структуры высокочастотного поля в пространствах взаимодействия каждой из парциальных систем. Оптимальное распределение поля соответствует возрастанию амплитуды высокочастотного поля к коллекторному концу лампы по сравнению со случаем несвязанной системы. В результате сформировавшийся к концу пространства взаимодействия фазовый сгусток электронов-осцилляторов более эффективно отдает ВЧ полю свою энергию. При этом рост величины КПД и оптимальной связи между волноведущими структурами сильно зависит от величины параметров каждой из giro-ЛВВ. Увеличение электронного КПД в оптимальном случае составляет в диапазоне исследованных выше параметров величину $\eta_{\text{макс}} \approx 1.5\eta_{\Sigma 0}$, где $\eta_{\Sigma 0}$ – суммарная эффективность генерации несвязанных (автономных) giro-ЛВВ. Ниже представлены максимальные значения суммарного электронного КПД $\eta_{\text{макс}}$ и параметра связи $\alpha_{\text{опт}}$, при котором он достигается, в зависимости от параметра неизохронности μ_2 для прочих параметров системы $A = 3.0$, $\mu_1 = 2.0$, а также приведены значения эффективности генерации в автономной системе ($\eta_{\Sigma 0}$).

| μ_2 | $\alpha_{\text{опт}}$ | $\eta_{\text{макс}}$ | $\eta_{\Sigma 0}$ |
|---------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 3.0 | 0.92 | 0.23 | 0.17 |
| 4.0 | 0.94 | 0.26 | 0.18 |
| 5.0 | 0.66 | 0.22 | 0.19 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически проанализированы физические явления, имеющие место при взаимодействии винтовых электронных потоков с высокочастотными полями связанных волноведущих структур в условиях циклотронного резонанса со встречными волнами. Полученные результаты позволяют надеяться на возможность создания МЦР-генератора встречной волны со связанными линиями передачи. Наиболее важным здесь оказывается возможность возникновения синхронных одночастотных режимов генерации в системе связанных giro-ЛВВ. Одновременно имеет

место увеличение электронного КПД связанной системы по сравнению с суммарной эффективностью генерации автономных гиро-ЛВВ при тех же значениях параметров. При этом оказывается возможным снижение веса и габаритов прибора по сравнению с аналогичной по выходной мощности лампы с одним более мощным пучком, что может быть достигнуто путем уменьшения источников питания и магнитной системы, на которые приходится большая часть массы и габаритных размеров устройства.

Представленная работа не исчерпывает всех явлений в связанных гиро-ЛВВ СВС. Так, остается открытым вопрос о возможности селективного возбуждения быстрой и медленной нормальных волн системы, влияние на процессы в системе пространственного заряда, роль которого может быть весьма существенна при рассматриваемом здесь случае четырехволнового взаимодействия. Наконец, вызывает интерес рассмотрение гиро-ЛВВ СВС с изменяющейся геометрией волноводных систем и профилированным магнитным полем, исследование которой позволит поднять эффективность генерации и расширить полосу частот данного генератора [2, 3, 41].

Видимо, электронные приборы со связанными линиями передач можно рассматривать как отдельный весьма перспективный класс сверхвысокочастотных активных устройств [21]. Поэтому рассмотрение подобных связанных систем применительно к устройствам, использующим генерацию и усиление ВЧ энергии в условиях циклотронного резонанса (мазеров на циклотронном резонансе) позволит выработать методы дальнейшей оптимизации и улучшения параметров гироприборов. Так, использование связанных волноводных структур может стать более эффективным методом повышения КПД гиро-ЛВВ по сравнению с уже упомянутыми выше использованием нерегулярных волноводов и изменяющегося вдоль длины гиролампы со встречной волной магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-02-16351), программы Университета России – Фундаментальные исследования (проект УР.01.01.051), а также Фонда некоммерческих программ “Династия” и Международного центра фундаментальной физики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Felch K.L., Danly B.G., Jory H.R. et al. // Proc. IEEE. 1999. V. 87. № 5. P. 752.
2. Lin A.T. // Phys. Rev. A. 1992. V. 46. № 8. P. 4516.
3. Kou C.S., Chen C.H., Wu T.J. // Phys. Rev.E. 1998. V. 57. № 6. P. 7162.
4. Chen S.H., Chu K.R., Chang T.H. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 2633.
5. Rodgers J., Guo H., Nusinovich G.S., Granatstein V.L. // IEEE Trans. 2001. V. PS48. № 10. P. 2434.
6. Nusinovich G.S., Chen W., Granatstein V.L. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. № 2. P. 631.
7. Nusinovich G.S., Sinityn O.V., Kesar A. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. № 7. P. 3427.
8. Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Antonsen T.M. // Phys. Rev.Lett. 2001. V. 87. № 21. 218301-1.
9. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. № 18. С. 34.
10. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ.. 2002. Т. 66. № 12. С. 1761.
11. Гапонов А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2. № 3. С. 443.
12. Гапонов А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2. № 3. С. 450.
13. Гапонов А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1961. Т. 4. № 3. С. 547.
14. Юлатов В.К. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1965. № 12. С. 15.
15. Юлатов В.К. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1965. № 12. С. 24.
16. Гиротрон (Сб. науч. тр.). Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1981.
17. Chen Z.G., Döring H. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1984. V. 5. № 5. P. 691.
18. Дмитриев А.Ю., Трубецков Д.И., Четвериков А.П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 9. С. 595.
19. Трубецков Д.И., Четвериков А.П. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. № 5. С. 3.
20. Исаев В.А., Фишер В.Л., Четвериков А.П. // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 7-я зимняя школа-семинар инженеров. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1986. Кн. 2. С. 3.
21. Трубецков Д.И. // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 4-я зимняя школа-семинар инженеров. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. Кн. 5. С. 89.
22. Балакирев В.А., Островский А.О., Ткач Ю.В. // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 9. С. 94.
23. Льюиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
24. Трубецков Д.И., Шахин В.П. // Вопросы электроники сверхвысоких частот. Вып. 7. / Под ред. В.Н. Шевчика. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. С. 44.
25. Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Электроника ламп с обратной волной / Под ред. В.Н. Шевчика и Д.И. Трубецкова. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. С. 135.
26. Hockney R.W., Eastwood J.W. Computer simulation using particles. N.Y.: McGraw-Hill, 1981.
27. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
28. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. 3-е изд. М.; Ижевск: РХД, 2000.
29. Астахов В.В., Безручко Б.П., Ерастова Е.Н., Селезнев Е.П. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 10. С. 19.

30. *Дмитриев А.С., Старков С.О., Широков М.Е.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1990. Т. 4. № 4/5. С. 40.
31. *Liu Y., Davis P.* // Int. J. Bifurcation and Chaos. 1998. V. 8. P. 1686.
32. *Гинзбург Н.С., Петелин М.И.* // Изв.вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. № 6. С. 3.
33. *Братман В.Л., Савилов А.В.* // Изв.вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. № 6. С. 27.
34. *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е., Храмова А.Е.* // Докл. АН. 2002. Т. 383. № 3. С. 322.
35. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. № 15. С. 61.
36. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // РЭ. 2003. Т. 48. № 1. С. 116.
37. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 6. С. 63.
38. *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 6. С.110.
39. *Трубецков Д.И., Анфиногентов В.Г., Рыскин Н.М. и др.* // Радиотехника. 1999. Т. 63. № 4. С. 61.
40. *Рыскин Н.М., Титов В.Н.* // Изв.вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 6. С. 566.
41. *Братман В.Л., Новожилов С.Л., Петелин М.И.* // Электрон. техника. Сер. I. Электроника СВЧ. 1976. № 11. С. 46.