

09;12

Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью

© Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, Д.В. Клокотов, Н.М. Рыскин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410026 Саратов, Россия
e-mail: knf@sgu.ru

(Поступило в Редакцию 28 марта 2002 г. В окончательной редакции 10 января 2003 г.)

Изложены результаты экспериментальных исследований основных характеристик многорезонаторного клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью в различных автоколебательных режимах (одночастотная генерация, регулярная и хаотическая автомодуляция). Представлены полученные экспериментально карты динамических режимов на плоскости параметров ток пучка–ускоряющее напряжение. Изучены основные сценарии перехода к хаосу. Обнаружено, что по мере увеличения тока пучка и глубины обратной связи наблюдается сложная последовательность чередования регулярных и хаотических режимов генерации. Показано, что последовательная подстройка управляющих параметров позволяет добиться существенного увеличения мощности хаотических колебаний.

Введение

Актуальной задачей современной радиофизики и электроники является исследование сложной динамики и хаоса в различных генераторах вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Интерес к данной проблеме обусловлен, с одной стороны, необходимостью изучения разного рода паразитных неустойчивостей с целью их подавления, с другой стороны, потребностью в мощных источниках СВЧ излучения с относительно широким спектром, что достигается в режимах хаотической генерации. Подобные источники представляют интерес для ряда практических приложений, таких как линейные ускорители заряженных частиц, СВЧ нагрев плазмы, технологические установки, современные системы передачи и обработки информации с использованием динамического хаоса.

Для указанных выше приложений весьма перспективными представляются автогенераторы с запаздывающей обратной связью на основе многорезонаторных клистронов, отличающихся высоким уровнем мощности и большим КПД. Однако вопросы сложной динамики таких генераторов остаются почти неисследованными. Особенно следует отметить недостаток экспериментальных результатов.

В работе [1] были приведены предварительные результаты экспериментального исследования хаотического поведения многорезонаторного клистрона-генератора, а также построена и изучена теоретическая модель генератора на основе двухрезонаторного клистрона, поведение которой качественно согласуется с экспериментом. Настоящая работа посвящена изложению результатов подробных экспериментальных исследований основных характеристик многорезонаторного клистронного автогенератора в различных автоколебательных режимах: одночастотных, многочастотных квазигармонических, хаотических.

Описание установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве объекта исследований был взят промышленный пятирезонаторный клистрон среднего уровня мощности десятисантиметрового диапазона (1) с источниками питания (10). В клистроне использованы двухззорные объемные резонаторы, работающие на противофазном виде колебаний. Входной резонатор клистрона соединен с выходным коаксиальной линией обратной связи. В цепь обратной связи через направленные ответвители (2) последовательно включены кристаллический детектор для наблюдения огибающей сигнала (6) на осциллографе (7), второй кристаллический детектор (6) для наблюдения на экране осциллографа (9) двумерной проекции фазового портрета колебательных процессов с помощью метода задержки; анализатор спектра (5) для исследования полного СВЧ спектра сигналов в широкой полосе частот, цифровой

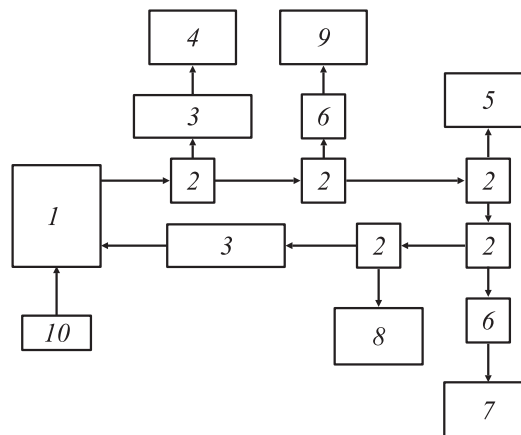


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

частотомер (8) для измерения частоты квазигармонических колебаний, термисторный измеритель мощности (4) с поляризационным аттенуатором (3), поляризационный аттенуатор (3) для изменения глубины обратной связи.

Электрическая длина линии обратной связи с учетом диэлектрического заполнения составила 105 длин волн. Нагруженная добротность входного объемного резонатора клистрона $Q_{in} = 250$, выходного $Q_{out} = 125$. Собственная добротность резонаторов $Q_0 = 460$, собственная частота $f_0 = 2800$ МГц. Полное время запаздывания вдоль кольца обратной связи, определенное с учетом длины линии обратной связи, времени пролета электронов в пространстве дрейфа и добротности резонаторов клистрона, было порядка $0.3 \mu\text{s}$, а постоянная времени объемных резонаторов порядка $0.05 \mu\text{s}$. В качестве управляющих параметров использовались ток электронного пучка и затухание в цепи обратной связи.

Описанная установка обеспечивает возможность изучения работы автогенератора при одновременном наблюдении осциллограмм огибающей сигнала, его полного спектра, фазового портрета, а также измерения частоты и уровня выходной мощности. Таким образом, она позволяет достаточно точно идентифицировать характер различных колебательных режимов, включая режимы регулярной и хаотической автомодуляции.

Результаты экспериментальных исследований

Прежде всего была изучена зависимость пускового тока генерации от ускоряющего напряжения. Полученная зависимость определила рабочий интервал ускоряющих напряжений (1000–3000 В). Подобно другим генераторам с запаздыванием (см., например, [2]) данный генератор характеризуется дискретно расположенными зонами колебаний, соответствующих фазовым условиям самовозбуждения. На рис. 2 приведены границы зон генерации на плоскости параметров ток пучка I_0 –ускоряющее напряжение U_0 (затухание в цепи обратной связи отсутствует). В выбранном интервале ускоряющих напряжений наблюдаются пять зон генерации.

Положение центров зон генерации, т.е. значения U_0 , при которых пусковой ток минимален, можно оценить теоретически, пользуясь фазовым условием самовозбуждения. Для многорезонаторного клистрона-генератора в простейшем случае синхронной настройки это условие имеет вид

$$m\Theta_0 + \omega_0\delta t = 2\pi n - \pi t/2. \quad (1)$$

Здесь $\Theta_0 = \omega_0 l / \sqrt{2\eta U_0}$ — невозмущенный угол пролета между двумя соседними резонаторами, ω_0 — собственная частота резонаторов, δt — время распространения сигнала по цепи обратной связи, η — удельный заряд электрона, l — расстояние между двумя соседними резонаторами (в исследуемом клистроне резонаторы

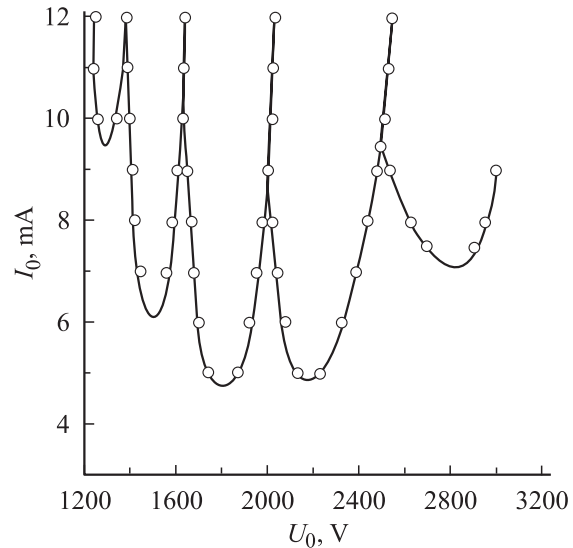


Рис. 2. Границы зон генерации на плоскости параметров: ток пучка I_0 –ускоряющее напряжение U_0 .

расположены эквидистантно), m — число каскадов (в данном случае 4), n — целое число. Физический смысл соотношения (1) очевиден: в оптимальном случае изменение фазы сигнала, прошедшего по кольцу обратной связи составляет целое число 2π . Появление последнего слагаемого в правой части связано с тем, что каждый модулирующий резонатор вносит сдвиг фазы на $\pi/2$. Следует отметить, что в исследуемом клистроне имелась расстройка промежуточных резонаторов по частоте, обеспечивающая повышение эффективности в режиме усиления. Специально проведенный физический эксперимент показал, что расстройка незначительна и составляет величину менее 1%. Положения центров зон, рассчитанные по формуле (1), достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Как видно из рис. 2, наименьшие стартовые токи имеют зоны, расположенные в центре рабочего диапазона ускоряющих напряжений. Это объясняется следующим образом. Можно показать, что коэффициент усиления клистрона K определяется параметром усиления [2,3]

$$\alpha = \rho M^2 I_0 \Theta_0 / 4U_0, \quad (2)$$

который имеет смысл усиления одного каскада на резонансной частоте. В формуле (2) ρ — характеристическое сопротивление резонаторов, M — коэффициент электронного взаимодействия. В частности, в центре зоны генерации $K \sim \alpha^m$. Тогда амплитудному условию самовозбуждения можно придать простой вид $\mu \alpha^m > 1$, где μ — глубина обратной связи ($0 < \mu < 1$). Отсюда следует, что с ростом U_0 стартовый ток в центре зоны должен расти пропорционально $U_0^{3/2}$. С другой стороны, для используемого типа резонаторов (двухзачерные резонаторы с бессеточным зазором) в низковольтной части рабочего диапазона уменьшается параметр M . Вследствие этого стартовые токи опять увеличиваются.

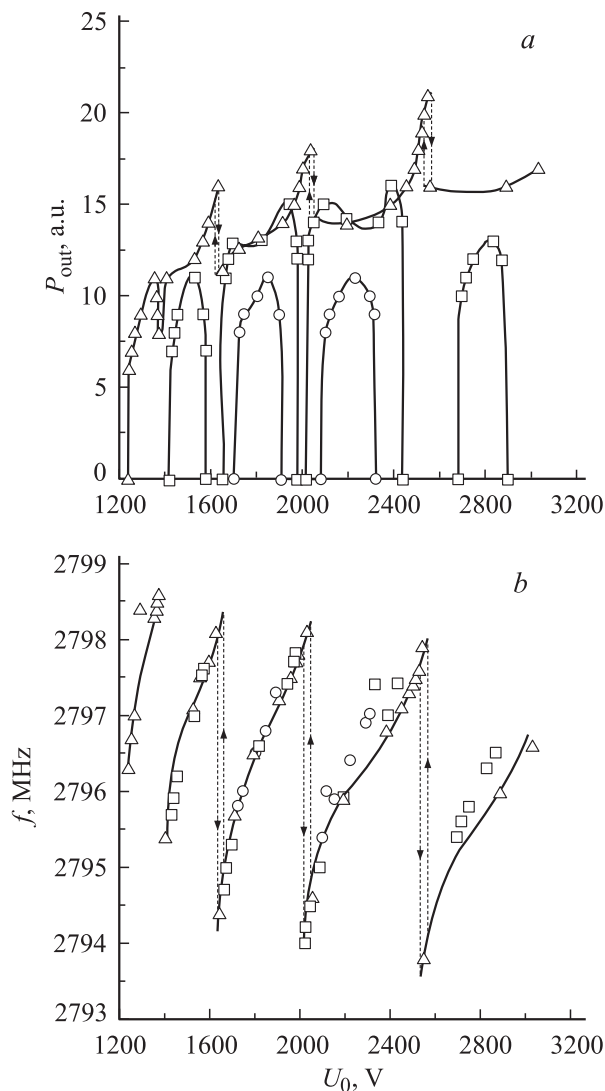


Рис. 3. Зависимости мощности (а) и частоты (б) колебаний от ускоряющего напряжения для различных значений тока пучка: \circ — 6, \square — 8, \triangle — 12 мА.

Следует подчеркнуть, что представленные выше рассуждения не носят строгого характера и служат лишь для качественного объяснения результатов эксперимента. Изложению строгой теории, учитывающей, в частности, наличие расстройки резонаторов, и сопоставлению результатов эксперимента и численного моделирования будет посвящена отдельная работа.

Когда ток пучка превышает порог самовозбуждения, наблюдаются режимы стационарной одночастотной генерации. На рис. 3 приведены зависимости мощности (а) и частоты колебаний (б) от ускоряющего напряжения для разных значений тока пучка. При токе 6 мА возбуждаются лишь две зоны. С ростом тока мощность растет, зоны расширяются, а их число увеличивается (ср. рис. 2). При этом зоны деформируются, максимум мощности в зоне смещается в область более высоких напряжений.

Дальнейшее увеличение тока приводит к тому, что зоны начинают перекрываться. Вблизи их границ зависимости мощности и частоты от U_0 становятся неоднозначными. В этой области имеет место бистабильность, т. е. при одних и тех же значениях параметров в зависимости от начальных условий устанавливаются колебания на одной из двух соседних собственных мод. Подобное поведение типично для автогенераторов с запаздыванием (см., например, [4–6]). При плавном изменении ускоряющего напряжения наблюдается жесткий переход из одной зоны в другую, который сопровождается гистерезисом (рис. 3). Следует отметить, что именно в точках жесткого перехода имеются резко выраженные максимумы выходной мощности.

При значительном превышении тока над порогом самовозбуждения одночастотный режим становится неустойчивым и сменяется режимом периодической автомодуляции когда амплитуда выходного сигнала начинает осциллировать около стационарного значения. При этом на фазовом портрете огибающей сигнала мягко возникает предельный цикл, а в спектре появляется пара спутников, симметрично отстоящих от основной частоты на величину $f_{sm} \approx 3.6$ MHz. Минимальный ток, при котором возникает автомодуляция, $I_{sm} \approx 13$ mA.

Как было отмечено в [1], физическая причина автомодуляции связана с наличием на амплитудной характеристике усилителя крутого падающего участка. Его появление обусловлено перегруппировкой электронов при больших входных сигналах. Такой механизм автомодуляции принято называть амплитудным [7–9]. На рис. 4 приведена полученная экспериментально при помощи автогенераторного метода амплитудная характеристика исследуемого клистрона: зависимость выходной мощности P_{out} от входной мощности P_{in} , построенная в двойном логарифмическом масштабе. На этом рисунке также

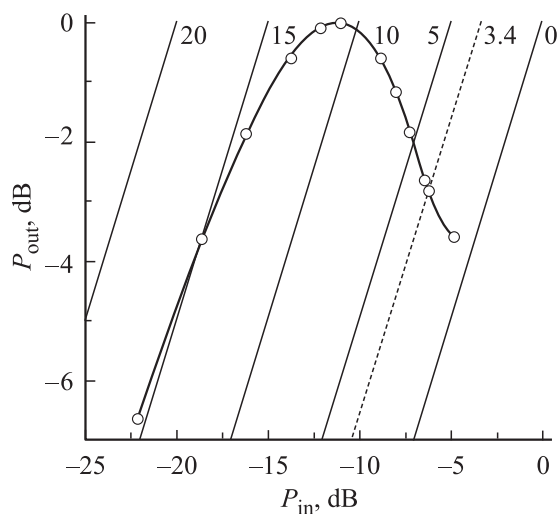


Рис. 4. Амплитудная характеристика исследуемого клистрона. Нанесены прямые постоянной обратной связи, цифры — значения затухания в цепи обратной связи в dB.

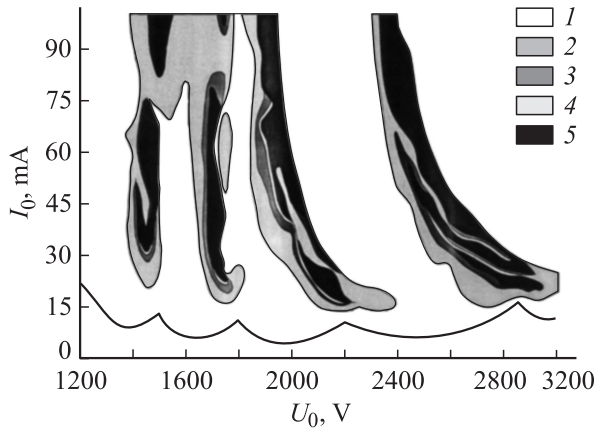


Рис. 5. Карта динамических режимов на плоскости параметров (I_0, U_0) . 1 — одночастотная генерация, 2 — периодическая автомодуляция, 3 — автомодуляция с удвоенным периодом, 4 — автомодуляция с учетверенным периодом, 5 — хаотическая динамика.

нанесены линии обратной связи $L = P_{\text{out, dB}} - P_{\text{in, dB}}$, где $L = -20 \lg \mu$ — затухание в цепи обратной связи в децибелах. Точки, в которых прямые обратной связи пересекают амплитудную характеристику, соответствуют

мощности в установившемся режиме генерации [10]. Возникновению регулярной автомодуляции соответствует линия $L = 3.4 \text{ dB}$, пересекающая характеристику в области отрицательной крутизны. Это подтверждает наличие амплитудного механизма потери устойчивости.

Дальнейшее увеличение тока пучка приводит к хаотизации колебаний. Как известно, для систем с амплитудным механизмом автомодуляции наиболее характерным является переход к хаосу по сценарию Фейгенбаума, т.е. через последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции (см., например, [6–9,11,12]). На рис. 5 представлена карта динамических режимов на плоскости параметров на области с различным характером колебаний. Карта построена для случая $L = 20 \text{ dB}$. На этой диаграмме выделены области одночастотной генерации, периодической автомодуляции, автомодуляция с удвоенным и учетверенным периодом и области хаотической динамики. Области автомодуляции имеют вид отдельных зон, разделенных обширными участками одночастотной генерации. С ростом тока можно наблюдать слияние некоторых из них (например, в области $U_0 \approx 1500 \text{ V}$ на рис. 5).

Как и ожидалось, доминирующим является переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения

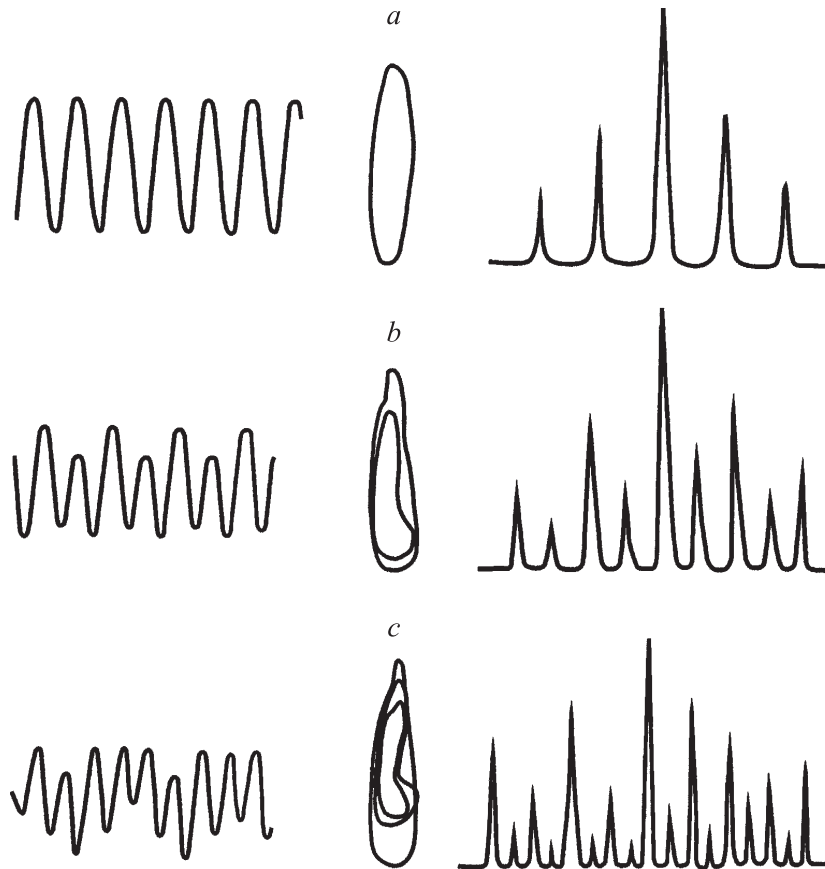


Рис. 6. Огибающие, фазовые портреты и спектры сигналов при различных значениях затухания в цепи обратной связи: $L = 1.7$ (a), 0.9 (b), 0.4 dB (c).

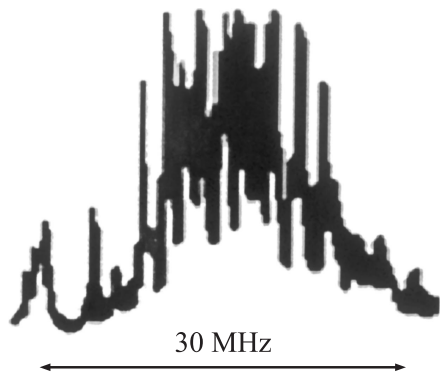


Рис. 7. Спектр хаотических колебаний в режиме „развитого“ хаоса.

периода. Изменение спектра, фазового портрета и огибающей сигнала при переходе к хаосу иллюстрирует рис. 6. В данном случае в качестве управляющего параметра использовалась глубина обратной связи L . Из-за наличия флуктуаций удастся уверенно не более трех бифуркаций удвоения периода. Как видно из рис. 5, уже области колебаний с учетверенным периодом очень узкие, так что зафиксировать их достаточно сложно.

Следует отметить, что линии различных бифуркаций имеют довольно сложный вид (что типично для систем с несколькими управляющими параметрами). Поэтому сценарий Фейгенбаума можно наблюдать, лишь двигаясь по плоскости параметров соответствующим образом. Если же зафиксировать, например, ускоряющее напряжение и просто увеличивать ток пучка, то можно, вообще говоря, наблюдать самые разнообразные последовательности смены колебательных режимов. Например, могут происходить жесткие переходы к хаосу из режимов регулярной автомодуляции и даже из режимов одночастотной генерации, которые сопровождаются гистерезисными явлениями. С другой стороны, существуют интервалы ускоряющих напряжений, в которых во всем доступном интервале изменения тока генерация остается одночастотной, не возникает даже регулярная автомодуляция.

Обратим внимание на то, что в большинстве зон генерации области периодической автомодуляции имеют вид узких „язычков“, вдающихся далеко вглубь в области хаоса. Внутри различных „язычков“ наблюдаемые проекции фазового портрета представляют собой циклы топологически различной формы. С ростом тока пучка, как правило, форма усложняется. На первоначально „гладком“ цикле (пример которого приведен на рис. 6, *a*) образуются петли. Соответственно усложняется и временная реализация выходного сигнала: в течение одного периода колебаний наблюдается несколько локальных максимумов. Одновременно уменьшается частота автомодуляции. Такое поведение является характерной особенностью автоколебательных систем с запазыванием (более подробно данная картина описывается в [6]).

Внутри областей со сложной динамикой также имеются многочисленные „окна“ регулярного поведения. Они образуют сложную структуру и ввиду своего малого размера на рис. 5 не показаны. Вблизи границ перехода к хаосу спектр хаотических колебаний является сильно изрезанным, с ярко выраженными максимумами на частотах автомодуляции. При больших токах пучка происходит переход к колебаниям с существенно более однородным спектром, имеющим полосу примерно 32 MHz (рис. 7). При этом на фазовом портрете уже не различима какая-либо крупномасштабная структура. Подобные режимы, которые можно квалифицировать как так называемый „развитый“ хаос, являются особенностью систем с большим числом степеней свободы и характерны для многих других вакуумных СВЧ автогенераторов [6,11,12]. Максимально достижимая мощность колебаний в таком режиме составила 41 W при КПД 35%.

Заключение

Резонансный автогенератор на основе многорезонаторного клистрона представляет собой относительно простой и исключительно удобный объект для экспериментального изучения хаотических автоколебаний в СВЧ диапазоне. Данный прибор является типичным представителем автоколебательных систем с запаздывающей обратной связью и демонстрирует многие особенности сложного поведения, присущие подобным системам [4–6,11,12] (мультистабильность и гистерезис, усложнение формы предельных циклов, многократное чередование регулярных и хаотических режимов, переход к „развитому“ хаосу и т.д.). Следует ожидать, что он займет место в ряду эталонных моделей СВЧ электроники со сложной динамикой, таких как ЛОВ и ЛБВ генераторы.

Представленные результаты экспериментальных исследований показывают, что подстройкой управляющих параметров (ток пучка, ускоряющее напряжение, глубина обратной связи и т.д.) можно реализовать разнообразные регулярные и хаотические режимы генерации. Хаотическое поведение удастся наблюдать в достаточно широком диапазоне управляющих параметров. Для других генераторов это может оказаться настолько затруднительным, что требуется конструировать довольно специфические макеты (см., например, [5,13]). Важно отметить, что существует большое число хаотических режимов, которым соответствуют странные аттракторы различных типов. Целью дальнейших исследований будет выяснение „тонкой структуры“ хаотических колебаний, что поможет выявить общие закономерности сложной динамики распределенных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 03-02-16269), „Университеты России“ (№ 01.01.021) и CRDF (Award No. REC-006).

Список литературы

- [1] *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Рыскин Н.М., Шигаев А.М.* // РИЭ. 2001. Т. 46. № 5. С. 604–610.
- [2] *Шевчик В.Н.* Основы электроники сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1959.
- [3] *Гайдук В.И., Палатов К.И., Петров Д.М.* Физические основы электроники СВЧ. М.: Сов. радио, 1971.
- [4] *Калинин В.И., Залогин Н.Н., Кислов В.Я.* // РИЭ. 1983. Т. 28. № 10. С. 2001–2007.
- [5] *Кац В.А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 2. С. 161–176.
- [6] *Рыскин Н.М., Шигаев А.М.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 7. С. 1–8.
- [7] *Кузнецов С.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 12. С. 1410–1428.
- [8] *Блиох Ю.П., Бородкин А.В., Любарский М.Г.* и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1993. Т. 1. № 1–2. С. 34–49.
- [9] *Блиох Ю.П., Любарский М.Г., Подобинский В.О., Файнберг Я.Б.* // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7–8. С. 718–728.
- [10] *Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н.* Основы теории колебаний. М.: Наука, 1978.
- [11] *Рыскин Н.М., Титов В.Н., Трубецков Д.И.* // ДАН. 1998. Т. 358. № 5. С. 620–623.
- [12] *Рыскин Н.М., Титов В.Н.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6. № 1. С. 75–92.
- [13] *Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* // РИЭ. 1983. Т. 28. № 6. С. 1136–1139.