



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПОЧКЕ СВЯЗАННЫХ ГИРОГЕНЕРАТОРОВ СО ВСТРЕЧНОЙ ВОЛНОЙ

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

В работе численно исследуется нелинейная динамика в цепочке однонаправленно связанных гирогенераторов со встречной волной. Показано, что в связанной системе при изменении управляющих параметров каждой из распределенных связанных автоколебательных сред возможно установление как развитой хаотической динамики, так и режимов стационарных одночастотных колебаний.

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 кВт) в миллиметровом диапазоне длин волн [6–9]. Как показано в работах [10, 11], с увеличением параметра неизохронности в гиро-ЛВВ имеет место удвоение периода автомодуляции и реализуется переход к сильно нерегулярным относительно широкополосным хаотическим колебаниям с достаточно однородным сплошным спектром. 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 10–20 раз в зависимости от параметра неизохронности электронов-осцилляторов), что достаточно сложно обеспечить на практике. 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) [12]. Хорошо известно, что ЛОВ является генератором СВЧ-диапазона, в котором могут наблюдаться режимы хаотической генерации [13–17]. Было показано [12], что использование цепочки

связанных ЛОВ позволяет значительно снизить порог перехода к широкополосным хаотическим колебаниям с достаточно однородным сплошным спектром. Следует также отметить, что в работе [18] 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 приводятся результаты численного исследования динамики цепочки двух связанных генераторов на винтовом электронном пучке со встречной электромагнитной волной (гири-ЛВВ) и показано, что в подобной системе возможно наблюдение различных типов колебательных режимов, включая режимы стационарной и хаотической генерации.

1. Исследуемая модель цепочки связанных гиригенераторов со встречной волной

Нелинейная нестационарная динамика цепочки двух связанных гири-ЛВВ описывается самосогласованной системой уравнений движения электронов слабoreлятивистского винтового пучка и уравнений возбуждения встречной волны электронным потоком [10, 19, 20], которые в безразмерном виде для каждой из гири-ЛВВ 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 гири-ЛВВ); $\beta = b \exp(j\theta)$ – комплексный радиус траекторий электронов ансамбля, первоначально равномерно распределенных по фазе относительно ВЧ-поля; $F = F(\xi, \tau)$ – медленно меняющаяся комплексная безразмерная амплитуда поля в сечении пучка; $I = I(\xi, \tau)$ – первая гармоника сгруппированного тока; $\xi = \beta_0(\omega)\varepsilon z$ – безразмерная продольная координата; $\tau = \omega\varepsilon(t - z/v_{\parallel})(1 + v_{\parallel}/|v_g|)^{-1}$ – безразмерное время в движущейся с продольной скоростью пучка v_{\parallel} системе координат, ω – частота, по которой производится усреднение, v_g – групповая скорость волны на частоте ω . Частота ω удовлетворяет условию синхронизма

$$\omega + \beta_0(\omega) \cdot v_{\parallel} = \omega_c. \quad (3)$$

Здесь $\beta_0(\omega)$ – постоянная распространения встречной волны с частотой ω в системе без электронного пучка. Кроме этого введены следующие параметры: параметр неизохронности $\mu = v_{\parallel}/(2c\varepsilon)$, характеризующий меру инерционности системы; параметр взаимодействия

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{I_0 K}{4V_0} \left(1 + \frac{v_{10}^2}{v_{\parallel}^2} \right)}; \quad (4)$$

циклотронная частота при $\xi = 0$

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

сопротивление 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:

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

$f^0(\xi)$ – функция, характеризующая начальное распределение поля вдоль пространства взаимодействия gyro-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 гиrolампами с обратной волной, r – амплитуда коэффициента связи, φ – его фаза.

В данной работе рассматривается частный случай, когда длины пространства взаимодействия ламп фиксированы и составляют $A_1 = A_2 = 6$, что соответствует длинам пространства взаимодействия реальных gyro-ЛВВ [6]. Фаза коэффициента связи в силу однонаправленности связи не оказывает влияния на динамику связанной системы, поэтому фаза была также фиксирована и выбрана равной $\varphi = \pi$.

2. Результаты исследования нелинейной динамики цепочки связанных gyro-ЛВВ

Исследование полной картины нелинейной динамики цепочки связанных gyro-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 данной работе мы будем рассматривать случай, когда у первой (ведущей) лампы параметры фиксированы, а сам гиросгенератор со встречной волной находится в режиме периодической автомодуляции. У второй (ведомой) gyro-ЛВВ мы будем менять параметр неизохронности μ_2 таким образом, что лампа будет последовательно демонстрировать режимы стационарной генерации, периодической и хаотической автомодуляции выходного сигнала.

Итак, зафиксируем параметры первой лампы, когда она находится в автомодуляционном режиме (параметр неизохронности $\mu_1 = 2.4$). Огибающая выходного сигнала, спектр мощности в логарифмическом масштабе и проекция фазового портрета, построенная по огибающей сигнала ведущей gyro-ЛВВ, представлены на рис. 1. Проекция фазового портрета строилась с помощью метода Такенса со временем задержки $\tau = 5$ [21]. Из рисунка хорошо видно, что система находится в режиме периодической автомодуляции амплитуды выходного сигнала. Будем изменять параметр неизохронности ведомой лампы. Хорошо известно [10, 11], что при увеличении

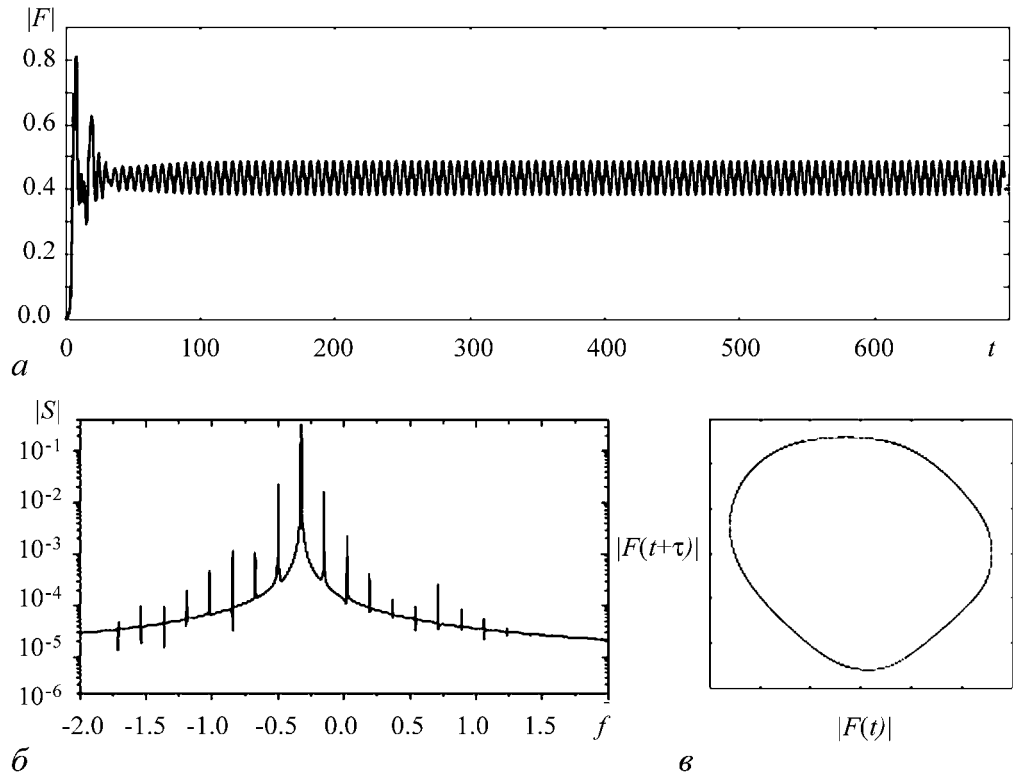


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала $|F_1(t)|$, спектр мощности и фазовый портрет колебаний ведущей гиро-ЛВВ при значении параметра неизохронности $\mu_1 = 2.4$

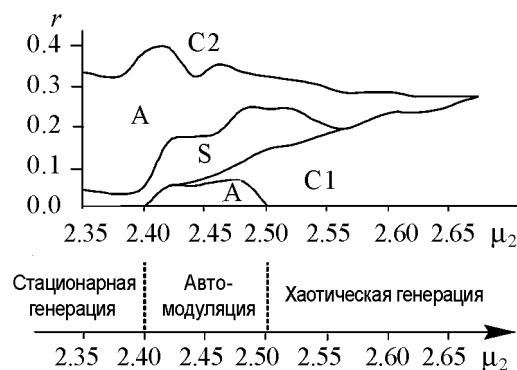


Рис. 2. Области реализации различных режимов колебаний в цепочке связанных гиро-ЛВВ. Здесь символом «S» обозначена область стационарной генерации, «A» – область автомодуляции, «C1» и «C2» – области различных режимов хаотической генерации. Внизу рисунка показаны области различных режимов колебаний при изменении параметра μ_2 в автономной гиро-ЛВВ

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, позволяя получить наглядное представление о динамике системы при увеличении параметра неизохронности и отсутствии внешнего сигнала ($r = 0$) от ведущего гирогенератора.

Рассмотрим нелинейную динамику цепочки гирогенераторов в целом. На рис. 2 показана карта режимов на плоскости управляющих параметров «параметр неизохронности μ_2 ведомого гирогенератора с обратной волной — амплитуда коэффициента связи r », на которой выделены характерные области динамики связанной системы.

При значениях $\mu_2 < 2.4$, как уже отмечалось выше, автономная ведомая гиро-ЛВВ находится в режиме стационарной генерации. При воздействии на нее сигнала сравнительно большой амплитуды (при $r > 0.04$) ведущей гиро-ЛВВ (находящейся в режиме периодической автомодуляции выходного сигнала) неавтономная вторая лампа начинает демонстрировать режим периодической автомодуляции в большом диапазоне изменения параметра однонаправленной связи r . При больших величинах амплитуды коэффициента однонаправленной связи $r > 0.3 \div 0.4$ (что соответствует подаче на вход ведомой лампы порядка $10 \div 20\%$ выходной мощности первой лампы) динамика ведомой гиро-ЛВВ хаотизируется и спектр генерации становится сплошным. Таким образом, использование цепочки однонаправленно связанных гирогенераторов со встречной волной позволяет существенно снизить порог возникновения хаотической генерации.

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 А на рисунке). 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 С1). С ростом параметра неизохронности μ_2 и коэффициента связи r область на плоскости параметров, занимаемая режимом С1, расширяется. При $\mu_2 \approx 2.5$ в ведомой системе в автономном режиме ($r = 0$) устанавливается хаотическая генерация. 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. После переходного процесса, длительность которого уменьшается с ростом коэффициента связи (ср. рис. 3, а и рис. 3, б), в системе устанавливается режим стационарной генерации, который характеризуется одночастотным спектром и неизменной амплитудой поля на выходе системы.

Следует отметить, что при малых значениях $\mu_2 \approx 2.4$ 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 гиролампы пороговое значение r , при котором начинается стационарная генерация, повышается (от $r = 0.05$ при $\mu_2 \approx 2.4$

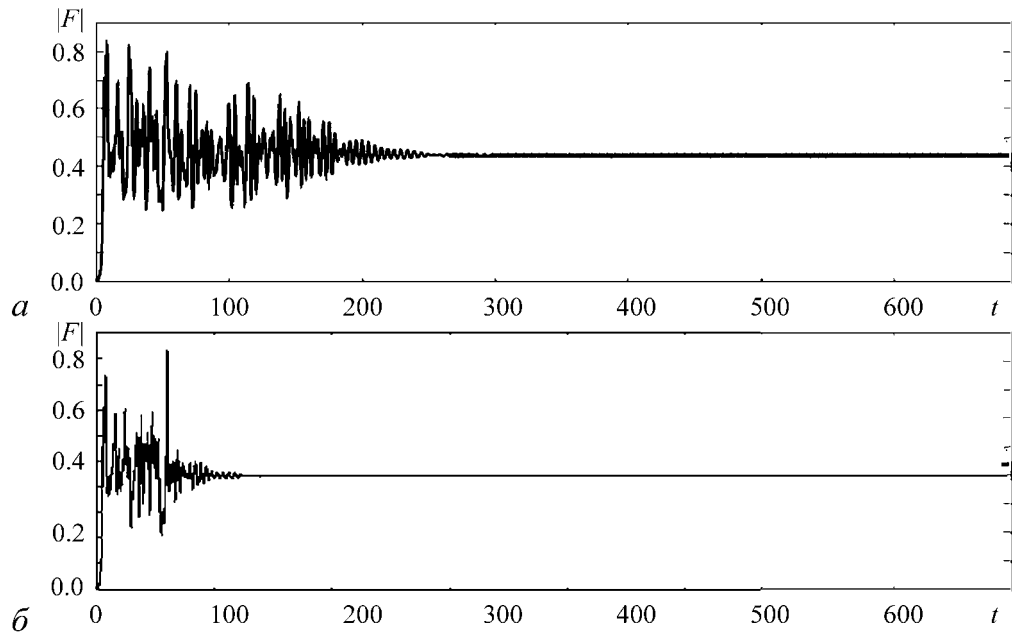


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала $|F_2(t)|$ ведомой giro-ЛВВ при различных значениях коэффициента связи $r = 0.15$ (а) и $r = 0.18$ (б) при значении параметра неизохронности $\mu_2 = 2.5$

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.

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 спектра мощности на рис. 4. Тот же самый вывод можно сделать из анализа проекции фазового портрета колебаний амплитуды выходного поля $|F_2|$, который типичен для двухчастотных колебаний с несоизмеримыми частотами. Для подтверждения данного вывода строилось сечение Пуанкаре по колебаниям амплитуды выходного поля и было показано, что вид сечения Пуанкаре соответствует гладкой замкнутой инвариантной кривой, что также подтверждает вышеприведенный вывод о возникновении двухчастотной модуляции амплитуды выходного сигнала ведомой giro-ЛВВ.

Наконец, при больших воздействиях ведущей системы на ведомую (при $r > 0.3 \div 0.4$) 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 хаотической генерации показаны на рис. 5. Данный режим характеризуется сильно нерегулярными колебаниями амплитуды выходного сигнала, сложной нере-

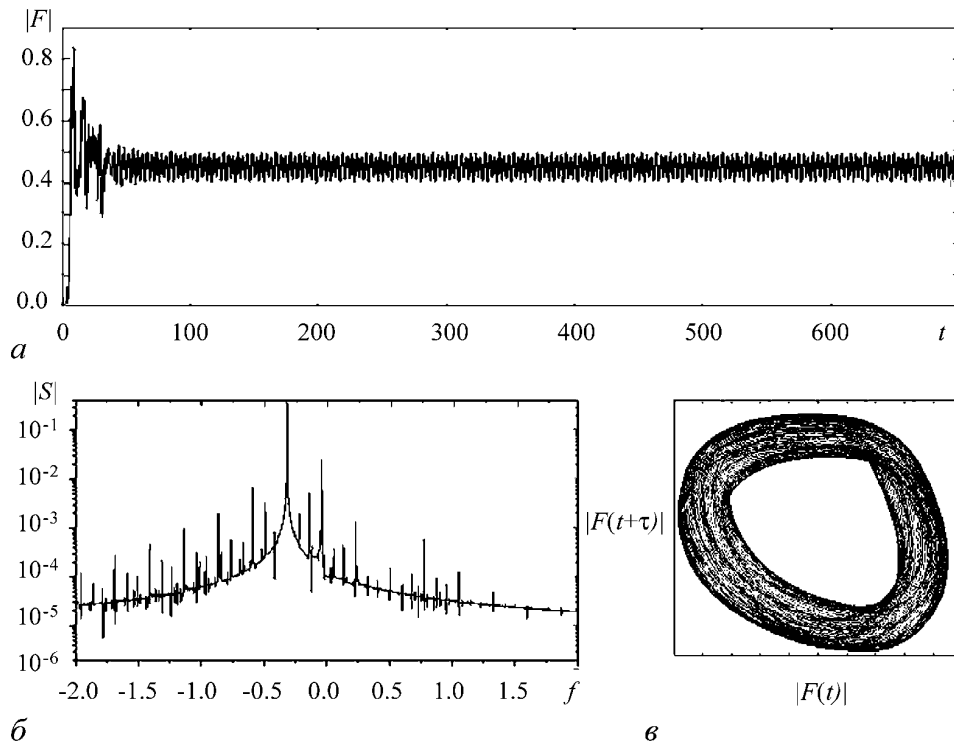


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала $|F_2(t)|$, спектр мощности и фазовый портрет колебаний ведомой гиро-ЛВВ при значении параметра неизохронности $\mu_2 = 2.5$ и коэффициенте связи $r = 0.28$. Неавтономная гиро-ЛВВ находится в режиме квазипериодической модуляции выходного сигнала

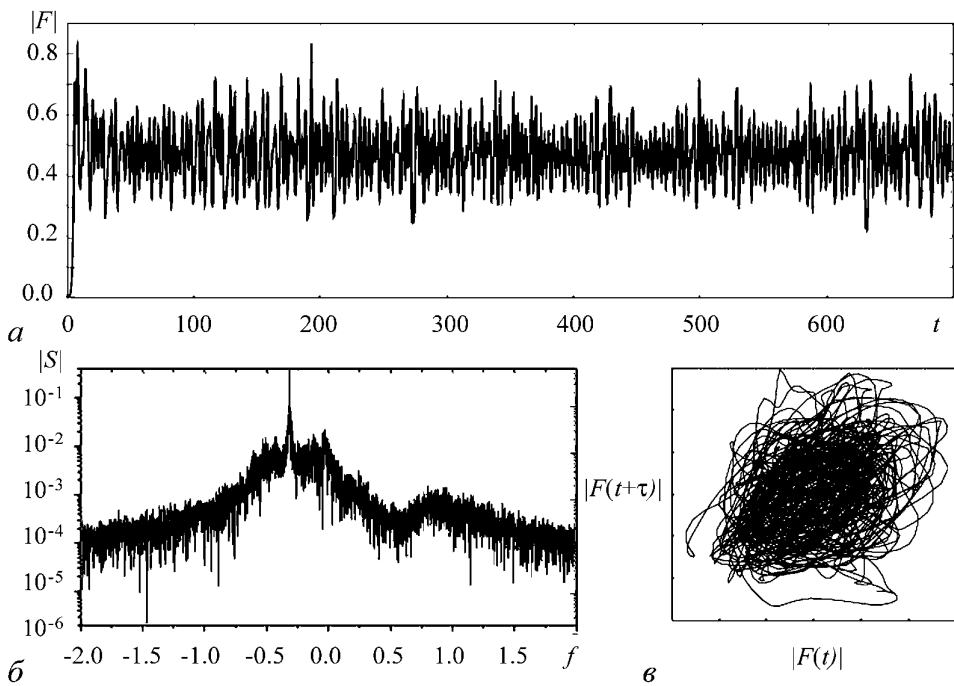


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала $|F_2(t)|$, спектр мощности и фазовый портрет колебаний ведомой гиро-ЛВВ при значении параметра неизохронности $\mu_2 = 2.5$ и коэффициенте связи $r = 0.4$. Неавтономная гиро-ЛВВ находится в режиме развитой хаотической модуляции выходного сигнала

гулярной структурой фазового портрета колебаний и сплошным спектром мощности со сравнительно высоким шумовым пьедесталом вблизи основной частоты генерации. Можно предположить, что в рассматриваемой системе при больших значениях коэффициента связи будет реализоваться переход к хаосу через разрушение квазипериодических колебаний.

Таким образом, можно сделать вывод, что при изменении управляющих параметров в цепочке связанных giro-ЛВВ, находящихся в автономном состоянии в режимах многочастотной генерации, наблюдается сложная перестройка режимов колебаний от стационарной одночастотной генерации до режимов развитой хаотической генерации.

Рассмотрим кратко в заключение обсуждения динамики цепочки связанных giro-ЛВВ пространственно-временную динамику в винтовом электронном пучке, взаимодействующем со встречной волной в неавтономной ведомой системе, определяющую установление вышеописанных режимов колебаний в ведомом giroгенераторе.

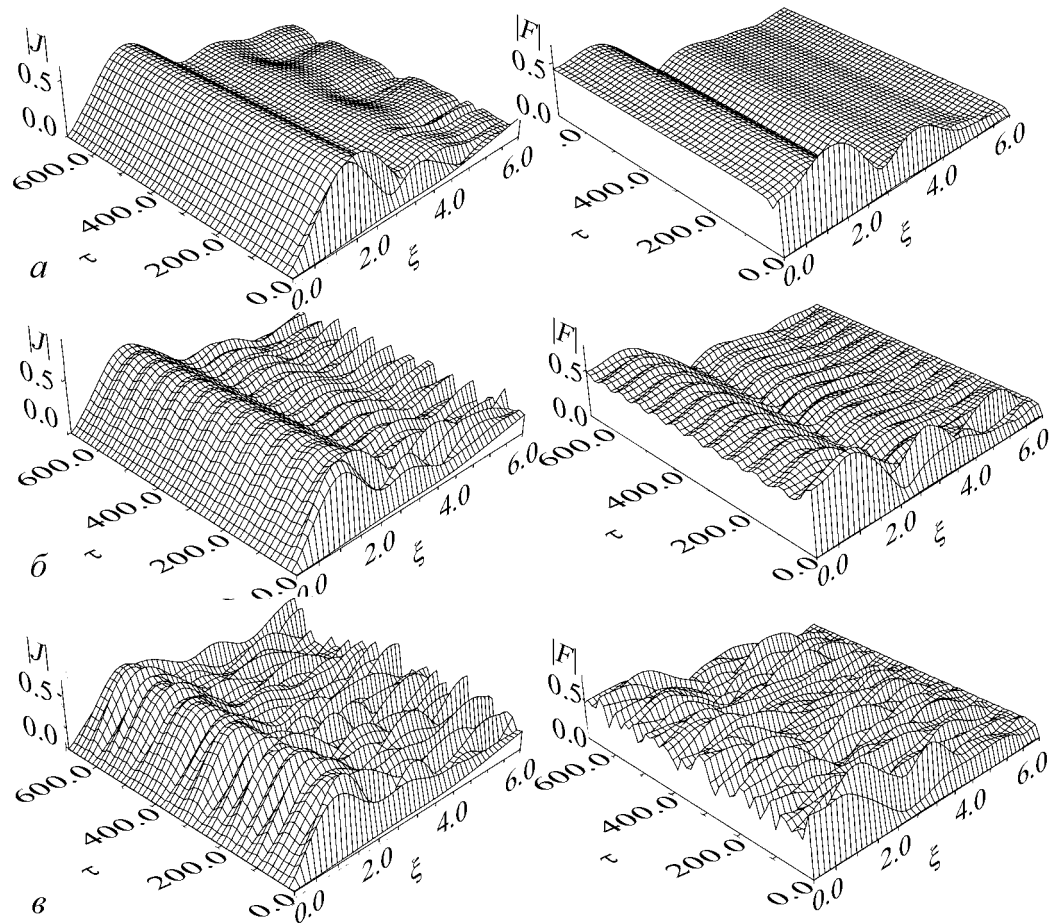


Рис. 6. Пространственно-временные распределения первой гармоники тока $|J_2(t, \xi)|$ (слева) и амплитуды поля $|F_2(t, \xi)|$ (справа) ведомой giro-ЛВВ для различных значений коэффициента связи τ : 0.18 (а); 0.28 (б); 0.4 (в)

торе со встречной волной. Для этого рассмотрим пространственно-временные распределения амплитуды поля и первой гармоники сгруппированного тока в неавтономной гиро-ЛВВ. На рис. 6 показаны соответствующие зависимости для различных значений коэффициента связи r и параметра 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 (рис. 6, а). Вблизи выходного ($\xi = 0$) конца пространства взаимодействия переменные, описывающие систему, ведут себя неизменным образом во времени, при этом в области $\xi \approx 1.5$ наблюдается перегруппировка электронного потока, что выражается в возникновении максимума на зависимости тока $|J_2(\xi)|$. В 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. 6, а, не приводит к модуляции амплитуды выходного поля гиро-ЛВВ. В режиме квазипериодической модуляции выходного сигнала (рис. 6, б, $r = 0.28$) наблюдается хорошо известная картина возникновения автомодуляции в гиролампе со встречной волной под воздействием внешнего сигнала (см. подробнее [22, 23]). В режимах развитой хаотической генерации, как видно из рис. 6, в, 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, сложному спектральному составу генерируемого сигнала (см. рис. 4).

Заключение

В работе проведено численное исследование нелинейных нестационарных процессов в цепочке однонаправленно связанных гирогенераторов со встречной волной при изменении основных управляющих параметров такой системы (параметра неизохронности второй гиро-ЛВВ, параметра связи между лампами, составляющими цепочку гироприборов). Выявлена сложная картина перестройки режимов колебаний при изменении управляющих параметров в подобной системе, построена карта режимов, описывающая динамику связанных систем, проанализированы характеристики выходного сигнала цепочки связанных генераторов в различных режимах работы системы. Было показано, что существует возможность снижения порога возникновения хаотической автомодуляции в цепочке однонаправленно связанных гиро-ЛВВ.

Работа поддержана РФФИ (грант № 08-02-90002), 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 ФНП «Династия».

Библиографический список

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.* Communication with a chaotic traveling wave tube microwave generator // *Chaos*. 2004. Vol. 14, № 1. P. 30.
3. *Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О.* Динамический хаос как парадигма современных систем связи // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1997. Vol. 10. P. 4.
4. *Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Панас А.И., Старков С.О.* Эксперименты по передаче информации с использованием хаоса через радиоканал // *Радиотехника и электроника*. 1998. Vol. 43. P. 1115.
5. Applications of Nonlinear Dynamics to Electronic and Information Engineering // *Proc. IEEE. Special Issue*. 2002. Vol. 90, № 5.
6. *Felch K.L., Danly B.G., Jory H.R., Kreischer K.E., Lawsom W., Levush B., Temkin R.J.* Characteristics and applications of fast-wave gyrodevices // *Proc. IEEE*. 1999. Vol. 87, № 5. P. 752.
7. *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Antonsen T.M.* Nonstationary phenomena in tapered gyro-backward-wave oscillators // *Phys. Rev. Lett*. 2001. Vol. 87, № 21. 218301.
8. *Grudiev A., Schünemann K.* Numerical analysis of an injection-locked gyrotron backward-wave oscillator with tapered sections // *Phys. Rev. E*. 2003. Vol. 68. 016501.
9. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
10. *Трубецков Д.И., Четвериков А.П.* Автоколебания в распределенных системах «электронный поток – встречная (обратная) электромагнитная волна» // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 1994. Т. 2, № 5. С. 9.
11. *Дмитриев А.Ю., Трубецков Д.И., Четвериков А.П.* Нестационарные процессы при взаимодействии винтового электронного пучка со встречной волной в волноводе // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1991. Т. 34, № 9. С. 595.
12. *Рыскин Н.М., Титов В.Н.* Переход к развитому хаосу в цепочке двух однонаправленно-связанных ламп обратной волны // *ЖТФ*. 2003. Т. 73, № 9. С. 90.
13. *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1978. Т. 21, № 7. С. 1037.
14. *Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Экспериментальное наблюдение стохастических автоколебаний в динамической системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна // *Письма в ЖЭТФ*. 1979. Т. 29, № 3. С. 180.
15. *Рыскин Н.М., Титов В.Н., Трубецков Д.И.* Детали перехода к хаосу в системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна // *Доклады Академии Наук*. 1998. Т. 358, № 5. С. 620.
16. *Рыскин Н.М., Титов В.Н.* О сценарии перехода к хаосу в однопараметрической модели лампы обратной волны // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 1998. Т. 6, № 1. С. 75.
17. *Трубецков Д.И., Анфиногентов В.Г., Рыскин Н.М., Титов В.Н., Храмов А.Е.* Сложная динамика электронных приборов СВЧ (нелинейная нестационарная

- теория с позиций нелинейной динамики)//Радиотехника. 1999. Т. 63, № 4. С. 61.
18. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Popov P.V., Rempen I.S.* Chaotic synchronization of coupled electron-wave systems with backward waves // *Chaos*. 2005. Vol. 15, № 1. P. 013705.
 19. *Юлматов В.К.* Нелинейная теория взаимодействия непрямолинейного периодического электронного пучка с электромагнитным полем // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. I. Электроника*. 1965. № 12. С. 15.
 20. *Дмитриев А.Ю., Коневец А.Е., Пищик Л.А., Трубецков Д.И., Четвериков А.П.* Обзорные лекции по теории взаимодействия слаборелятивистских винтовых электронных пучков с электромагнитными волнами в волноводе // *Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 7-я зимняя школа-семинар*. Кн. 1. Саратов, 1981, 61.
 21. *Takens F.* Detecting strange attractors in dynamical systems and turbulence. N.Y.: Springer-Verlag, 1981.
 22. *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Влияние внешнего сигнала на автоколебания распределенной системы винтовой электронный пучок – встречная электромагнитная волна // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2002. Т. XLV, № 9. С. 773.
 23. *Трубецков Д.И., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Синхронизация распределенных автоколебательных систем электронно-волновой природы с обратной волной // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2004. Т. XLVII, № 5–6. С. 343.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

*Поступила в редакцию
После доработки*

*13.02.2008
10.07.2008*

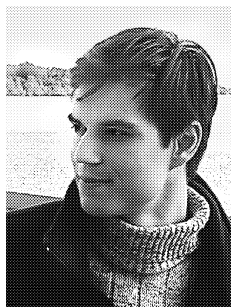
NUMERICAL INVESTIGATION OF NONLINEAR NONSTATIONARY PROCESS IN A CHAIN OF COUPLED GYRO-BACKWARD-WAVE OSCILLATORS

M.V. Beloglazkina, A.E. Hramov, A.A. Koronovskii

In this work the nonlinear dynamics in a chain of unidirectionally coupled gyro-backward-wave oscillators is studied. In coupled system, when the control parameters of each distributed system are changed, it is possible to show both a developed chaos dynamics and the regimes of stationary oscillations with one frequency.



Белоглазкина Марина Владимировна родилась 6 сентября 1984 года. Окончила Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (СГУ) в 2007 году. В настоящее время работает ассистентом кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область интересов: хаотическая динамика распределенных автоколебательных систем электронно-волновой природы. Опубликована одна статья и семь тезисов в трудах конференций.



Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физ.-мат. наук. Профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – радиофизика в той ее части, которая связана со взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями, нелинейная динамика распределенных активных сред, методы анализа и моделирования динамических систем. Опубликовал в соавторстве с чл.-корр. РАН, профессором Д.И. Трубецковым книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004) и в соавторстве с доцентом А.А. Короновским монографии «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003) и «Непрерывный вейвлетный анализ в приложениях к задачам нелинейной динамики» (Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002).
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru



Короновский Алексей Александрович – родился в Саратове (1972). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995), доктор физико-математических наук (2007), профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой деятельности, в том числе нелинейная динамика социально-экономических процессов. Автор ряда статей в центральной печати, а также монографий (в соавторстве) «Нелинейная динамика в действии» и «Непрерывный вейвлетный анализ», вышедших в Издательстве ГосУНЦ «Колледж».
E-mail: alkor@nonlin.sgu.ru