

01;09

Нелинейные нестационарные процессы в цепочке связанных гирогенераторов со встречной волной

© М.В. Белоглазкина, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: aeh@nonlin.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 11 апреля 2008 г.)

Численно исследована нелинейная динамика цепочки однонаправленно связанных гирогенераторов со встречной волной. Показано, что в цепочке связанных гирогенераторов при изменении управляющих параметров возможно установление как режимов развитой хаотической генерации, так и режимов стационарных одночастотных колебаний. Выделены области значений параметров, при которых наблюдаются режимы развитой хаотической генерации в цепочке гирогенераторов. Рассмотрены физические процессы, приводящие к усложнению хаотических процессов в активной среде.

PACS: 84.40.Ik, 05.45.-a

Введение

Мощные генераторы хаотических колебаний миллиметрового диапазона длин волн представляют определенный интерес для ряда приложений, в частности, радиолокации, технологических процессов, современных информационно-телекоммуникационных систем передачи и обработки информации с использованием динамического хаоса [1–5]. Одним из важных и перспективных приборов современной электроники больших мощностей является гирогенератор со встречной волной (гиро-ЛВВ), который активно исследуется в последнее время как источник мощного СВЧ-излучения (до десятков киловатт) в миллиметровом диапазоне длин волн [6–9]. К достоинствам gyro-LVBV следует отнести возможность легкой перестройки частоты СВЧ-излучения за счет изменения продольной скорости электронов или статического магнитного поля.

Как показано в работах [7,10,11], с увеличением параметра неизохронности в gyro-LVBV имеет место удвоение периода автомодуляции и реализуется переход к сильно нерегулярным относительно широкополосным хаотическим колебаниям с достаточно однородным сплошным спектром в полосе частот вблизи частоты синхронизма между электромагнитной и электронной волнами. В подобном режиме электронно-волновой спектр характеризуется одной или несколькими положительными ляпуновскими экспонентами [12]. Подобный режим получил название развитого хаоса и наиболее привлекателен для указанных выше приложений. Однако для получения режимов развитого хаоса требуется, чтобы ток электронного пучка значительно превышал стартовое значение (более чем в 5–20 раз в зависимости от параметров неизохронности μ электронов-осцилляторов), что достаточно сложно обеспечить на практике [6].

Одной из возможностей снижения величины порога перехода к развитому хаосу является использование цепочки из двух связанных гирогенераторов со встречной волной, когда сигнал с выхода одной из ламп

подается на вход второй лампы. Следует отметить, что аналогичное исследование уже проводилось для системы однонаправленно связанных ламп обратной волны (ЛОВ) [13], и в результате численного моделирования было показано, что использование цепочки связанных ЛОВ позволяет значительно снизить порог перехода к широкополосным хаотическим колебаниям с достаточно однородным сплошным спектром. Подобные эффекты экспериментально наблюдались и в работе [14] при воздействии на ЛОВ внешнего гармонического сигнала. Так же следует отметить, что в работе [15] было проведено исследование однонаправленно связанных ЛОВ с поперечным полем, находящихся в режимах хаотической генерации, при этом была показана возможность возникновения в подобной системе режимов хаотической синхронизации электронно-волновых генераторов.

В представленной работе изложены результаты численного исследования динамики цепочки двух связанных генераторов на винтовом электронном пучке со встречной электромагнитной волной (гиро-ЛВВ) и показано, что в подобной системе возможно возникновение различных типов колебательных режимов, включая режимы стационарной и хаотической генерации. Построены карты различных режимов генерации в цепочке связанных gyro-LVBV на плоскостях управляющих параметров.

1. Исследуемая модель цепочки связанных гирогенераторов со встречной волной

Нелинейная нестационарная динамика цепочки двух связанных gyro-LVBV описывается самосогласованной системой уравнений движения электронов слаботорсионного винтового пучка и уравнений возбуждения встречной волны электронным потоком [10,16,17], которые в безразмерном виде для каждой из gyro-LVBV

записываются следующим образом:

$$\frac{d\beta_{1,2}}{d\xi} - j\mu_{1,2}(1 - \beta_{1,2}^2)\beta_{1,2} = F_{1,2}, \quad (1)$$

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

Здесь индексы „1“ и „2“ обозначают номер элемента цепочки (индекс „1“ соответствует ведущей, а индекс „2“ — ведомой giro-ЛВВ), $\beta = r \exp(j\theta)$ — комплексный радиус траекторий электронов ансамбля, первоначально равномерно распределенных по фазе относительно ВЧ-поля, $F_{1,2} = F_{1,2}(\xi, \tau)$ — медленно меняющиеся комплексные безразмерные амплитуды поля в сечении пучка, $I_{1,2} = I_{1,2}(\xi, \tau)$ — первые гармоники сгруппированного тока, $\xi = \beta_0(\omega)\varepsilon z$ — безразмерная продольная координата пространства взаимодействия giro-ЛВВ, $\tau = \omega\varepsilon(t - |v_g|z/v_{||})^{-1}$ — безразмерное время в движущейся с продольной скоростью пучка $v_{||}$ системе координат, ω — частота, по которой производится усреднение, v_g — групповая скорость волны на частоте ω . Частота ω удовлетворяет условию синхронизма

$$\omega + \beta_0(\omega)v_{||} = \omega_c, \quad (3)$$

где $\beta_0(\omega)$ — постоянная распространения встречной волны с частотой ω в системе без электронного пучка. Кроме этого, введены следующие параметры: параметр неизхронности электронов-осцилляторов $\mu = v_{||}/(2c\varepsilon)$, характеризующий меру инерционности системы, параметр взаимодействия

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{I_0 K}{4V_0} \left(1 + \frac{v_{\perp 0}^2}{v_{||}^2}\right)}, \quad (4)$$

циклотронная частота при $\xi = 0$

$$\omega_c = \frac{eB_0}{cm_0} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v_{||}^2 + v_{\perp 0}^2}{c^2}\right), \quad (5)$$

сопоставление связи K , начальная поперечная скорость электронов $v_{\perp 0}$, постоянные составляющие тока и напряжения пучка I_0 и V_0 .

Уравнения (1) и (2) дополняются следующими начальными условиями:

$$F_1(\tau = 0, \xi) = f^0(\xi), \quad \beta(\xi = 0) = \exp(j\theta_0), \quad \theta_0 \in [0, 2\pi], \quad (6)$$

где $f^0(\xi)$ — функция, характеризующая начальное распределение поля вдоль пространства взаимодействия giro-ЛВВ, а также следующими граничными условиями, которые описывают однонаправленную связь между элементами цепочки:

$$F_1(\xi = A_1, \tau) = 0, \quad F_2(\xi = A_2, \tau) = RF_1(\xi = 0, \tau), \quad (7)$$

где $R = re^{j\varphi}$ — комплексный коэффициент связи между giroлампами со встречной волной, r — амплитуда коэффициента связи, φ — его фаза.

В настоящей работе рассматривается случай, когда длина пространства взаимодействия ламп фиксирована и составляет $A_1 = A_2 = 6$, что соответствует длине пространства взаимодействия реальных giro-ЛВВ [6]. Фаза коэффициента связи в силу однонаправленности связи не оказывает влияния на динамику связанной системы, поэтому она была также фиксирована и выбрана равной $\varphi = \pi$.

2. Результаты исследования нелинейной динамики цепочки связанных giro-ЛВВ

Исследование полной картины нелинейной динамики цепочки связанных giro-ЛВВ является весьма сложной и трудоемкой задачей, требующей больших вычислительных затрат. Это связано с тем, что рассматриваемая задача оказывается многопараметрической, требующей рассмотрения различных ситуаций, в зависимости от того, в каком режиме работают отдельные генераторы, составляющие цепочку.

В настоящей работе будут рассматриваться несколько случаев, представляющих наибольший практический интерес.

1. Параметры первой лампы фиксированы, и сама лампа находится в режиме периодической автомодуляции выходного сигнала. Исследуется динамика ведомой giro-ЛВВ при изменении параметра неизхронности μ_2 таким образом, чтобы автономная ведомая лампа последовательно демонстрировала режимы стационарной генерации, периодической и хаотической автомодуляции выходного сигнала.

2. Параметр неизхронности μ_1 первой лампы цепочки связанных giro-ЛВВ изменяется таким образом, чтобы ведущий giroгенератор со встречной волной последовательно демонстрировал режимы стационарной генерации, периодической и хаотической автомодуляции. Параметры второй (ведомой) giro-ЛВВ фиксированы и выбраны таким образом, что лампа находится в режимах стационарной генерации, периодической автомодуляции и хаотической автомодуляции соответственно.

Оба упомянутых случая подробно исследуются в разд. 2.1 и 2.2 соответственно.

2.1. Управление характеристиками выходных колебаний цепочки giro-ЛВВ путем изменения параметров ведомой лампы

Зафиксируем параметры первой лампы так, чтобы она находилась в режиме автомодуляции (этому соответствует параметр неизхронности $\mu_1 = 2.4$). Огибающая выходного сигнала, спектр мощности в логарифмическом масштабе и проекция фазового портрета, построенная по огибающей сигнала ведущей giro-ЛВВ, представлены на рис. 1.

Проекция фазового портрета строилась с помощью метода Такенса [18] со временем задержки $\tau = 5$. Из

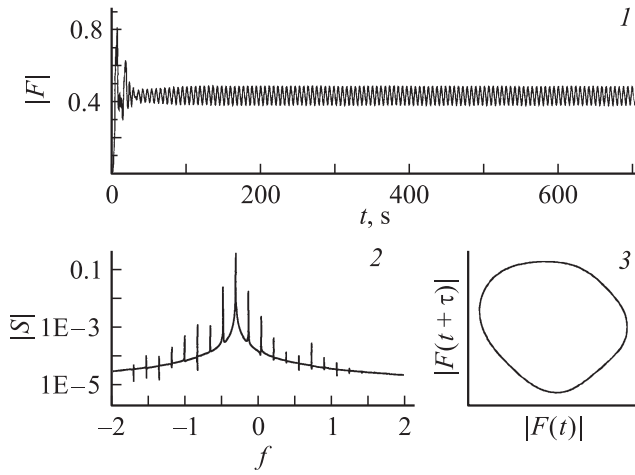


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала $|E_1(t)|$ (1), спектр мощности (2) и фазовый портрет (3) колебаний ведомой гиро-ЛВВ при значении параметра неизохронности $\mu_1 = 2.4$.

рис. 1 видно, что система находится в режиме периодической автомодуляции амплитуды выходного сигнала. Будем изменять параметр неизохронности ведомой лампы. Хорошо известно [10,11], что при увеличении параметра неизохронности в гиро-ЛВВ наблюдается последовательность усложняющихся режимов от стационарной до развитой хаотической генерации. При выбранной длине пространства взаимодействия $A_2 = 6$ в автономной системе стационарная генерация имеет место при $\mu_2 < 2.4$, периодическая автомодуляция при $2.4 \leq \mu_2 \leq 2.5$, и хаотическая генерация возникает при $\mu_2 > 2.5$.

Данная последовательность смены режимов колебаний в автономной гиро-ЛВВ показана внизу рис. 2, что позволяет получить наглядное представление о динамике системы при увеличении параметра неизохронности и отсутствии внешнего сигнала ($r = 0$) от ведущего генератора.

Рассмотрим нелинейную динамику цепочки гирогенераторов в целом при изменении коэффициента связи r . На рис. 2 показана карта режимов на плоскости управляющих параметров „параметр неизохронности μ_2 ведомого гирогенератора со встречной волной—амплитуда коэффициента связи r “, на которой выделены характерные области динамики связанной системы.

При значениях $\mu_2 < 2.4$, как отмечалось выше, автономная ведомая гиро-ЛВВ находится в режиме стационарной генерации. При воздействии на нее сигнала ведущей гиро-ЛВВ (находящейся в режиме периодической автомодуляции выходного сигнала) сравнительно большой амплитуды (при $r > 0.04$) неавтономная (вторая) лампа начинает демонстрировать режим периодической автомодуляции в большом диапазоне изменения параметра однонаправленной связи r . При больших значениях амплитуды коэффициента однонаправленной связи $r > 0.3-0.4$ (что соответствует подаче на вход ведомой лампы порядка 10–20% выходной мощности первой

лампы) динамика ведомой гиро-ЛВВ хаотизируется и спектр генерации становится сплошным.

При увеличении параметра неизохронности второй лампы $\mu_2 > 2.4$ (в результате чего ведомая гиро-ЛВВ переходит в автомодуляционный режим) при изменении амплитуды коэффициента связи в цепочке связанных гирогенераторов наблюдается более сложная перестройка режимов (см. рис. 2). Остановимся на ней более подробно. При малых значениях параметра связи внешний сигнал практически не оказывает влияния на динамику ведомой системы, так что на выходе цепочки наблюдается автомодуляционный режим, практически не отличающийся от режима автономной ведомой системы (область A на рис. 2). С дальнейшим увеличением параметра неизохронности μ_2 режим модуляции амплитуды выходного сигнала усложняется, в спектре выходного сигнала цепочки появляются новые модуляционные частоты. Усложнение автомодуляционного режима приводит к установлению в системе режимов слабохаотической генерации (область $C1$ на рис. 2). С ростом параметра неизохронности μ_2 и коэффициента связи r область на плоскости параметров, занимаемая режимом $C1$, расширяется. При $\mu_2 \approx 2.5$ в ведомой системе в автономном режиме ($r = 0$) устанавливается хаотическая генерация. Очевидно, в этом случае режимы периодической автомодуляции при малых коэффициентах связи перестают наблюдаться.

Весьма интересным и важным представляется появление на карте режимов области S , которая соответствует возникновению режимов стационарной генерации на выходе цепочки связанных гиро-ЛВВ, когда каждая из ламп автономно демонстрирует режимы автомодуляции выходного поля. Вид выходного сигнала ведомой лампы цепочки генераторов в данном режиме показан на рис. 3.

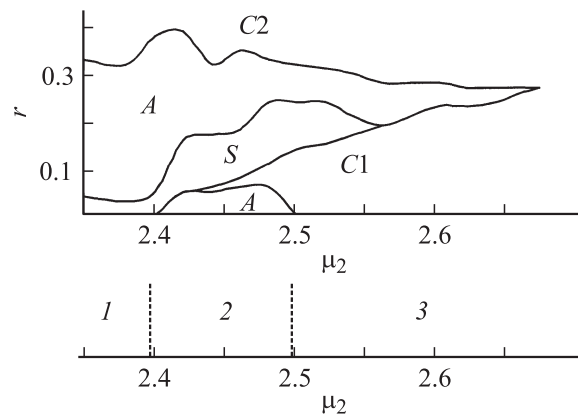


Рис. 2. Области реализации различных режимов колебаний в цепочке связанных гиро-ЛВВ на плоскости управляющих параметров „параметр неизохронности μ_2 ведомого гирогенератора с обратной волной — амплитуда коэффициента связи r “. Здесь символом S обозначена область стационарной генерации, A — область автомодуляции, $C1$ и $C2$ — области различных режимов хаотической генерации. Внизу рисунка показаны области различных режимов колебаний при изменении параметра μ_2 в автономной гиро-ЛВВ: 1 — стационарная генерация, 2 — автомодуляция, 3 — хаотическая генерация.

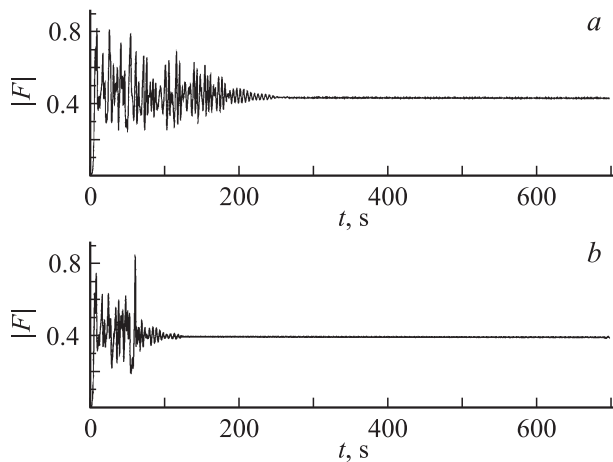


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала $|E_2(t)|$ ведущей giro-ЛВВ при различных значениях коэффициента связи $r = 0.15$ (a) и $r = 0.18$ (b) при значении параметра неизохронности $\mu_2 = 2.5$.

После переходного процесса, длительность которого уменьшается с ростом коэффициента связи (ср. рис. 3, a и 3, b, построенные при различных параметрах r), в системе устанавливается режим стационарной генерации, который характеризуется одночастотным спектром и неизменной амплитудой поля на выходе системы.

Следует отметить, что при малых $\mu_2 \approx 2.4$ по мере увеличения параметра связи стационарная генерация возникает непосредственно после режима периодической автомодуляции, в то время как при больших параметрах неизохронности $\mu_2 > 2.5$ стационарная генерация возникает на фоне хаотических автомодуляционных режимов (см. карту режимов на рис. 2). Из карты режимов также следует, что с ростом параметра неизохронности второй giroлампы пороговое значение r , при котором начинается стационарная генерация, повышается (с $r = 0.05$ при $\mu_2 \approx 2.4$ до $r = 0.15$ при $\mu_2 \approx 2.55$). С ростом параметра неизохронности область на карте режимов, соответствующая режиму стационарной генерации, сужается и исчезает при $\mu_2 \approx 2.56$. Как следствие, сближаются пороги режимов хаотической генерации и периодической автомодуляции в этом случае.

При переходе через границу области S стационарной генерации со стороны больших значений амплитуды коэффициента связи r в системе снова устанавливается режим модуляции выходного сигнала, типичные характеристики которого показаны на рис. 4.

Важной особенностью данного модуляционного режима является его квазипериодический характер, который выражается в том, что модуляция амплитуды поля на выходе лампы происходит с двумя характерными несоизмеримыми частотами, что хорошо видно из анализа спектра мощности, представленного на рис. 4. Тот же вывод можно сделать из анализа проекции фазового портрета колебаний амплитуды выходного поля $|E_2|$, который типичен для двухчастотных колебаний с несоизмеримыми частотами. Для подтверждения данного вы-

вода о наличии в фазовом пространстве тора строилось сечение Пуанкаре по колебаниям амплитуды выходного поля. Было показано, что вид сечения Пуанкаре соответствует гладкой замкнутой инвариантной кривой, что также подтверждает вышеприведенный вывод о возникновении двухчастотной квазипериодической модуляции амплитуды выходного сигнала ведомой giro-ЛВВ.

Наконец, при больших воздействиях ведущей системы на ведомую (при $r > 0.3-0.4$) в цепочке связанных генераторов устанавливается режим развитой хаотической генерации (область $C2$ на карте параметров, рис. 2). Характерный вид амплитуды $|F_2|$ выходного сигнала, спектр мощности и фазовый портрет в режиме развитой хаотичности генерации показаны на рис. 5.

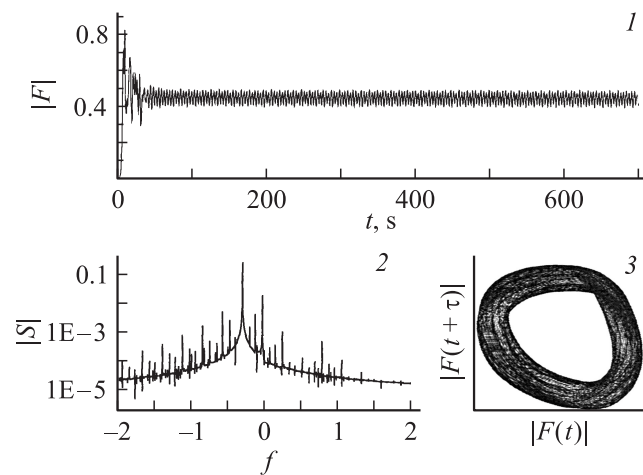


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала $|F_2(t)|$ (1), спектр мощности (2) и фазовый портрет (3) колебаний ведомой giro-ЛВВ при значении параметра неизохронности $\mu_2 = 2.5$ и коэффициенте связи $r = 0.28$. Неавтономная giro-ЛВВ находится в режиме квазипериодической модуляции выходного сигнала.

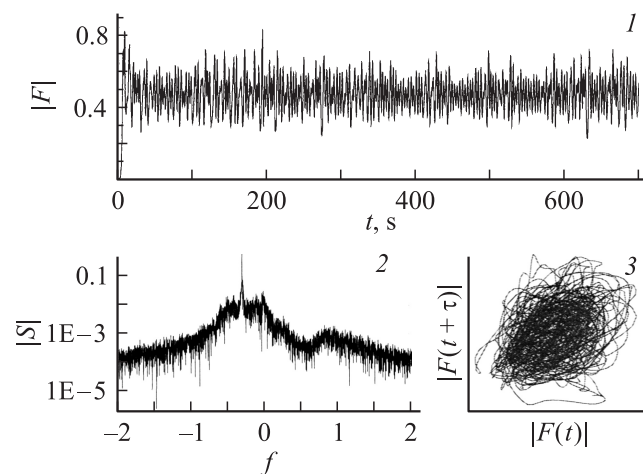


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала $|F_2(t)|$ (1), спектр мощности (2) и фазовый портрет (3) колебаний ведомой giro-ЛВВ при значении параметра неизохронности $\mu_2 = 2.5$ и коэффициенте связи $r = 0.4$. Неавтономная giro-ЛВВ находится в режиме развитой хаотической модуляции выходного сигнала.

Данный режим характеризуется сильно нерегулярными колебаниями амплитуды выходного сигнала, сложной нерегулярной структурой фазового портрета колебаний и сплошным спектром мощности со сравнительно высоким шумовым пьедесталом вблизи базовой частоты генерации. Можно предположить, что переход к хаотической генерации в исследуемой цепочке связанных гиросгенераторов при больших значениях коэффициента связи происходит по сценарию разрушения квазипериодических движений.

2.2. Нелинейная динамика цепочки гиросгенераторов при изменении параметров ведущей лампы

Теперь рассмотрим второй случай, когда параметры ведомой гирос-ЛВВ фиксированы, а параметр неизохронности ведущего гиросгенератора изменяется таким образом, что ведущая гирос-ЛВВ в автономном состоянии последовательно демонстрирует режим стационарной генерации, периодической и хаотической автомодуляции. Остановимся вначале на случае, когда ведомая гирос-ЛВВ находится в режиме стационарной генерации ($\mu_2 = 2$). Данный режим работы цепочки вызывает особый интерес в случае, когда необходимо получить генерацию широкополосного хаотического сигнала в цепочке при параметрах первой гирос-ЛВВ, далеких от режимах хаоса. Рассмотрим нелинейную нестационарную динамику цепочки гирос-ЛВВ в целом.

На рис. 6 показана карта режимов на плоскости управляющих параметров „параметр неизохронности μ_1 ведущего гиросгенератора со встречной волной—амплитуда коэффициента связи r “, на которой выделены характерные области колебаний цепочки в целом. Из карты режимов следует, что в цепочке гиросгенераторов в этом случае можно наблюдать различные режимы генерации: стационарную генерацию (область S на рис. 6), периодическую (область A) и хаотическую (область C) автомодуляцию.

При малых значениях параметра неизохронности первой гирос-ЛВВ ($\mu_1 < 1.9$), а также при условии малой связи между лампами ($r < 0.05$) наблюдается режим стационарной генерации. С увеличением связи между лампами (с ростом мощности сигнала, подаваемого на вторую лампу) неавтономный ведомый гиросгенератор начинает демонстрировать режим периодической автомодуляции. При больших величинах амплитуды коэффициента связи $r > 0.3$ динамика ведомой гирос-ЛВВ хаотизируется. Однако с дальнейшим увеличением мощности сигнала (увеличением r) на выходе второго гиросгенератора цепочки снова возникает режим периодической автомодуляции, т.е. хаотическая генерация подавляется. Следует отметить, что с ростом параметра неизохронности μ_1 первой гирос-ЛВВ пороги возникновения периодической и хаотической автомодуляции снижаются, однако в окрестности $\mu_1 \approx \mu_2$ в системе устанавливается режим стационарной генерации и многочастотные режимы колебаний выходного поля цепочки подавляются.

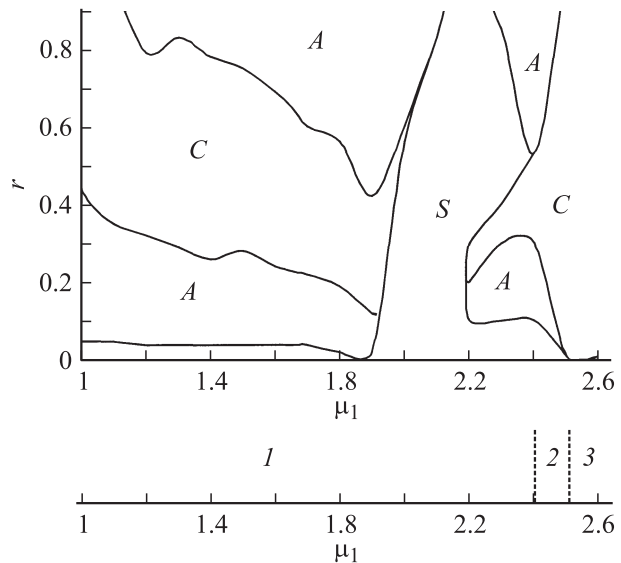


Рис. 6. Области реализации различных режимов колебаний в цепочке связанных гирос-ЛВВ на плоскости управляющих параметров „параметр неизохронности μ_1 ведомого гиросгенератора с обратной волной—амплитуда коэффициента связи r “. Здесь символом S обозначена область стационарной генерации, A — область автомодуляции, C — область хаотической генерации. Ведомая гирос-ЛВВ находится в режиме стационарной генерации $\mu_2 = 2$. Внизу рисунка показаны области различных режимов колебаний при изменении параметра μ_2 в автономной гирос-ЛВВ: 1 — стационарная генерация, 2 — автомодуляция, 3 — хаотическая генерация.

Режим стационарной генерации S в окрестности $\mu_1 \approx \mu_2 \approx 2$ соответствует области синхронизации колебаний в цепочке гиросгенераторов. Он реализуется при близости частот ведущей и ведомой гирос-ЛВВ, когда частота генерации второй лампы равна частоте генерации первой лампы, а амплитуда сигнала после окончания переходного процесса устанавливается постоянной (режим стационарной генерации) на частоте, соответствующей частоте сигнала с выхода первой лампы. Фактически область S можно рассматривать как область (клюв) синхронизации двух однонаправленно связанных гирос-ЛВВ при изменении параметра неизохронности μ_1 ведущей лампы.

На рис. 7, *a* показана зависимость базовой частоты генерации ведомой гирос-ЛВВ от параметра μ_1 . Напомним, что частота ω_1 является поправкой к частоте холодного синхронизма между волнами, поэтому отрицательная величина ω_1 означает, что частота генерации меньше частоты холодного синхронизма. Хорошо видно, что с ростом параметра μ_1 частота уменьшается. На рис. 7, *b* показана зависимость разности базовых частот двух связанных гирос-ЛВВ в зависимости от параметра μ_1 , а также показаны области стационарной генерации (штриховые вертикальные линии) для каждого рассматриваемого случая.

Важно отметить, что в окрестности управляющих параметров $\mu_1 \approx \mu_2$ наблюдается режим квазисинхро-

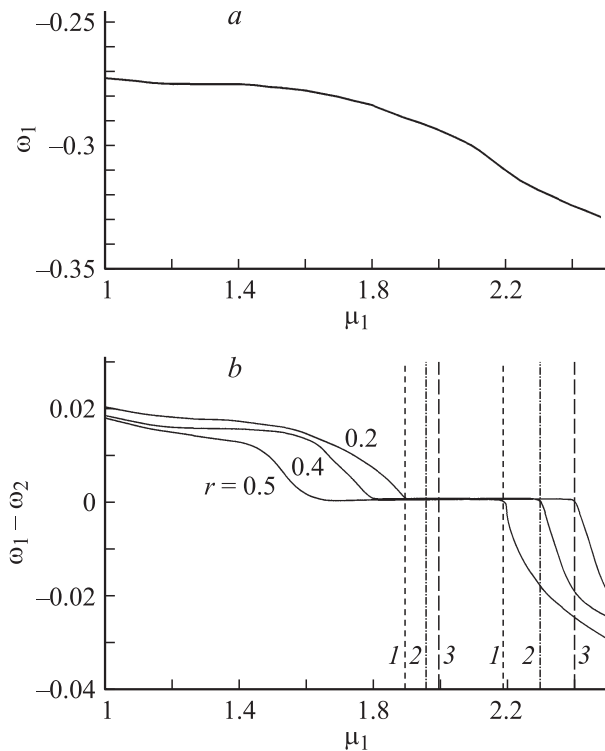


Рис. 7. *a* — зависимость базовой частоты ω_1 генерации ведомой giro-ЛВВ от параметра неизохронности μ_1 . *b* — разность частот ($\omega_1 - \omega_2$), ω_1 — частота ведущей лампы, ω_2 — частота ведомой лампы при различных амплитудах коэффициента связи. Линиями 1 ограничена область стационарной генерации при $r = 0.2$, 2 — при 0.4, 3 — при 0.5.

низации генераторов цепочки — неавтономный режим генерации, при котором высокочастотные автоколебания происходят на частоте внешнего воздействия (в нашем случае на частоте генерации первой лампы), а амплитуда сигнала изменяется со временем, демонстрируя различные режимы модуляции колебаний (они могут быть как периодическими, так и хаотическими). Данный эффект был впервые обнаружен теоретически в работах [19,20] по исследованию неавтономной динамики электронно-волновых систем с обратной волной, в работе [14] данный эффект был подтвержден экспериментально. Из рис. 7, *b* видно, что на зависимостях наблюдается область, где разность базовых частот генерации $\omega_2 - \omega_1 = 0$, однако область захвата частоты не совпадает с границей области стационарной генерации, а увеличивается с ростом коэффициента связи. Этому соответствует режим квазисинхронизации частот, из чего следует, что область захвата частоты в цепочке giroгенераторов больше, чем область стационарной генерации.

При пересечении управляющими параметрами области синхронизации со стороны больших μ_1 на карте режимов снова наблюдается переход второй giro-ЛВВ цепочки последовательно в режимы периодической и хаотической автомодуляции. С ростом параметра неизохронности μ_1 ведущей giro-ЛВВ порог возникновения

хаотических колебаний снижается, а граница возникновения периодической модуляции, наоборот, растет. При $\mu_1 > 2.5$ ведущий giroгенератор начинает демонстрировать режим хаотической генерации (см. рис. 6), так что на ведомую лампу воздействует хаотический сигнал. Как следствие, при $\mu_1 > 2.5$ в цепочке связанных giroгенераторов реализуются только режимы хаотических колебаний.

Важным выводом, который следует из проведенного анализа, является то, что в исследуемой цепочке возможны хаотические колебания при значениях параметра неизохронности ведомой лампы $\mu_1 < 2$, когда в каждом из giroгенераторов в автономных режимах наблюдается стационарная генерация. В свою очередь при больших μ_1 , когда выходной сигнал уже демонстрирует многочастотный спектр генерации, существует возможность подавить сложную динамику в цепочке giro-ЛВВ и установить стационарную одночастотную генерацию.

Рассмотрим теперь кратко случай, когда ведомая giro-ЛВВ находится в режиме периодической автомодуляции

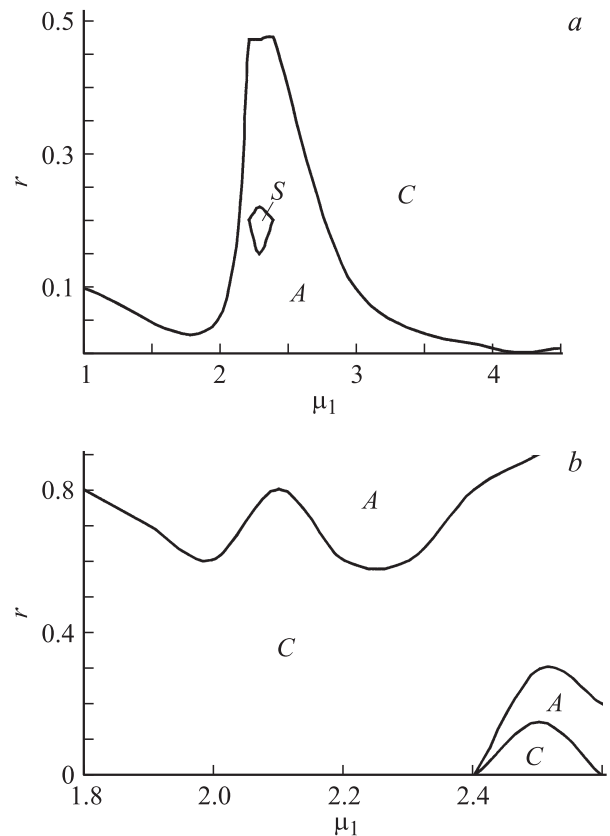


Рис. 8. Области реализации различных режимов колебаний в цепочке связанных giro-ЛВВ на плоскости управляющих параметров „параметр неизохронности μ_1 ведомого giroгенератора с обратной волной–амплитуда коэффициента связи r “, *a* — ведомая giro-ЛВВ находится в режиме периодической автомодуляции $\mu_2 = 2.45$; *b* — ведомая giro-ЛВВ находится в режиме хаотической автомодуляции $\mu_2 = 2.6$. Здесь символом *S* обозначена узкая область стационарной генерации, *A* — область автомодуляции, *C* — область хаотической генерации.

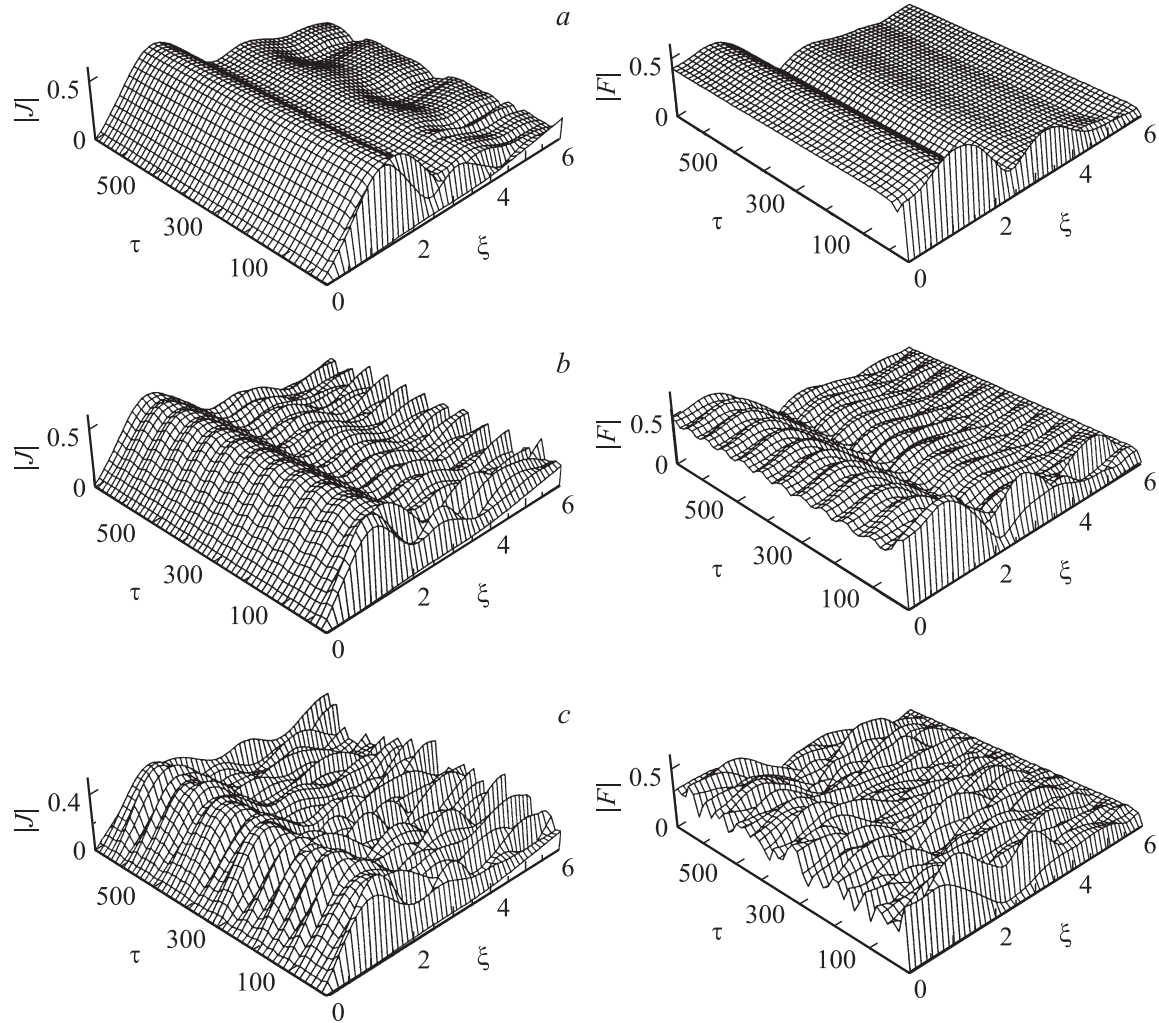


Рис. 9. Пространственно-временные распределения первой гармоники тока $|J_2(t, \xi)|$ (слева) и амплитуды поля $|F_2(t, \xi)|$ (справа) ведомой giro-ЛВВ для различных значений коэффициента связи: $a - r = 0.18, b - 0.28, c - 0.4$.

(параметр неизохронности $\mu_2 = 2.45$). Карта режимов на плоскости параметров „параметр неизохронности μ_1 ведущего giroгенератора со встречной волной — амплитуда коэффициента связи r “ для этого случая представлена на рис. 8, *a*.

Из карты режимов видно, что режим автомодуляции в данной системе в основном наблюдается при малых значениях амплитуды коэффициента связи ($r < 0.1$), однако при параметрах неизохронности ведущей лампы в области $\mu_1 \in (2, 3)$ при близости параметров giroгенераторов, составляющих цепочку, порог возникновения хаотических колебаний резко возрастает. Также при этих значениях μ_1 на карте режимов появляется узкая область стационарной генерации. С ростом коэффициента связи r в системе устанавливается режим хаотических колебаний, при этом их сложность, оцениваемая по виду спектра мощности колебаний и форме фазового портрета, возрастает с увеличением r . При $\mu > 4$ режимы автомодуляции фактически не возникают, что является весьма важным на практике при использовании

исследуемой цепочки giro-ЛВВ как источника шумового сигнала в миллиметровом диапазоне длин волн.

Для случая, когда ведомая лампа находится в режиме хаотической автомодуляции ($\mu_2 = 2.6$), карта режимов представлена на рис. 8, *b*. В данном случае режим автомодуляции имеет место при больших значениях амплитуды коэффициента связи ($r > 0.6$), а также в области карты режимов, где параметры неизохронности ведущей и ведомой ламп примерно равны $\mu_1 \approx \mu_2$.

2.3. Физические процессы в неавтономной электронно-волновой системе

Рассмотрим в заключение обсуждения динамики цепочки связанных giro-ЛВВ пространственно-временную динамику в винтовом пучке, взаимодействующим со встречной волной в неавтономной ведомой системе, определяющую установление вышеописанных режимов колебаний в ведомом giroгенераторе со встречной волной. Для этого рассмотрим пространственно-временные

распределения амплитуды поля и первой гармоники сгруппированного тока в неавтономной гиро-ЛВВ при различных параметрах r связи.

На рис. 9 показаны соответствующие зависимости для различных значений коэффициента связи r при параметрах неизохронности $\mu_1 = 2.4$ и $\mu_2 = 2.5$.

При малых коэффициентах связи, когда в ведомой системе под воздействием внешнего сигнала ведущей гиро-ЛВВ наблюдается неизменная амплитуда выходного сигнала (режим стационарной генерации, область S на рис. 2), в системе наблюдается сложная перестройка пространственно-временной динамики тока и поля вдоль длины пространства взаимодействия (см. рис. 9, *a*). Вблизи выходного конца пространства взаимодействия $\xi = 0$ переменные, описывающие систему, ведут себя неизменным образом по времени, при этом в области $\xi \approx 1.5$ наблюдается перегруппировка электронного потока, что выражается в возникновении максимума на зависимости тока $|J_2(\xi)|$. На коллекторном конце лампы наблюдается медленная модуляция амплитуды первой гармоники сгруппированного тока, которая обусловлена воздействием слабого внешнего сигнала ведущей гиро-ЛВВ. Однако эта модуляция, как видно из рис. 9, *a*, не приводит к модуляции амплитуды выходного поля гиро-ЛВВ.

В режиме квазипериодической модуляции выходного сигнала (см. рис. 9, *b*, $r = 0.28$) наблюдается хорошо известная картина возникновения автомодуляции в гиролampe со встречной волной под воздействием внешнего сигнала (см. подробнее [19,20]). В режимах развитой хаотической генерации, как видно из рис. 9, *c*, построенного при $r = 0.4$, распределения амплитуд поля и тока ведут себя сложным образом, демонстрируя пространственно-временной хаос в системе. Перегруппировка пучка под действием внешнего сигнала происходит нерегулярно в различных точках пространства взаимодействия, что приводит к сложной динамике амплитуды выходного сигнала цепочки связанных гиро-ЛВВ и, как следствие, к сложному спектральному составу генерируемого сигнала (см. рис. 4).

Заключение

В работе проведено численное исследование нелинейных нестационарных процессов в цепочке односторонне связанных гирогенераторов со встречной волной при изменении основных управляющих параметров такой системы (параметров неизохронности ведущей и ведомой гиро-ЛВВ, параметра связи между лампами, составляющими цепочку гироприборов). Выявлена сложная картина перестройки режимов колебаний при изменении управляющих параметров в подобной системе, построены карты режимов, описывающие динамику связанной системы, проанализированы характеристики выходного сигнала цепочки связанных генераторов в различных режимах работы системы.

Было получено, что при сравнительно малых токах в рассматриваемой системе возможен режим развитой

хаотической генерации. В то же время в цепочке гиро-ЛВВ возможно подавление автомодуляции и возникновение режима стационарной генерации, что связано с возникновением режимов синхронизации ВЧ-колебаний в цепочке.

Работа поддержана РФФИ (грант №02-90002), CRDF (проект REC-006), Президентской программой поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-355.2008.2) и программой поддержки молодых докторов наук (проект МД-1884.2007.2), а также ФНД „Династия“.

Список литературы

- [1] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [2] Dronov V., Hendrey M.R., Antonsen T.M., Ott e. // Chaos. 2004. Vol. 14. N 1. P. 30.
- [3] Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. Вып. 10. С. 4–26.
- [4] Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Панас А.И., Старков С.О. // РиЭ. 1998. Т. 43. С. 1115–1128.
- [5] Special Issue on Applications of Nonlinear Dynamics to Electronic and Information Engineering. Proc. IEEE. 2002. Vol. 90. N 5.
- [6] Felch K.L., Danly B.G., Jory H.R., Kreischer K.E., Lawsom W., Levush B., Temkin R.J. // Proc. IEEE. 1999. Vol. 87. N 5. P. 752.
- [7] Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Antonsen T.M. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. N 21. P. 218 301.
- [8] Grudiev A., Schünemann K. // Phys. Rev. E. 2003. Vol. 68. P. 016 501.
- [9] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, 2004. Т. 2.
- [10] Трубецкая Д.И., Четвериков А.П. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. Вып. 5. С. 3.
- [11] Дмитриев А.Ю., Трубецков Д.И., Четвериков А.П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. Вып. 9. С. 595.
- [12] Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. XLVII. № 5–6, С. 383; 1991. С. 595.
- [13] Рыскин Н.М., Титов В.Н. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 9. С. 90–94.
- [14] Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Короновский А.А., Попов П.В., Скороходов В.Н., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 9. С. 108–114.
- [15] Hramov A.E., Koronovskii A.A., Popov P.V., Rempen I.S. // Chaos. 2005. Vol. 15. P. 013 705.
- [16] Юлпатов В.К. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. I. Электроника. 1965. Т. 12. С. 15.
- [17] Дмитриев А.Ю., Коневец А.Е., Пищик Л.А., Трубецков Д.И., Четвериков А.П. // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 7-я зимняя shk.-семинар. Кн. 1. Саратов, 1981. С. 61.
- [18] Takens F. Detecting strange attractors in dynamic systems and turbulence. NY: Springer-Verlag, 1981.
- [19] Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. XLV. Вып. 9. С. 773–792.
- [20] Трубецков Д.И., Короновский А.А., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. XLVII. Вып. 5–6. С. 343–372.