



НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЗОНАНС И ПЕРЕХОД К ХАОСУ В РЕЗОНАНСНЫХ СВЧ АУТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, Д.В. Клокотов, Ю.И. Левин

В резонансных СВЧ автоколебательных системах с запаздывающей обратной связью экспериментально исследовано явление нелинейного резонанса. Возникновение регулярной автомодуляции с увеличением глубины обратной связи наблюдается прежде всего вблизи высокочастотной границы нелинейного резонанса. Переход к хаосу происходит как через последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции, так и путем жесткого перехода из режима регулярной автомодуляции.

Введение

Автоколебательные системы с запаздыванием демонстрируют сложную, в том числе и хаотическую, динамику. Они могут быть использованы в качестве источников шумоподобных сигналов с управляемыми параметрами, имеющих разнообразное применение. Важным вопросом для этих систем является изучение механизмов перехода от простых одночастотных колебаний к хаотическим. Эти механизмы и их связь с нелинейным резонансом ранее экспериментально были исследованы на автоколебательной системе с запаздыванием в виде ЛБВ, выход которой соединен с входом [1]. Для резонансных СВЧ автогенераторов явление нелинейного резонанса и его связь с механизмами перехода к хаосу прежде не рассматривались. Суть нелинейного резонанса, как известно, состоит в том, что в нелинейной системе вследствие неизохронности условия резонанса с изменением амплитуды изменяются. Из-за этого динамика нелинейной системы может оказаться чрезвычайно сложной [2].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований явления нелинейного резонанса и механизмов перехода от простых периодических колебаний к хаотическим для резонансного автогенератора с запаздывающей обратной связью на многорезонаторном клистроне.

Схема установки и результаты экспериментальных исследований

В качестве объекта исследования применялся пятирезонаторный клистрон среднего уровня мощности десятисантиметрового диапазона. В клистроне

использованы двухззорные объемные резонаторы, работающие на противо-фазном виде колебаний. Выходной резонатор клистрона соединен с входным коаксиальной линией обратной связи (ОС). В цепь ОС, начиная от выходного резонатора, последовательно, через направленные ответвители включены: измеритель мощности; детекторы для наблюдения на экране осциллографов огибающей сигнала и двумерной проекции фазовых портретов колебательных процессов; анализатор спектра для исследования полного спектра сигналов в широкой полосе частот; электронный цифровой частотомер для измерения частоты простых периодических колебаний; поляризационный аттенуатор для изменения глубины ОС в автогенераторе. Схема установки приведена на рис. 1.

Установка позволяла идентифицировать колебательные режимы по спектру, фазовому портрету и огибающей генерируемого сигнала. Длина внешней части линии ОС могла плавно меняться в ходе эксперимента с помощью фазовращателя в достаточно широких пределах.

Переменными параметрами при исследовании нелинейного резонанса в рассматриваемой автоколебательной системе являлись: частота автоколебаний, регулируемая либо за счет длины L внешней части линии ОС, либо за счет ускоряющего напряжения клистрона U_0 , и глубина ОС [3].

Клистронный автогенератор с кольцевой системой ОС обладает дискретным набором собственных мод, для которых полный набег фазы гармонического сигнала по линии ОС кратен 2π [4]. Эти моды для резонансного автогенератора отличаются значениями ускоряющего напряжения в соответствии с соотношением

$$\beta_e l + \beta L + \psi = 2\pi n.$$

Здесь $\beta_e = \omega_0 / v_0$ - постоянная распространения электронного потока, ω_0 - собственная частота резонаторов, v_0 - скорость электронов; l - расстояние между первым и последним резонаторами; βL - сдвиг фаз гармонического сигнала во

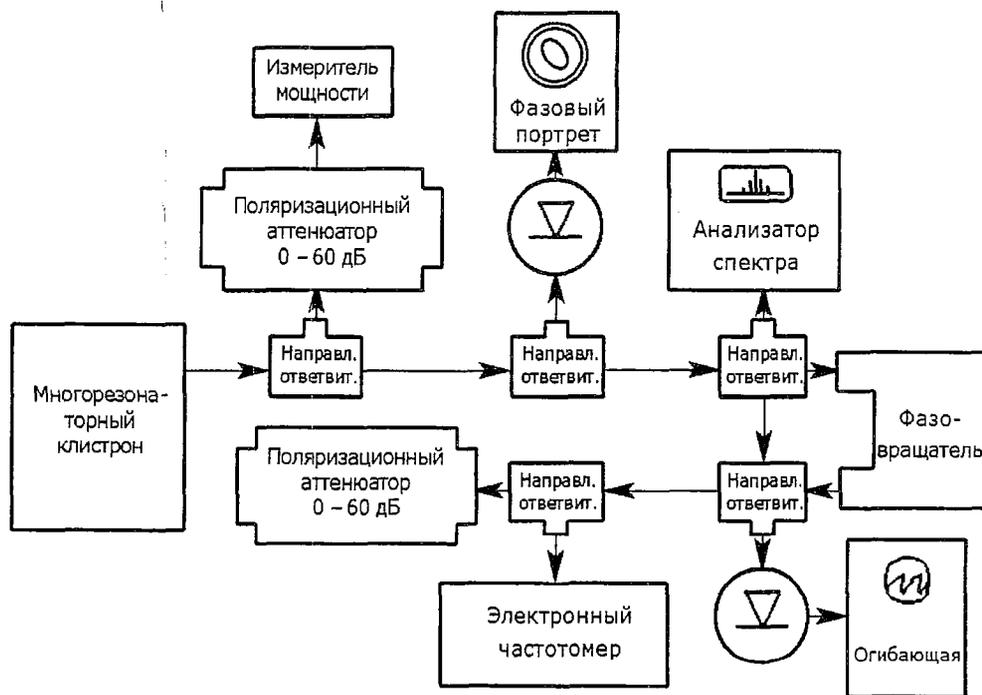


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

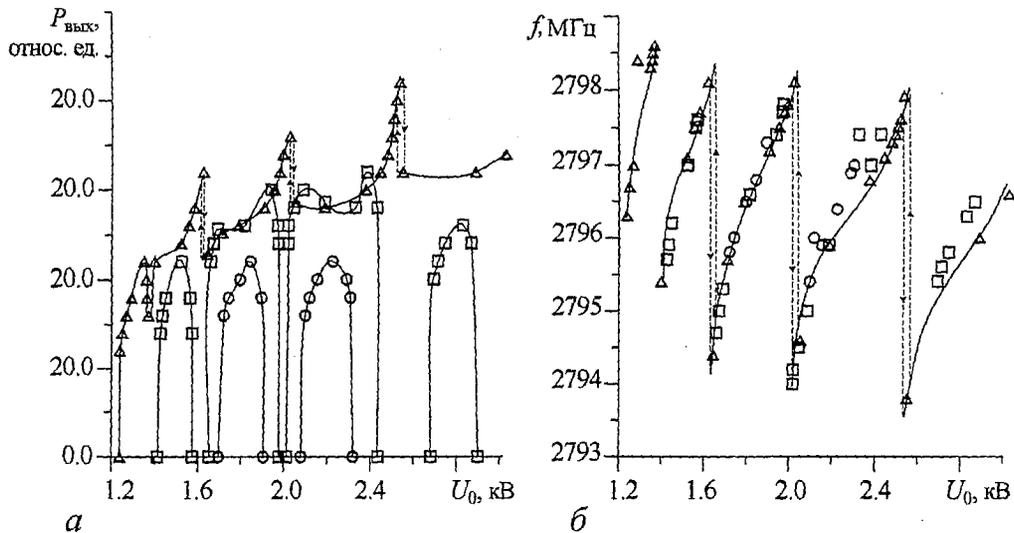


Рис. 2. Изменение мощности (а) и частоты (б) для различных токов пучка, мА: \circ - 6.0, \square - 8.0, \triangle - 12.0

внешней цепи линии ОС, β - постоянная распространения электромагнитной волны во внешней цепи линии ОС; ψ - сдвиг фаз из-за расстройки промежуточных резонаторов клистрона; n - целое число. Каждой моде соответствует своя область колебаний клистронного автогенератора, в пределах которой меняется мощность и частота колебаний. На рис. 2 представлены изменения мощности и частоты колебаний автогенераторного клистрона для различных токов пучка при варьировании ускоряющего напряжения. С ростом тока пучка области колебаний расширяются и деформируются. На зависимостях появляются характерные пики, в которых достигается максимум мощности. Плавное изменение частоты гармонических колебаний в пределах каждой зоны осуществлялось либо за счет изменения ускоряющего напряжения, либо за счет изменения длины внешней части цепи ОС, причем оба эти способа вариации частоты, по существу, эквивалентны. В самом деле, если из фазового условия самовозбуждения найти производную dL/dU_0 при $\omega_0 = \text{const}$, то получим для выбранного клистрона своеобразный инвариант

$$dL/dU_0 = 250l/(\epsilon U_0^3)^{1/2}, \text{ м/В.}$$

Здесь ϵ - диэлектрическая постоянная заполнения коаксиальной линии ОС. На рис. 3 приведены теоретическая кривая и экспериментальные точки зависимости dL/dU_0 от ускоряющего напряжения. Как видно, экспериментальные данные хорошо согласуются с теорией. Для исследования нелинейного резонанса были использованы оба описанных выше способа.

Автогенераторным методом была исследована амплитудная характеристика клистронного автогенератора. Построенная в двойном логарифмическом масштабе зависимость выходной мощности клистрона от

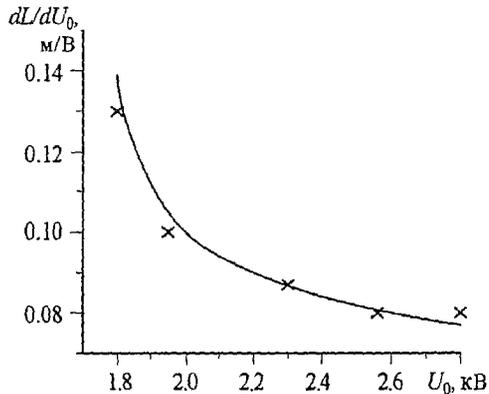


Рис. 3. Зависимость dL/dU_0 от ускоряющего напряжения

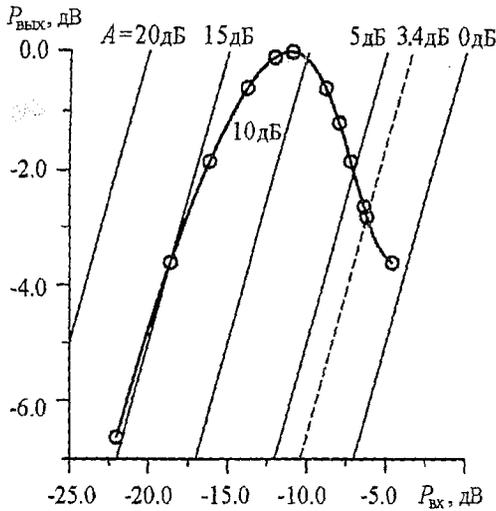


Рис. 4. Амплитудная характеристика клистронного автогенератора. Пунктирной линией отмечено значение глубины обратной связи, соответствующее возникновению автомодуляции и хаотизации колебаний [5].

В экспериментах исследовались зависимости амплитуды стационарных колебаний от их частоты - резонансные кривые - при различной глубине ОС. При глубине ОС, соответствующей восходящему участку амплитудной характеристики, с увеличением глубины ОС (уменьшением $A_{дБ}$) амплитуда стационарных колебаний возрастает - резонансные кривые поднимаются, частотный диапазон их расширяется, а резонансная частота заметно смещается в область более высоких частот, причем характерно, что резонансные кривые круче спадают со стороны высоких частот (рис. 5, а). При глубине ОС, соответствующей падающему участку АХ, увеличение глубины ОС приводит к тому, что резонансные кривые опускаются, и наблюдается опрокидывание резонансного пика в сторону высоких частот (рис. 5, б). На этом участке кривой происходило скачкообразное изменение амплитуды и частоты колебаний к их значениям на низкочастотном крае. На рис. 5, б эти точки обозначены затемненными символами. В области скачка наблюдаются явно выраженные гистерезисные явления при прямом и обратном ходе изменения частоты. Все эти эффекты, как известно, характерны для явления нелинейного резонанса [2]. При дальнейшем увеличении глубины ОС сначала на высокочастотном крае резонансной кривой возникает периодическая автомодуляция, переходящая затем в хаотическую во всей полосе частот (рис. 5, в). Эти участки обозначены пунктиром. Следует отметить, что в зависимости от режима работы клистрона переход к хаосу происходил как через последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции, так и путем жестких переходов из режима регулярной автомодуляции [4].

Описанный характер поведения резонансных кривых наблюдался для различных способов изменения частоты автоколебаний: как за счет изменения длины линии ОС, так и за счет изменения ускоряющего напряжения.

Следует заметить, что поведение резонансных кривых автогенератора на многорезонаторном клистроне с запаздывающей ОС подобно поведению резонансных кривых автогенератора на ЛБВ [1], но с тем существенным отличием, что сдвиг резонансных кривых и их опрокидывание в случае ЛБВ происходили в сторону меньших частот, в области меньших частот возникала и модуляционная неустойчивость.

входной представлена на рис. 4. На этом же рисунке в виде прямых приведены линии постоянной глубины ОС $A_{дБ} = P_{вых, дБ} - P_{вх, дБ}$, где $A_{дБ}$ - затухание в цепи ОС, характеризующее глубину обратной связи. Точки пересечения прямых $A_{дБ} = \text{const}$ с амплитудной характеристикой определяют значения выходной мощности клистронного автогенератора в установившемся режиме. Амплитудная характеристика (АХ) явно нелинейна: имеет восходящую часть, максимум и крутой падающий участок. Падающий участок АХ обусловлен перегруппировкой электронов в клистроне при больших входных сигналах. Нелинейная перегруппировка электронов и запаздывание реакции резонансной автоколебательной системы на начало

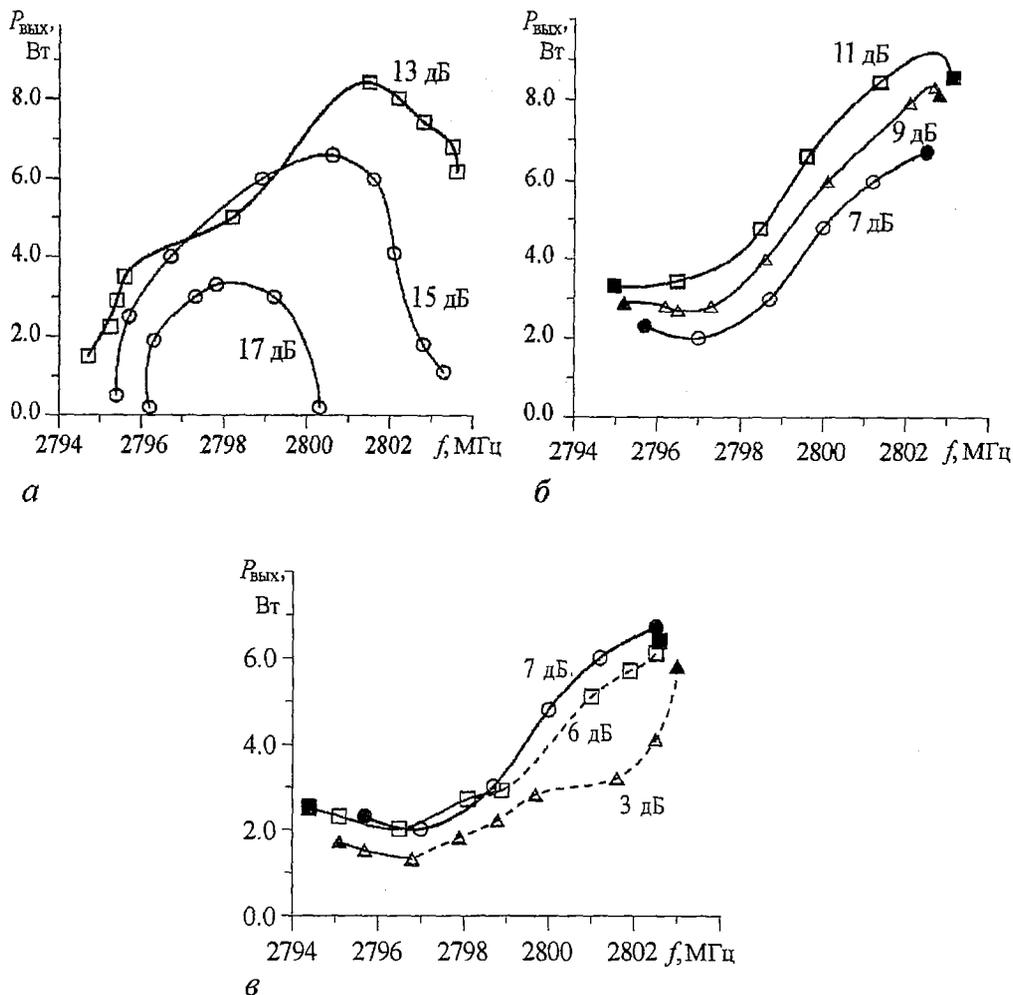


Рис. 5. Резонансные кривые для различных значений A , дБ

Заключение

Экспериментально показано, что в резонансных СВЧ автогенераторах с запаздыванием переход от одночастотных колебаний к модуляционной неустойчивости и хаотическим колебаниям сопровождается явлением нелинейного резонанса. Обнаружено, что с увеличением глубины обратной связи амплитуда стационарных колебаний сначала возрастает, частотный диапазон расширяется, резонансная частота смещается в область высоких частот, наблюдается опрокидывание резонансных кривых и гистерезисные явления. Все это непосредственно предшествует возникновению модуляционной неустойчивости и широкополосным хаотическим колебаниям. Таким образом, показано, что нелинейный резонанс является своеобразным предвестником появления сложной динамики и хаоса в резонансных СВЧ автоколебательных системах с запаздывающей обратной связью.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 03-02-16269) и программы «Университеты России - Фундаментальные Исследования» (проект 01.01.021).

Библиографический список

1. Калинин В.И., Залогин Н.Н., Кислов В.Я. Нелинейный резонанс и стохастичность в автоколебательной системе с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 1983. № 10. С. 2001.
2. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984.
3. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Рыскин Н.М., Шигаев А.М. Теоретическое и экспериментальное исследование хаотических колебаний клистронного автогенератора с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 3. С. 1.
4. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М. Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью // ЖТФ. 2003. Т. 73. С. 105.
5. Кузнецов С.П. Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 12. С. 1410.

Саратовский государственный
университет

Поступила в редакцию 14.03.03
после доработки 13.05.03

NONLINEAR RESONANCE AND TRANSITION TO CHAOS IN RESONANCE MICROWAVE AUTOOSCILLATION SYSTEMS WITH DELAYED FEEDBACK

B.S. Dmitriev, Yu.D. Zharkov, D.V. Klokov, Yu.I. Levin

The experimental study of nonlinear resonance phenomenon in microwave delayed feedback systems is carried out. With increase of the amount of feedback the autooscillations are observed first of all near the high-frequency border of nonlinear resonance. The transition to chaos happens both after a number of period-doubling bifurcations and after hard transition from autooscillation mode.



Дмитриев Борис Савельевич родился в Саратове (1937), окончил физический факультет Саратовского Государственного Университета (1959), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1967). В настоящее время является профессором кафедры нелинейной физики СГУ. Ведет курсы общей физики (механика, молекулярная физика и термодинамика, электродинамика). Область научных интересов - микроволновая электроника и радиофизика. Опубликовал более 120 научных и научно-методических работ и учебных пособий



Жарков Юрий Дмитриевич родился в селе Терса Еланского района Волгоградской области (1931). Окончил физический факультет СГУ (1953). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1961) и доктора (1987) в области радиофизики и электроники СВЧ. В настоящее время - профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов - физическое моделирование процессов взаимодействия потоков заряженных частиц с СВЧ-полями; исследование сложной динамики в СВЧ-генераторах с запаздывающей обратной связью. Опубликовал свыше 100 работ, среди них несколько учебных пособий, 20 изобретений.

Клокотов Дмитрий Вячеславович родился в Саратове (1979). Окончил факультет нелинейных процессов СГУ (2001). В настоящее время - аспирант кафедры нелинейной физики. Область научных интересов - нелинейная динамика, динамический хаос в СВЧ-генераторах с запаздывающей обратной связью. Опубликовал 8 научных статей.



Левин Юрий Иванович родился в Саратове (1942), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974). В настоящее время является профессором кафедры нелинейной физики СГУ, деканом факультета нелинейных процессов. Автор более 100 научных статей, научно-методических пособий и руководств.

E-mail: levin@cas.ssu.runnet.ru