



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ДИНАМИКИ НЕАВТОНОМНОГО МНОГОРЕЗОНАТОРНОГО КЛИСТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

*Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, Ю.И.Лёвин*

Исследована сложная динамика неавтономного резонансного СВЧ автогенератора на основе многорезонаторного клистрона с запаздывающей обратной связью. Показано, что с помощью внешнего гармонического сигнала возможно управление характером колебаний клистронного автогенератора. В зависимости от режима работы автономного генератора подбором частоты и мощности внешнего гармонического сигнала могут быть получены режимы динамического хаоса при одночастотных автономных колебаниях и, напротив, одночастотные колебания при хаотических автономных.

### Введение

Резонансные СВЧ автоколебательные системы с запаздывающей обратной связью (ЗОС), демонстрирующие сложную динамику и хаос, представляют интерес для целого ряда практических применений, таких как, например, СВЧ нагрев плазмы, ускорители заряженных частиц, системы передачи и обработки информации и др. Среди этих систем значительный интерес представляют СВЧ автогенераторы с ЗОС на основе многорезонаторных клистронов, отличающиеся высоким уровнем выходной мощности и КПД [1].

Наряду с исследованием сложной динамики и механизмов перехода к хаосу в автономных клистронных автоколебательных системах [2] важным представляется изучение неавтономных режимов таких систем, поскольку внешний сигнал оказывается удобным инструментом для управления сложной динамикой и хаосом [3-5].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований неавтономной работы СВЧ автогенератора на многорезонаторном клистроне при внешнем гармоническом воздействии. Ранее подобные исследования для таких систем не проводились.

### Схема установки и результаты экспериментальных исследований

В качестве резонансной СВЧ колебательной системы с ЗОС был использован промышленный пятирезонаторный клистрон среднего уровня мощности, работающий на частоте 2800 МГц. В клистроне использованы

двухазорные объемные резонаторы с противофазным видом колебаний. Схема установки, примененной для проведения эксперимента, приведена на рис. 1. Входной и выходной резонаторы клистрона соединены коаксиальной линией обратной связи. Электрическая длина этой линии с учетом диэлектрического заполнения коаксиала составила 105 длин волн. Источники питания клистрона позволяют в широких пределах плавно менять ток и ускоряющее напряжение электронного пучка. В линию обратной связи через направленные ответвители включены кристаллический детектор для наблюдения на осциллографе огибающей сигнала, второй кристаллический детектор для наблюдения двумерной проекции фазового портрета (с помощью метода задержки), анализатор спектра для исследования полного спектра сигнала в широкой полосе частот, электронный цифровой частотомер для измерения частоты квазигармонических колебаний, поляризационный аттенюатор для измерения глубины обратной связи, термисторный измеритель мощности с дополнительным поляризационным аттенюатором и фазовращатель для плавного изменения длины цепи обратной связи. Внешнее гармоническое воздействие осуществлялось с помощью генератора стандартных сигналов (ГСС). Сигнал ГСС усиливался лампой бегущей волны и вводился в цепь обратной связи клистрона через ферритовый вентиль. За счет использования ферритовых вентилях осуществлялась подача внешнего сигнала только на входной резонатор клистрона. Нагруженная добротность входного объемного резонатора клистрона 120, выходного 112, собственная добротность резонаторов 400. Полное время запаздывания  $T$  вдоль кольца ОС, определенное с учетом длины линии ОС, времени пролета электронов в пространстве дрейфа и добротности резонаторов клистрона, составило величину порядка 0.3 мкс.

Собранная установка давала возможность изучать работу клистронного автогенератора при одновременном наблюдении огибающей сигнала, его полного

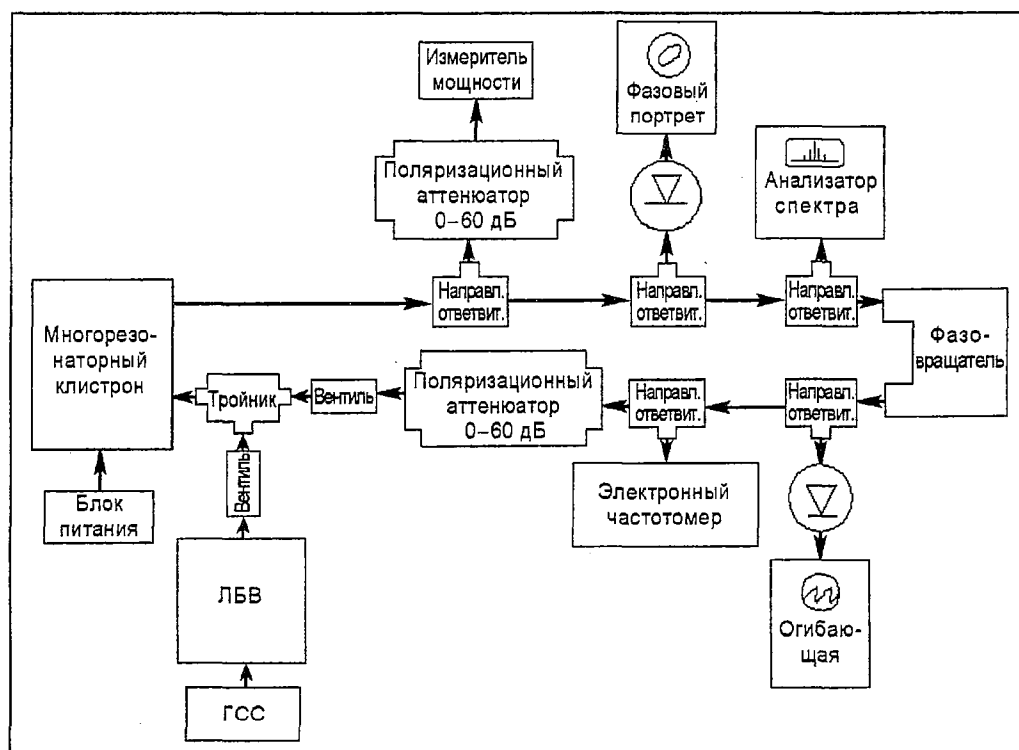


Рис. 1. Схема измерительной установки

спектра, проекции фазового портрета, измерении частоты и уровня выходной мощности как в автономном, так и в неавтономном режимах при различных частотах и уровнях мощности внешнего гармонического воздействия. Таким образом, имелась возможность идентифицировать характер колебаний в различных режимах работы автогенератора. В качестве управляющих параметров использовались ток электронного пучка, затухание в цепи ОС, амплитуда и частота внешнего сигнала. В автономном режиме работы клистронного автогенератора при увеличении тока пучка происходила последовательная смена режимов одночастотных колебаний, периодической автомодуляции, когда на фазовом портрете огибающей сигнала мягко возникал предельный цикл, а в спектре появлялись два сателлита, симметрично отстоящие от основной частоты на величину 4.2 МГц, и хаотической генерации. Переход к хаосу происходил через последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции. Физической причиной возникновения автомодуляции и хаотических колебаний в клистронном автогенераторе с ЗОС, как и в других автогенераторах [6], является наличие крутого падающего участка на амплитудной характеристике, обусловленного перегруппировкой электронов при больших уровнях входного сигнала. Нелинейная перегруппировка электронов и запаздывание реакции резонансной автоколебательной системы на начало действия нелинейности и приводит к возникновению автомодуляции и к хаотизации колебаний.

Воздействие внешнего гармонического сигнала приводило к существенному изменению свойств и характера колебаний клистронного автогенератора с ЗОС в зависимости как от исходного режима автономной системы, так и от частоты и амплитуды внешнего воздействия.

Выбор исходного режима автономного генератора осуществлялся на основе амплитудной характеристики клистрона. На рис. 2 приведена экспериментально полученная зависимость выходной мощности  $P_{\text{вых}}$  (дБ) от входной мощности  $P_{\text{вх}}$  (дБ), построенная в логарифмическом масштабе. На этом же рисунке прямыми изображены линии обратной связи  $L = P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}$ , здесь  $L$  - затухание в цепи обратной связи в дБ. Точки пересечения прямых с амплитудной характеристикой соответствуют мощности в установившемся режиме генерации автономной системы.

Для исследования влияния внешнего гармонического сигнала на характер колебаний были выбраны следующие исходные режимы работы автономной системы.

1. Нелинейный режим, в котором еще происходит генерация простых одночастотных колебаний (при  $L = 9$  дБ и  $P_{\text{вых}} = 10$  Вт).

2. Нелинейный режим, в котором автономная система генерирует «развитой» хаос (при  $L = 0$  дБ и  $P_{\text{вых}} = 5$  Вт).

Выбор таких исходных режимов позволил наиболее наглядно продемонстрировать возможность управления характером возбужденных колебаний внешним гармоническим сигналом в клистронном автогенераторе с ЗОС.

На рис. 3 представлена карта динамических режимов неавтономного клистронного автогенератора с ЗОС на

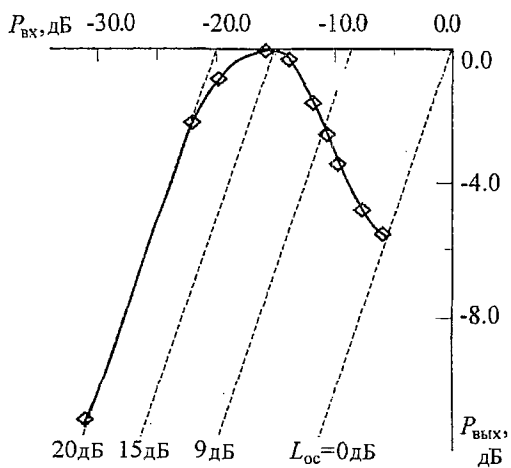


Рис. 2. Амплитудная характеристика клистрона

плоскости параметров: нормированная мощность внешнего гармонического сигнала  $P_{\text{внешн}}/P_{\text{авт}}$  ( $P_{\text{авт}}$  - мощность клистрона в автономном режиме) - нормированная частота внешнего сигнала, характеризуемая параметром  $\gamma = 2T\Delta f$ , где  $\Delta f$  - отстройка частоты внешнего сигнала от частоты автономного генератора для режима одночастотных колебаний автономной системы. Как видно из рисунка, в этом случае в результате воздействия внешнего гармонического сигнала при плавном изменении его частоты наблюдались чередование областей одиночной генерации и хаотических колебаний (темные области). Хаотические колебания возникали при целых значениях  $\gamma$  (-9,-7,-3,1,3,7,9), переход к хаосу происходил через каскад бифуркаций удвоения периода автомодуляции. На рис. 4 приведены фазовые портреты и спектры колебаний, демонстрирующие переход от одночастотных колебаний к хаотическим при изменении частоты внешнего гармонического воздействия.

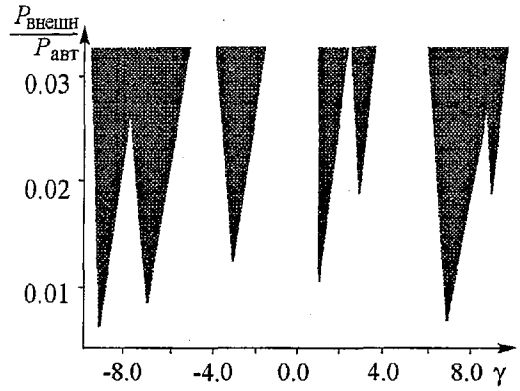


Рис. 3. Карта динамических режимов неавтономного клистронного автогенератора (автономный режим - одночастотные колебания)

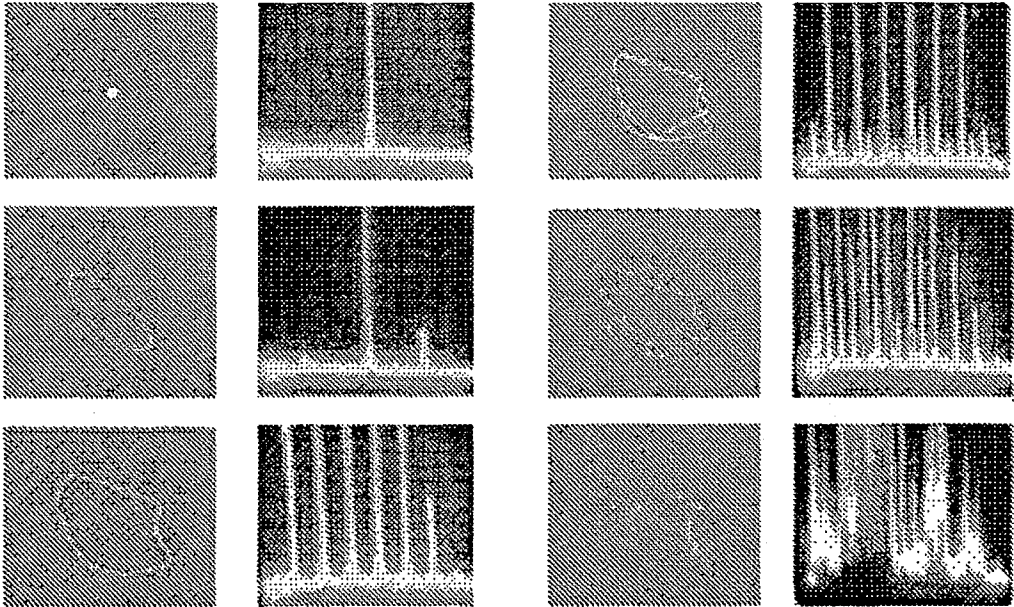


Рис. 4. Фазовые портреты и спектры колебаний клистронного автогенератора (переход от одночастотных колебаний к хаосу)

На рис. 5 показана карта динамических режимов неавтономной клистронной системы на той же плоскости параметров для режима, в котором автономная система генерирует хаотические колебания, соответствующие режиму «развитого» хаоса (рис. 6). В этом случае под воздействием внешнего гармонического сигнала при изменении его частоты возникали области одночастотной генерации (показаны на рисунке темным цветом), прежде всего, при целых значениях  $\gamma$  (-6,-5,-1,0,2,3). И в этом режиме переход от хаоса к регулярным колебаниям происходил по «обратному» сценарию - через

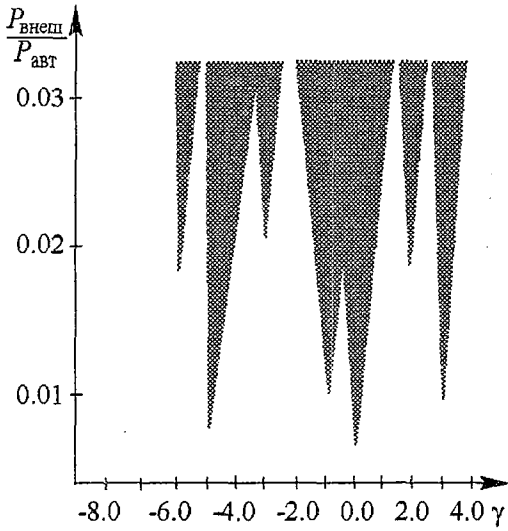


Рис. 5. Карта динамических режимов неавтономного клистронного автогенератора (автономный режим - хаотические колебания)

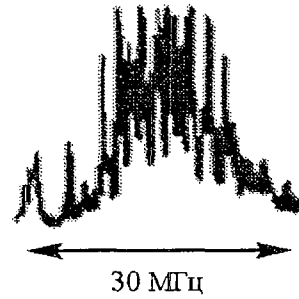


Рис. 6. Спектр хаотических колебаний клистронного автогенератора

последовательность бифуркаций изменения периода автомодуляции. Фазовые портреты и спектры колебаний, иллюстрирующие эти переходы, показаны на рис. 7.

Описанное поведение неавтономного клистронного автогенератора с ЗОС может быть объяснено, если принять во внимание следующие эффекты и явления: при больших входных сигналах электронный поток в клистроне перегруппирован, а реакция автоколебательной системы на начало действия нелинейности запаздывает из-за конечной длины линии обратной связи, поэтому амплитуда сигнала начинает осциллировать, и в спектре появляются сателлиты основной частоты. В этих режимах коэффициент усиления многорезонаторного клистрона оказывается сложной функцией амплитуд действующих одновременно входных

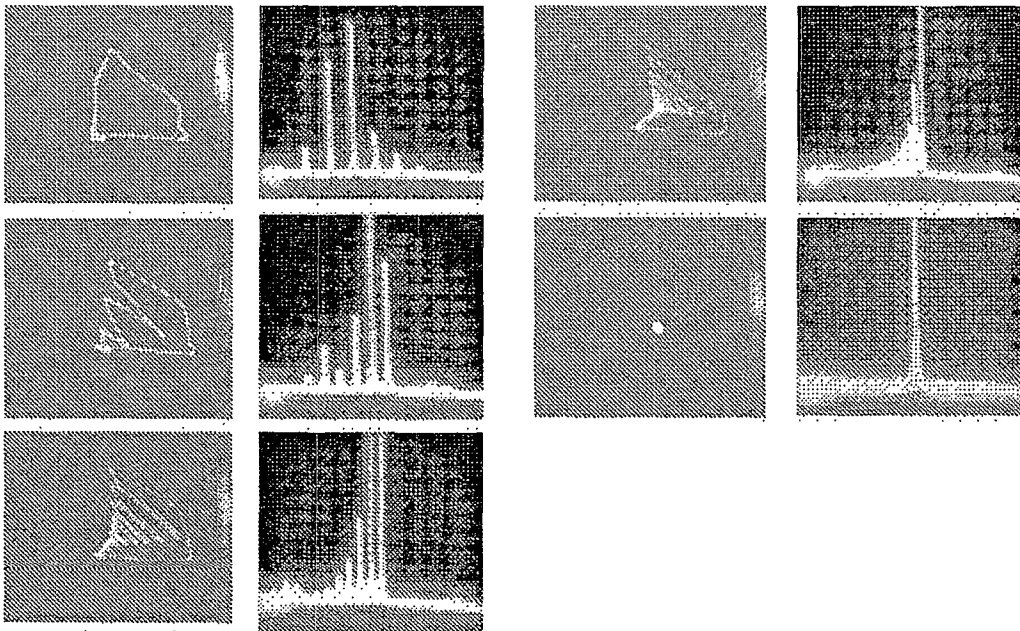


Рис. 7. Фазовые портреты и спектры колебаний клистронного автогенератора (переход от хаотических колебаний к одночастотным)

сигналов, их числа и частотных расстроек. Этот сложный режим, по-видимому, и приводит к эффектам «хаотизации» и «дехаотизации» под действием внешнего гармонического сигнала, когда частота этого воздействия оказывается в полосе пропускания резонансной системы клистрона.

### Заключение

Экспериментально показано, что в резонансных автогенераторах СВЧ с ЗОС за счет внешнего гармонического воздействия можно достичь «хаотизации» колебаний в режимах, когда автономная система генерирует одночастотные колебания. Переход к хаосу, инициированный внешним гармоническим сигналом, происходит по классическому сценарию удвоения периода автомодуляции. Наоборот, в случае, когда автономная система генерирует хаотические колебания, возможно получение простых одночастотных колебаний при подборе частоты и мощности внешнего гармонического воздействия. Таким образом, осуществляется своеобразное управление сложной динамикой клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью внешним гармоническим сигналом.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 03-02-16269) и программы «Университеты России - Фундаментальные Исследования» (проект 01.01.049).*

### Библиографический список

1. 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. Вып. 7. С. 105.
2. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Лёвин Ю.И. Нелинейный резонанс и переход к хаосу в резонансных СВЧ автоколебательных системах с запаздывающей обратной связью // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2004. Т. 12, № 1-2. С. 3.
3. Шалфеев В.Д., Осипов Г.В., Козлов А.К., Волковский А.Р. Хаотические колебания - генерация, синхронизация, управление // Зарубежная радиоэлектроника. 1997. № 10. С. 27.
4. Кальянов Э.В. Стохастизация и дестохастизация колебаний в неавтономных многомодовых автоколебательных системах // Радиотехника и электроника. 1982. № 12. С. 2448.
5. Козлов А.К., Шалфеев В.Д. Управление хаотическими колебаниями в генераторе с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 2. С.36.
6. 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.

Саратовский государственный  
университет

Поступила в редакцию 24.02.2004

# EXPERIMENTAL RESEARCH OF COMPLEX DYNAMICS OF ON-LINE MULTYCAVITY KLYSTRON OSCILLATOR WITH DELAY

*B.S. Dmitriev, Yu.D. Zharkov, Yu.I. Levin*

Complex dynamics of the on-line resonant microwave oscillator on a basis of multycavity klystron with delayed feedback is investigated. It is shown, that with the help of an external harmonic signal the control is probable of the klystron oscillations character. Depending on an operating mode of the autonomous generator by selection of frequency and power of an external harmonic signal the modes of dynamic chaos can be received at one-frequency autonomous oscillation and, on the contrary, one-frequency oscillation modes can be received at chaotic autonomous oscillation.



*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), радиофизики и электроники. Область научных интересов - микроволновая электроника и радиофизика, сложная динамика в СВЧ автогенераторах. Опубликовал более 120 научных и научно-методических работ и учебных пособий, 15 изобретений.



*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.



*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](mailto:levin@cas.ssu.runnet.ru)