

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Экспериментальное наблюдение когерентного резонанса в вакуумных
генераторах хаоса сверхвысокочастотного диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2231 группы

направления

03.04.03 «Радиофизика»

Института Физики

Пыхтунова Дмитрия Сергеевича

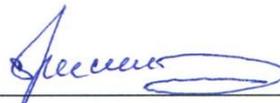
Научный руководитель
зав. кафедрой электроники,
колебаний и волн, к.ф.-м.н., доцент



подпись, дата
03.06.2024г.

С.В. Гришин

Заведующий кафедрой
электроники, колебаний и волн
к.ф.-м.н., доцент



подпись, дата
03.06.2024г.

С.В. Гришин

Саратов 2024 г.

Введение

Известно, что в возбудимых шумом системах наблюдается фундаментальное нелинейное явление, получившее название *когерентного резонанса* [1-4]. Оно заключается в том, что у шумового воздействия есть некий оптимальный уровень, при котором индуцированные шумом колебания становятся наиболее близкими к регулярным. В этом случае зависимость степени когерентности (регулярности) колебаний от интенсивности шума является резонансной, а спектральная линия, отвечающая этим колебаниям, является наиболее узкой. К возбудимым шумом системам относятся осциллятор ФицХью-Нагумо [2, 3], модель нейрона Ходжкина-Хаксли [5], химическая реакция Белоусова-Жаботинского [6], модель Ямады для полупроводникового лазера с насыщающимся поглотителем [7] и полупроводниковая сверхрешетка [8]. Явление когерентного резонанса было подтверждено экспериментально в возбудимых электронных схемах [9], в полупроводниковом лазере с оптической обратной связью [10] и в микроволновом клистроном автогенераторе, находящемся на пороге самовозбуждения [11].

Что касается хаотических динамических систем, то на сегодняшний день известны всего две теоретические работы [12, 20], в одной из которых явление когерентного резонанса было обнаружено в хаотической бистабильной цепи Чуа [12], а в другой – в системе двух связанных идентичных хаотических осцилляторов Лоренца [20]. Так, в хаотической бистабильной цепи Чуа резонансное поведение было обусловлено скачками между двумя независимыми, симметричными, хаотическими аттракторами за счет шумового воздействия. В системе двух связанных хаотических осцилляторов Лоренца, находящихся в стабильном синхронном состоянии в отсутствие шума, явление когерентного резонанса наблюдалось в режиме «on-off» перемежаемости, возникающем только под воздействием шума. В обоих случаях у динамической системы существуют два стационарных состояния,

между которыми происходит переключение под воздействием шума, как и в возбудимых шумом системах.

В настоящей работе демонстрируется явление когерентного резонанса на экспериментальных макетах кольцевых СВЧ генераторов хаоса, собранных по схеме «шумотрона». В одном из генераторов хаоса в качестве нелинейного элемента используется ЛБВ, а в другом – многорезонаторный пролетный клистрон.

Глава 1. Когерентный резонанс в вакуумном СВЧ генераторе хаоса на основе двух (линейной и нелинейной) ЛБВ

1.1 Схема экспериментальной установки

Схема исследуемого СВЧ генератора хаоса («шумотрона») представлена на рисунке 1.1а. Он состоит из последовательно соединенных в кольцо двух ЛБВ-усилителей, микрополоскового полосно-пропускающего фильтра (ППФ), переменного аттенюатора и двух направленных ответвителей, один из которых используется для ввода в кольцо внешнего шумового СВЧ сигнала, а другой - для контроля уровня мощности СВЧ сигнала на входе одной из двух (нелинейной) ЛБВ. Используемые ЛБВ представляют собой широкополосные усилители мощности, выполненные на основе нерегулярной спиральной замедляющей системы (ЗС) с переменным шагом. Обе они работают в полосе частот 3-4 ГГц (см. рисунок 1.1 b-i и рисунок 1.1 b-ii), где максимальное значение коэффициента усиления ~ 47 дБ достигается на частоте ~ 3.5 ГГц при токе пучка $I_{01,02}=100$ мА и ускоряющем напряжении $U_{01,02}=3$ кВ. Длина одного однородного участка спирали с шагом 1.5 мм – 170 мм, длина другого однородного участка спирали с шагом 1.3 мм – 128 мм. Длина всей ЗС – 323 мм. Диаметр витка спирали – 3.3 мм, диаметр провода спирали – 0.5 мм. Для генерируемого в кольце СВЧ сигнала, одна из ЛБВ работает в режиме линейного усиления (линейная ЛБВ), а другая - в режиме насыщения выходной мощности и сильной фазовой нелинейности (см. рисунок 1.1с). Наличие сильной фазовой нелинейности, обусловленных перегруппировкой электронов в пучке под действием бегущей электромагнитной волны большой амплитуды, а также запаздывания в цепи обратной связи обуславливают частотный механизм хаотизации СВЧ сигнала в кольце.

Микрополосковый ППФ имеет в полосе пропускания минимальный уровень ослабления $A_0=-4$ дБ на частоте $f_0=3$ ГГц, ширину полосы частот по уровню 3 дБ $\Delta f_{3\text{ дБ}}=1.03$ ГГц, по уровню 20 дБ $\Delta f_{20\text{ дБ}}=1.3$ ГГц и по уровню 40 дБ $\Delta f_{40\text{ дБ}}=1.91$ ГГц. Переменный аттенюатор осуществляет регулировку

уровня мощности СВЧ сигнала на входе нелинейной ЛБВ. Основная часть мощности генерируемого в кольце СВЧ сигнала возвращается обратно в кольцо, а ее меньшая часть поступает на входы осциллографа реального

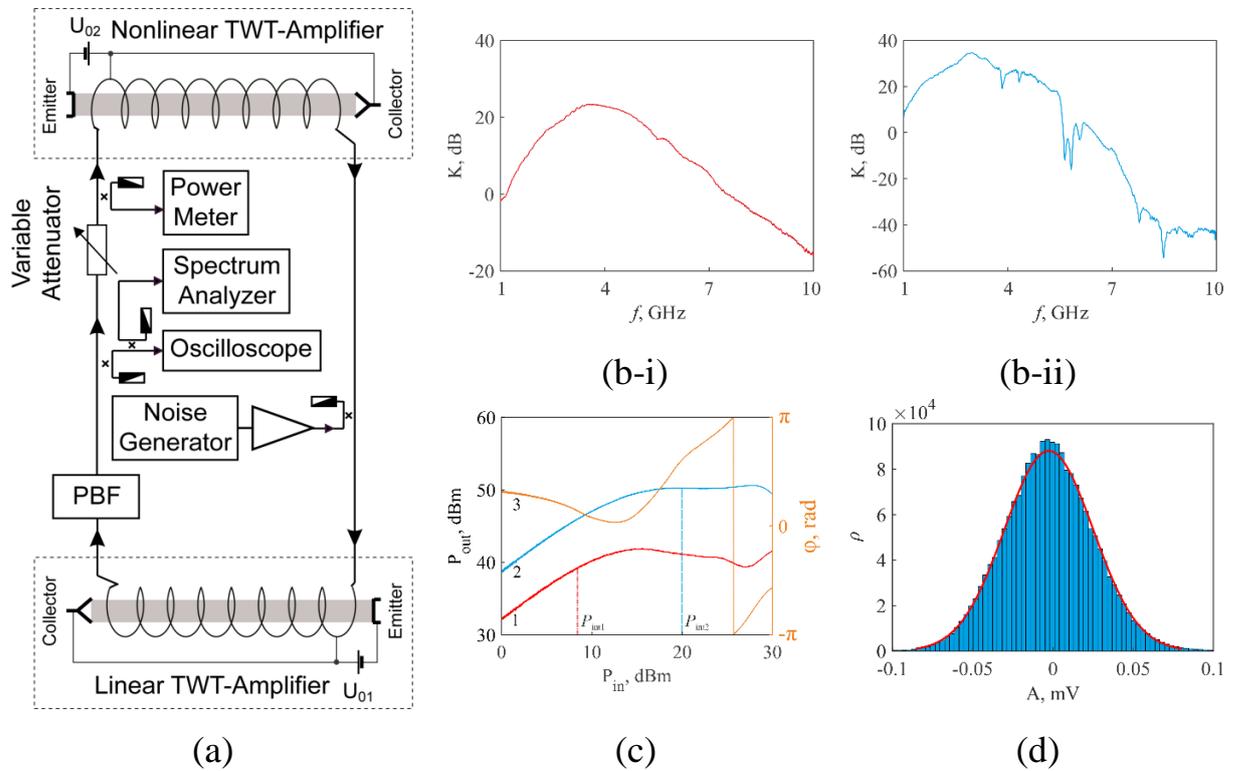


Рисунок 1.1. (а) Схематическое изображение микроволнового вакуумного генератора хаоса, находящегося под внешним СВЧ шумовым воздействием. (b-i, b-ii) АЧХ и (c) амплитудные характеристики линейного (b-i, c – кривая 1) и нелинейного (b-ii, c – кривая 2) ЛБВ-усилителей, измеренные при $I_{01}=40$ мА, $U_{01}=2880$ В, $I_{02}=70.9$ мА, $U_{02}=2550$ В. На (c) также показана зависимость набега фазы от входной мощности нелинейного ЛБВ-усилителя (кривая 3). Все измерения на (c) выполнены на частоте $f=3$ ГГц. На (d) представлена гистограмма шумового СВЧ сигнала с центральной частотой $f_n=2.1$ ГГц, шириной полосы частот $\Delta f_n=80$ МГц и мощностью $P_n=-20$ дБмВт. Здесь же приведена аппроксимация гистограммы нормальным законом распределения с дисперсией $\sigma=0.0027$ и средним $m=0.0037$.

Экспериментальные результаты

В отсутствие внешнего шумового СВЧ сигнала шумотрон генерирует хаотический СВЧ сигнал, который на входе линейной ЛБВ имеет уровень интегральной мощности $P_{int1}=+8.4$ дБмВт, а на входе нелинейной ЛБВ - $P_{int2}=+20$ дБмВт. Как следует из результатов, представленных на рисунке 1.1с, первая ЛБВ при таком уровне входной мощности работает в режиме практически линейного усиления, а вторая ЛБВ – в сильно нелинейном режиме. Спектр мощности генерируемого хаотического СВЧ сигнала характеризуется центральной частотой $f_{ch}=3$ ГГц и шириной полосы частот $\Delta f_{ch}=1.25$ МГц по уровню 54 дБ относительно максимального значения спектральной мощности. Как следует из результатов, представленных на рисунке 1.3, при подаче на вход линейной ЛБВ внешнего шумового СВЧ сигнала с центральной частотой $f_n=2.1$ ГГц и полосой частот $\Delta f_n=80$ МГц, последний не оказывает заметного влияния на хаотический СВЧ сигнал при уровнях интегральной мощности, не превышающих $P_n=0$ дБмВт на входе линейного ЛБВ-усилителя. В этом случае (см. рисунок 1.3а) временной ряд хаотического СВЧ сигнала имеет вид как в автономном режиме. При дальнейшем увеличении мощности шумового СВЧ сигнала (см. рисунок 1.3б), амплитуда огибающей хаотического СВЧ сигнала начинает подавляться на тех временных интервалах, где амплитуда огибающей шумового СВЧ сигнала превышает пороговое значение амплитуды на входе ЛБВ (выше этого порога ЛБВ работает в сильно нелинейном режиме). В этом случае измеренный временной ряд содержит временные интервалы, где амплитуда огибающей хаотического СВЧ сигнала полностью подавлена. Как следует из результатов, представленных на рисунке 1.3с, дальнейшее увеличение мощности шумового СВЧ сигнала приводит к увеличению длительностей временных интервалов, на которых собственная хаотическая динамика системы является полностью подавленной. Присутствие временных интервалов, соответствующих двум

устойчивым состояниям системы, характерно для перемежаемости типа “on-off”.

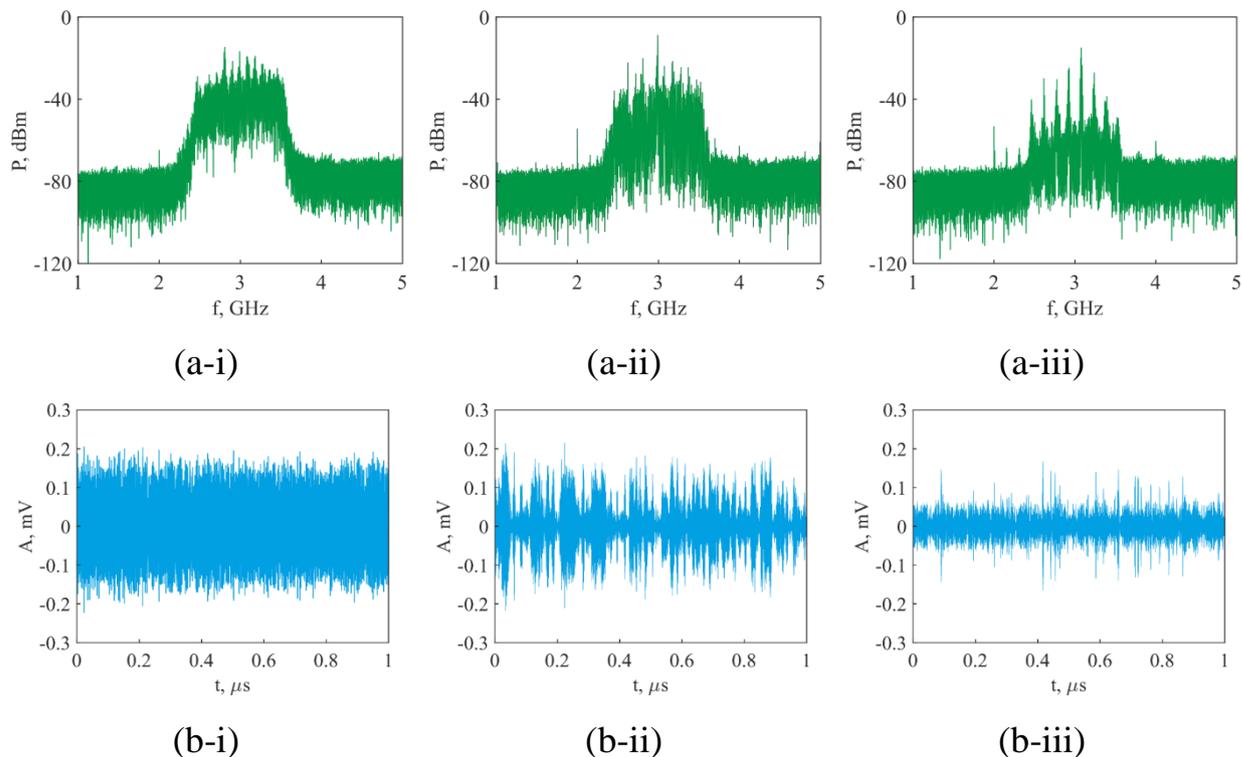


Рисунок 1.3. (a-i, a-ii, a-iii) Спектры мощности хаотического СВЧ сигнала и (b-i, b-ii, b-iii) его временные ряды, измеренные под воздействием внешнего шумового СВЧ сигнала с центральной частотой $f_n=2.1$ ГГц, полосой $\Delta f_n=80$ МГц и различными уровнями мощности P_n : (a-i, b-i) -5 дБмВт, (a-ii, b-ii) +13 дБмВт и (a-iii, b-iii) +25 дБмВт.

На рисунке 1.5 представлены зависимости времени автокорреляции хаотического СВЧ сигнала от мощности шумового СВЧ сигнала, полученные при разных значениях ширины полосы частот шума. Видно, что на каждой зависимости имеется характерный максимум времени автокорреляции, который наблюдается при определенной мощности шума $P_{n,res}$ (в режиме перемежаемости типа “on-off”). Для исследуемых полос шума этот уровень мощности шумового СВЧ сигнала на входе нелинейной ЛБВ имеет приблизительно одинаковую величину $P_{n,res}=+12$ дБмВт. Увеличение полосы шума от 1 МГц до 80 МГц приводит к уменьшению максимального значения времени автокорреляции на порядок величины. Таким образом, исследуемый

хаотический генератор демонстрирует явление когерентного резонанса. При этом максимальное значение времени автокорреляции уменьшается с увеличением полосы частот шумового СВЧ сигнала.

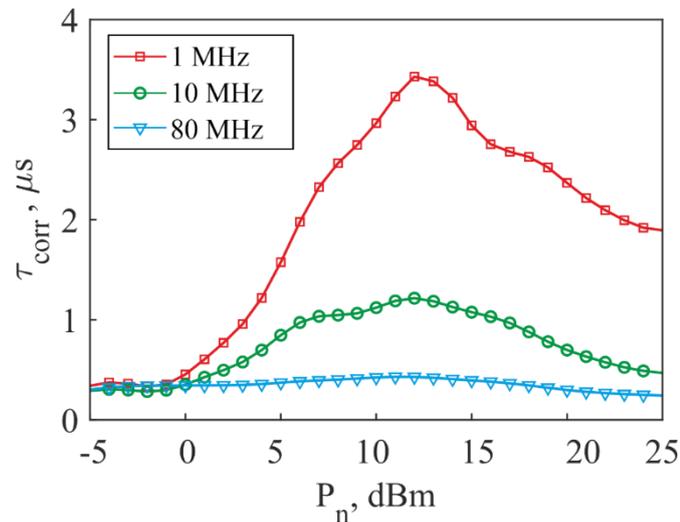


Рисунок 1.5. Зависимости времени автокорреляции хаотического СВЧ сигнала $\tau_{\text{сорт}}$ от мощности шумового СВЧ сигнала при изменении полосы частот шума Δf_n . В эксперименте токи пучка и ускоряющие напряжения обеих ЛБВ имели следующие значения: $I_{01}=40$ мА, $U_{01}=2880$ В, $I_{02}=70.9$ мА и $U_{02}=2550$ В.

1.3 Выводы

Экспериментально обнаружен эффект когерентного резонанса в схеме шумотрона, состоящего из двух ЛБВ, одна из которых работает в режиме линейного усиления генерируемого в кольце хаотического СВЧ сигнала, а другая в режиме сильной амплитудной и фазовой нелинейности. В качестве внешнего СВЧ сигнала используется шумовой СВЧ сигнал с ограниченным спектром, полоса частот которого меняется в пределах от 1 МГц до 80 МГц.

Установлено, что зависимость времени автокорреляции хаотического СВЧ сигнала от интегральной мощности шумового СВЧ сигнала имеет ярко выраженный максимум, наблюдаемый при определенной мощности шума. Наибольшее значение времени автокорреляции наблюдается при наименьшей

полосе частот шумового СВЧ сигнала (в эксперименте 1 МГц) и уменьшается с увеличением полосы частот шума.

Глава 2 Когерентный резонанс в вакуумном СВЧ генераторе хаоса на основе линейной ЛБВ и нелинейного пятирезонаторного пролетного клистрона

2.1 Схема экспериментальной установки

На рисунке 2.1 приведена модифицированная схема шумотрона, состоящего из ЛБВ-усилителя, выполненного на основе односекционной спиральной замедляющей системы с переменным шагом для диапазона частот 3-4 ГГц, и пятирезонаторного пролетного клистрона средней мощности типа КУ-134Е с центральной частотой $f_0=2797$ МГц. Вход и выход обоих вакуумных СВЧ-усилителей соединены последовательно друг с другом и охвачены цепью запаздывающей обратной связи. Уровень

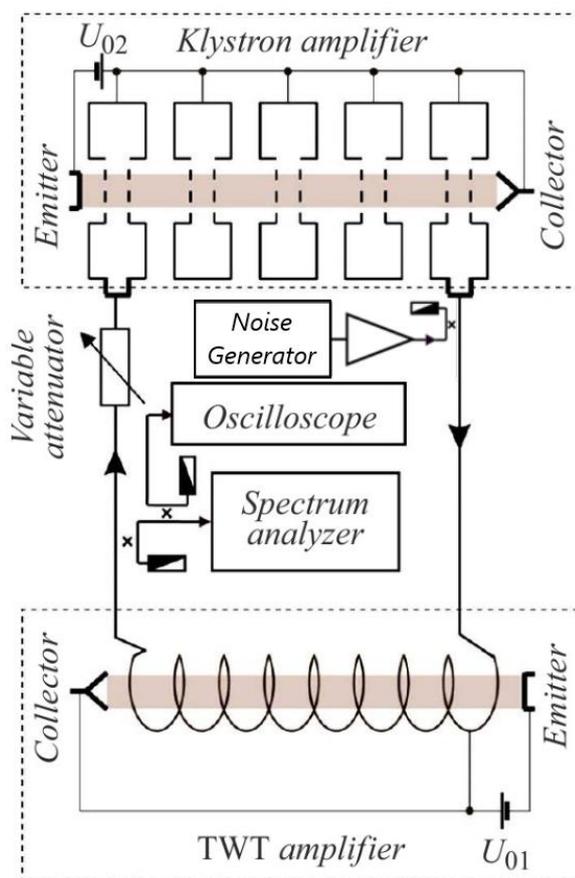


Рисунок 2.1. Схематическое изображение микроволнового вакуумного генератора хаоса, находящегося под внешним СВЧ шумовым воздействием.

мощности сигнала на входе пролетного клистрона регулируется с помощью переменного аттенюатора и контролировался с помощью измерителя мощности Agilent EPM Series Power Meter N1914A.

В представленной на рисунке 2.1 модифицированной схеме шумотрона ЛБВ работает в слабонелинейном режиме усиления для генерируемого в кольце хаотического СВЧ сигнала, а многорезонаторный пролетный клистрон в сильно нелинейном режиме – на падающем участке амплитудной характеристики. В отличие от предыдущей генераторной схемы хаотическая динамика данного автогенератора будет определяться амплитудной нелинейностью пролетного клистрона. ЛБВ используется здесь только в качестве линейного усилителя, для компенсации общего уровня потерь в кольце, что необходимо, для генерации СВЧ сигнала. Ниже представлена

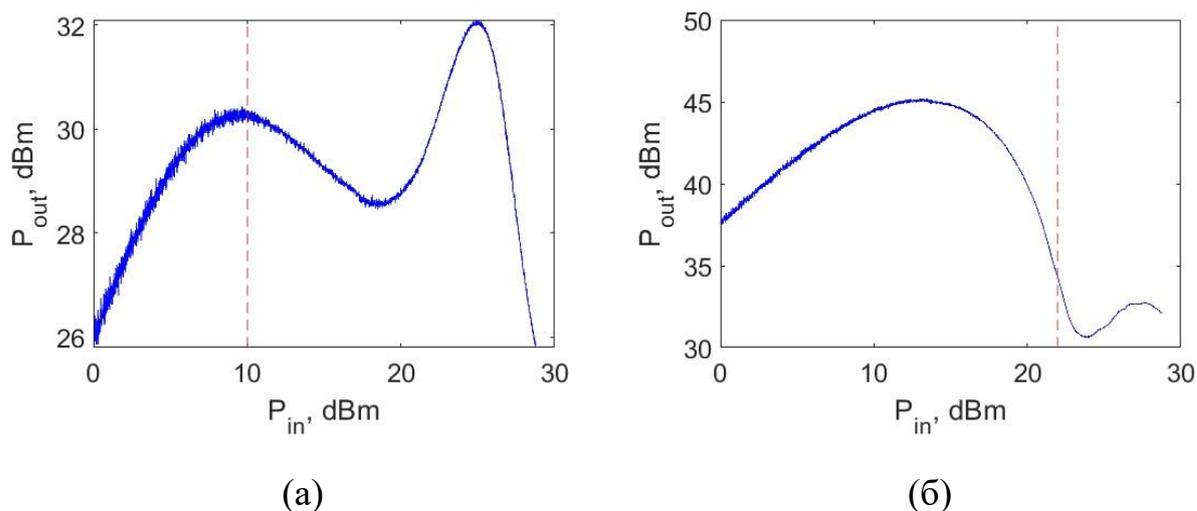


Рисунок 2.2. Амплитудные характеристики ЛБВ усилителя (а) и многорезонаторного пролетного клистрона (б). На (а) результаты получены для $U_{01}=2.9$ кВ и $I_{01}=35.1$ мА, на (б) $U_{02}=2.2$ кВ и $I_{02}=42$ мА. В обоих случаях измерения проводились на частоте $f=2.8$ ГГц.

2.2 Экспериментальные результаты

На рисунке 2.3 показаны спектры мощности СВЧ сигнала, генерируемого при изменении коэффициента усиления исследуемого активного кольцевого резонатора $G = K_{\Sigma} - A_{\Sigma}$ в дБ, где K_{Σ} - коэффициент

усиления цепочки «ЛБВ - пролетный клистрон» и A_{Σ} - суммарный уровень потерь сигнала в кольце, который управляется с помощью переменного аттенюатора. Из представленных на рисунке 2.3а результатов следует, что при $G = 0$ в кольце генерируется монохроматический СВЧ сигнал на частоте $f_0 = 2.771$ ГГц. При $G = 10$ дБ (см. рисунок 2.3б) наблюдается амплитудная модуляция СВЧ сигнала с частотой автомодуляции $f_{AM} = 21$ МГц. С увеличением затухания до $G = 11.7$ дБ (см. рисунок 2.3в) происходит

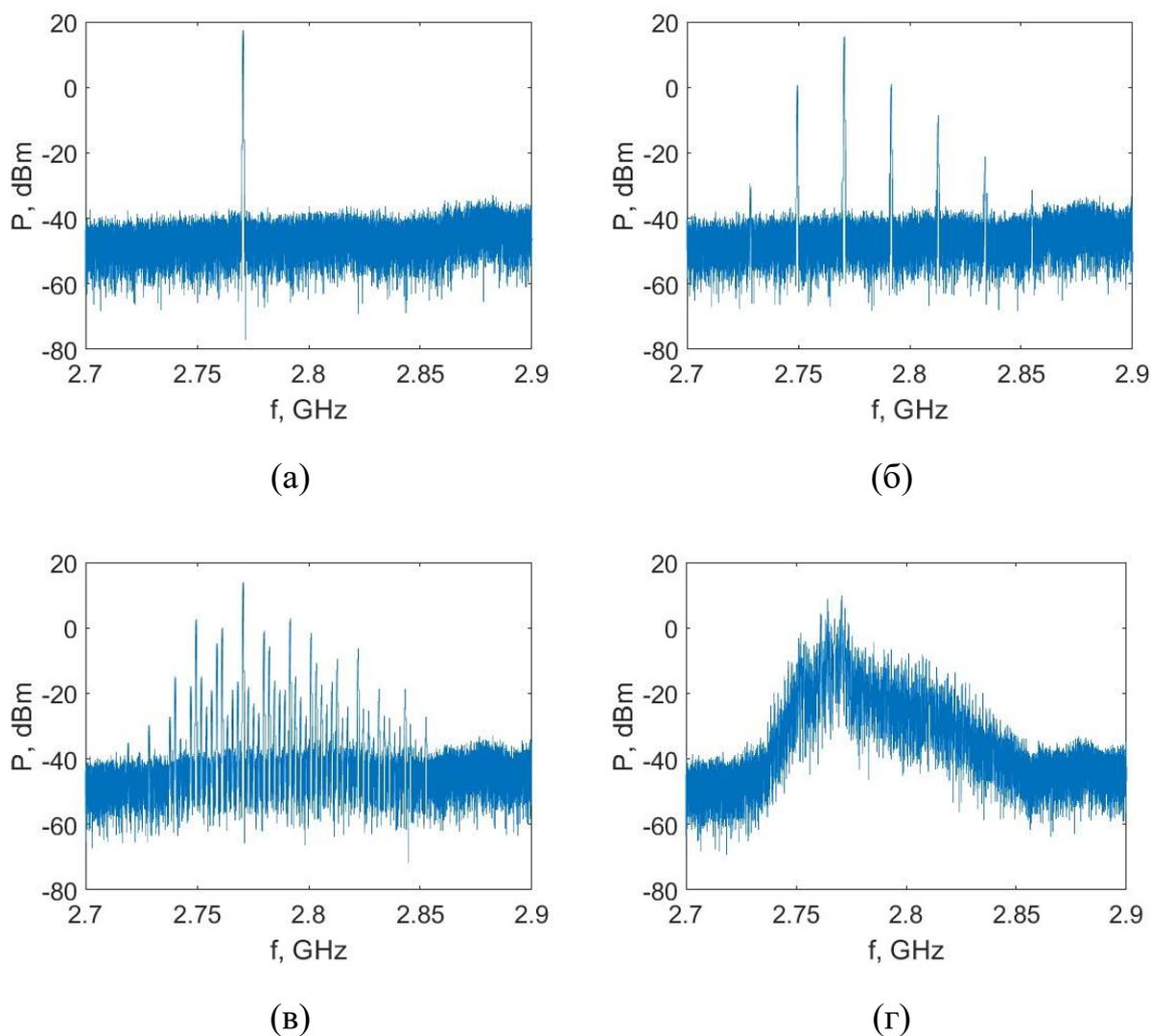


Рисунок 2.3. Спектры мощности СВЧ сигнала, генерируемого в исследуемом автогенераторе при изменении коэффициента усиления кольца G : 0 (а), 10 дБ (б), 11.7 дБ (в) и 12.9 дБ (г). Результаты получены для $U_{01}=2.9$ кВ и $I_{01}=35.1$ мА, $U_{02}=2.2$ кВ и $I_{02}=42$ мА.

удвоение и учетверение периода автомодуляции колебаний, а при $G = 12.9$ дБ (см. рисунок 2.3г) спектр СВЧ сигнала становится практически сплошным и в системе возникает динамический хаос [25]. Данный нелинейный процесс определяется перегруппировкой электронов в пучке под действием электромагнитных колебаний большой амплитуды. В последнем случае мощность генерируемого хаотического СВЧ сигнала на входе ЛБВ-усилителя была $P_{\text{вх}}^{\text{ЛБВ}} = +10$ дБмВт, а на входе многорезонаторного пролетного клистрона $P_{\text{вх}}^{\text{КЛ}} = +22$ дБмВт. Данные уровни мощности показаны на рисунке 2.2 пунктирными линиями.

После установления в системе хаотической динамики, в цепь обратной связи на вход ЛБВ-усилителя подавался шумоподный СВЧ сигнал с генератора ESG E4438C. Центральная частота шумоподного СВЧ сигнала f_n и его полоса частот Δf_n выбирались таким образом, чтобы они не приходились на полосу частот генерируемого в кольце хаотического СВЧ сигнала, но находились при этом в рабочей полосе частот ЛБВ-усилителя. Такое частотное разделение хаотического и шумоподного СВЧ сигналов было необходимым условием для диагностирования явления когерентного резонанса. В данном эксперименте центральная частота шумоподного СВЧ сигнала была равна $f_n = 2.6$ ГГц, а его полоса частот Δf_n менялась от 1 МГц до 80 МГц и не пересекала полосу частот хаотического СВЧ сигнала Δf_{ch} , которая была порядка 150 МГц.

На рисунке 2.4 представлены экспериментальные временные ряды хаотического СВЧ сигнала, которые получены при различных уровнях мощности внешнего шумового СВЧ сигнала. Из представленных на рисунке 2.4а результатов следует, что при уровне мощности шума $P_n = +20$ дБмВт на входе ЛБВ-усилителя, в системе генерируется «непрерывный» хаотический СВЧ сигнал. С увеличением мощности шума до $P_n = +24,5$ дБмВт (см. рисунок 2.4б), шумовой СВЧ сигнал осуществляет временную фильтрацию хаотического СВЧ сигнала. На тех временных интервалах, где мгновенные значения амплитуды шума соответствуют

режиму насыщения ЛБВ-усилителя, хаотическая динамика системы подавляется, а на временных интервалах, где мгновенные значения амплитуды шума соответствуют режиму линейного усиления ЛБВ, генерируется хаотический СВЧ сигнал. Таким образом, в системе устанавливается режим перемежаемости типа “on-ff”. При дальнейшем увеличении мощности шумового СВЧ сигнала (см. рисунок 2.4в,г) длительность временных интервалов, на которых наблюдается хаотическая

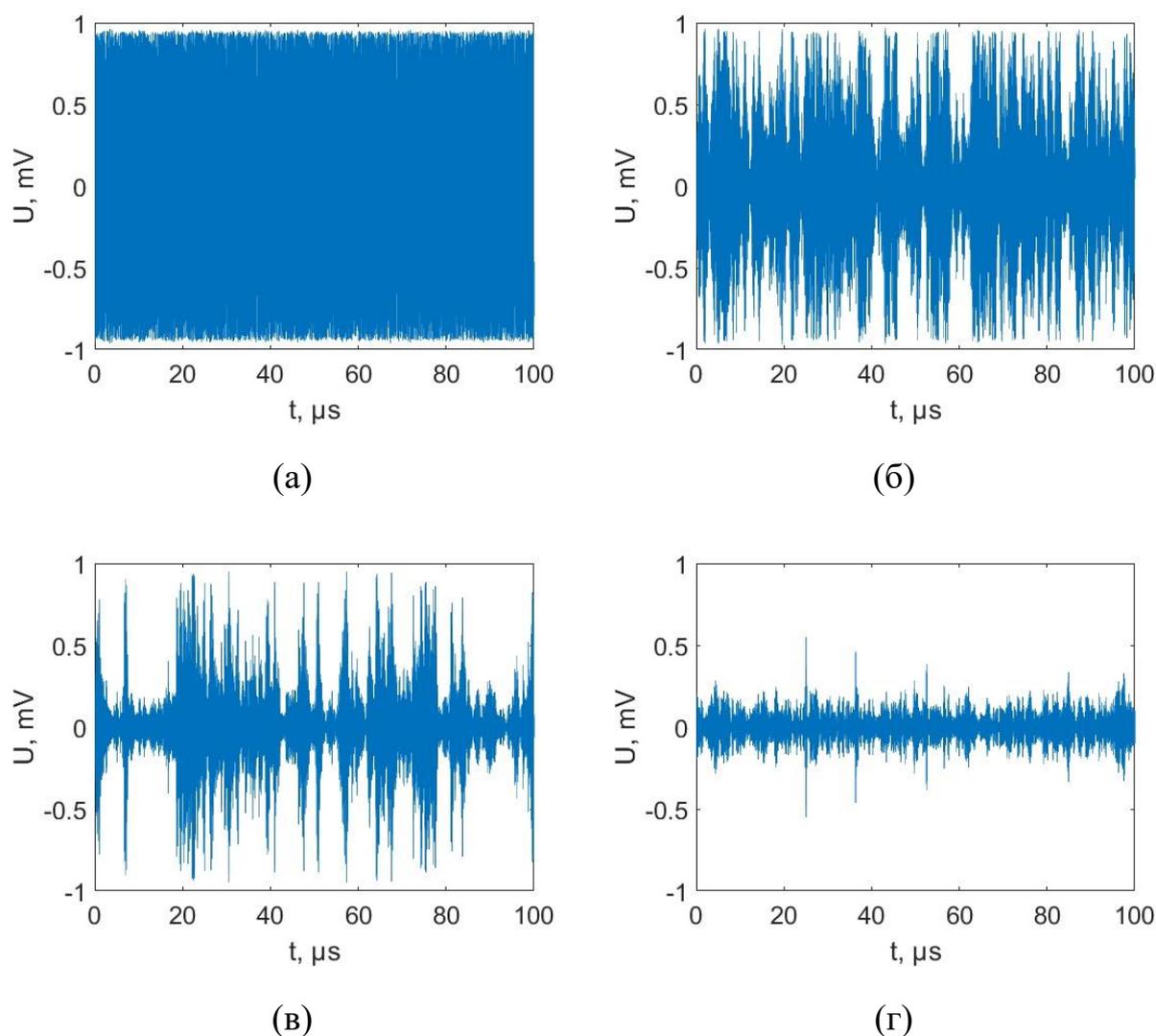
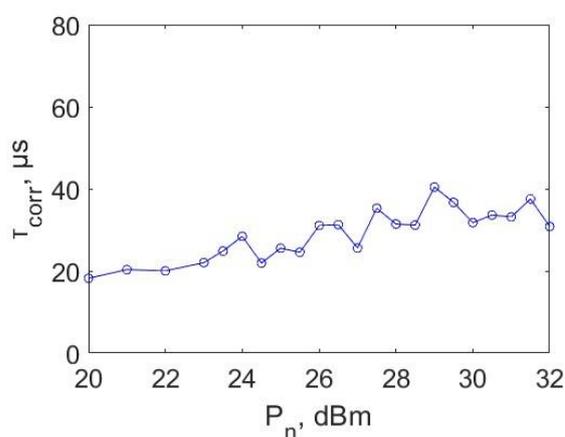


Рисунок 2.4. Временные реализации хаотического СВЧ сигнала, генерируемого в исследуемом автогенераторе при изменении уровня мощности шума подаваемого на вход ЛБВ-усилителя с центральной частотой $f_n = 2.6$ ГГц, шириной полосы частот $\Delta f_n = 40$ МГц и мощностью (а)

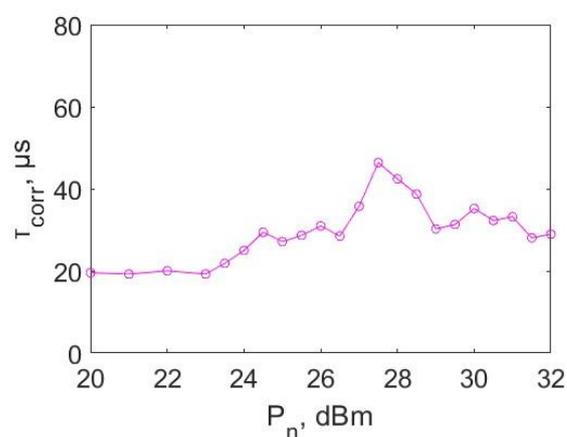
20dBm, (б) 24.5dBm, (в) 26dBm, (г) 32dBm. Результаты получены для $U_{01}=2.9$ кВ и $I_{01}=35.1$ мА, $U_{02}=2.2$ кВ и $I_{02}=42$ мА.

динамика системы, уменьшается.

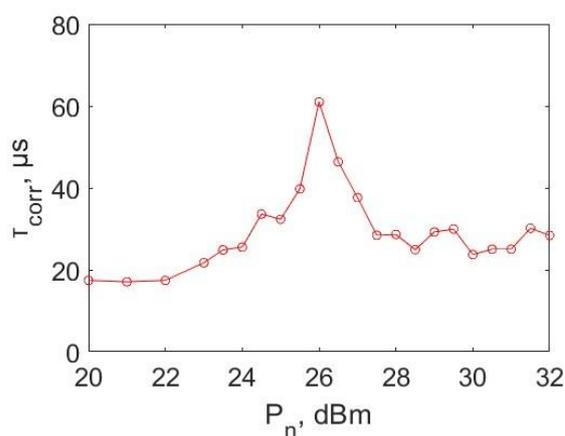
На рисунке 2.5 приведены зависимости времени автокорреляции хаотического СВЧ сигнала от мощности шумового СВЧ, измеренные при различных полосах частот шумового СВЧ сигнала. Из представленных на рисунке 2.5 результатов следует, что явление когерентного резонанса в данной хаотической автоколебательной системе имеет наиболее ярко



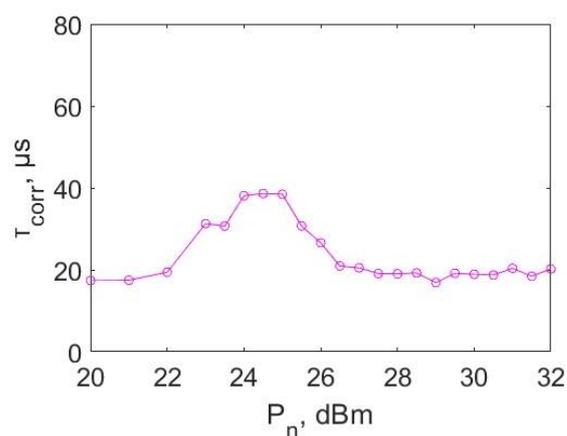
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2.6. Зависимости времени автокорреляции хаотического СВЧ сигнала τ_{corr} от мощности шумового СВЧ сигнала при изменении полосы частот шума Δf_n : (а) 5 МГц, (б) 10 МГц, (в) 40 МГц и (г) 80 МГц. В

эксперименте токи пучка и ускоряющие напряжения имели следующие значения: $U_{01}=2.9$ кВ и $I_{01}=39.3$ мА, $U_{02}=2.2$ кВ и $I_{02}=42$ мА.

выраженный характер только при определенной полосе частот шумового СВЧ сигнала (в данном случае при $\Delta f_n=40$ МГц). При этом уровень мощности шумового СВЧ сигнала $P_{n,res}$, при котором время автокорреляции имеет максимальное значение, зависит от полосы частот шумового СВЧ сигнала. Так, при $\Delta f_n=5$ МГц это значение является максимальным $P_{n,res}=+29$ дБмВт, а при увеличении полосы частот шума до $\Delta f_n=80$ МГц оно уменьшается до $P_{n,res}=+24.5$ дБмВт.

2.3 Выводы

Экспериментально обнаружен эффект когерентного резонанса в схеме шумотрона, состоящего из ЛБВ-усилителя, работающего в режиме слабой амплитудной нелинейности, и многорезонаторного пролетного клистрона, который работает на падающем участке амплитудной характеристики (сильно нелинейный режим), что обуславливает генерацию хаотического СВЧ сигнала в кольце. В качестве внешнего СВЧ сигнала используется шумовой СВЧ сигнал с ограниченным спектром, полоса частот которого меняется в пределах от 5 МГц до 80 МГц.

Установлено, что зависимость времени автокорреляции от интегральной мощности шумового СВЧ сигнала имеет ярко выраженный максимум, который наблюдается при определенной мощности шума. Наибольшее значение времени автокорреляции наблюдается при некоторой полосе частот шумового СВЧ сигнала равной 40 МГц. Оно уменьшается с увеличением полосы частот шума.

Показано, что в отличие от схемы широкополосного (многомодового) генератора хаоса на основе двух ЛБВ-усилителей, в узкополосном (одномодовом) генераторе хаоса на основе ЛБВ-усилителя и многорезонаторного пролетного клистрона, мощность шумового СВЧ сигнала, при котором наблюдается максимальное значение времени

автокорреляции хаотического СВЧ сигнала в режиме «on-off» перемежаемости, зависит от полосы частот шумового СВЧ сигнала. Данный уровень мощности имеет максимальное значение $P_{n,res}=+29$ дБмВт при относительно малой полосе шума $\Delta f_n=5$ МГц, и это значение мощности уменьшается до $P_{n,res}=+24.5$ дБмВт при увеличении полосы частот шума до $\Delta f_n=80$ МГц.

Список литературы

1. Hu G., Ditzinger T., Ning C. Z., Haken H. Stochastic resonance without external periodic force // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. P. 807–810.
2. Pikovsky A., Kurths J. Coherence resonance in a noisedriven excitable system // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78. P. 775–778.
3. Lindner B., Schimansky-Geier L. Analytical approach to the stochastic FitzHugh-Nagumo system and coherence resonance // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 60. P. 7270–7276.
4. Lindner B., Garcia-Ojalvo J., Neiman A. B., Schimansky-Geier L. Effects of noise in excitable systems // Phys.Rep. 2004. Vol. 392. P. 321–424.
5. Lee S. G., Neiman A. and Kim S., Phys. Rev. E, 57 (1998) 3292.
6. L. Q. Zhou, X. Jia, and Q. Ouyang, Phys. Rev. Lett. 88,138301 (2002).
7. J.L.A. Dubbeldam, B. Krauskopf, D. Lenstra, Phys.Rev. E 60, 6580 (1999)
8. J. Hizanidis, A.G. Balanov, A. Amann, E. Schöll, Noise-Induced Front Motion: Signature of a Global Bifurcation Phys. Rev. Lett. 96, 244104 (2006)
9. Han S.K., Yim T.G., Postnov D.E. and Sosnovtseva O.V. Interacting Coherence Resonance Oscillators // Phys. Rev. Lett., 1999. Vol. 83 (9)1771.
10. G. Giacomelli, M. Giudici, S. Balle, J.R. Tredicce, Phys.Rev. Lett. 84, 3298 (2000)
11. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Садовников С.А., Скороходов В.Н., Степанов А.О. Когерентный резонанс в кслитронном автогенераторе на пороге самовозбуждения // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 22. С. 86-94.
12. Palenzuela C., Toral R., Mirasso C. R., Calvo O., Gunton J. D. Coherence resonance in chaotic systems // Europhys. Lett. 2001. Vol. 56 (3). P. 347–353.
13. Ushakov O. V., Wünsche H. J., Henneberger F., Khovanov I. A., Schimansky-Geier L., Zaks M. A. Coherence resonance near a Hopf bifurcation // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. 123903.

14. Zakharova A., Vadivasova T., Anishchenko V., Koseska A., Kurths J. Stochastic bifurcations and coherence-like resonance in a self-sustained bistable noisy oscillator // *Phys. Rev. E*. 2010. Vol. 81. 011106
15. Sethia G. C., Kurths J., Sen A. Coherence resonance in an excitable system with time delay // *Phys. Lett. A*. 2007. Vol. 364. P. 227–230.
16. Geffert P. M., Zakharova A., Vüllings A., Just W., Schöll E. Modulating coherence resonance in nonexcitable systems by time-delayed feedback // *Eur. Phys. J. B*. 2014. Vol. 87. P. 291–304.
17. Semenov V., Feoktistov A., Vadivasova T., Scholl E., Zakharova A. Time-delayed feedback control of coherence resonance near subcritical Hopf bifurcation: Theory versus experiment // *Chaos*. 2015. Vol. 25, No 3. 033111.
18. Semenova N., Zakharova A., Anishchenko V., and Schöll E. Coherence-Resonance Chimeras in a Network of Excitable Elements // *PRL* 117, 014102 (2016).
19. Khatun T., Bandyopadhyay B., and Banerjee T. Diverse coherence-resonance chimeras in coupled type-I excitable systems // *PHYSICAL REVIEW E* 106, 054208 (2022)
20. Liu Z. and Lai Y.-C. Coherence Resonance in Coupled Chaotic Oscillators // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 86, 4737.
21. Гришин С.В., Зарькова Е.В., Шараевский Ю.П. Генерация хаотических СВЧ импульсов в широкополосной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой под воздействием импульсно-модулированного СВЧ сигнала // *ПЖТФ*. 2011. Т. 37, № 5. С. 96-104.
22. Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Манышев Р.А., Скороходов В.Н. Генерация хаотических СВЧ импульсов в широкополосных спин-волновых и вакуумных генераторах хаоса под внешним периодическим воздействием // *Изв. ВУЗов - Прикладная нелинейная динамика*. 2012. Т. 20, № 5. С. 137-155.
23. Grishin S.V., Moskalenko O.I., Pavlov A.N., Romanenko D.V., Sadovnikov A.V., Sharaevskii Yu.P., Sysoev I.V., Medvedeva T.M.,

- Seleznev E.P., Nikitov S.A. Space-Quasiperiodic and Time-Chaotic Parametric Patterns in a Magnonic Quasicrystal Active Ring Resonator // Phys. Rev. Appl. 2021. Vol. 16, No 5. P. 054029.
24. Гришин С.В., Никитов С.А., Романенко Д.В., Худоложкин В.О., Шараевский Ю.П. Генерация одиночных хаотических импульсов в кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой под внешним шумовым воздействием // ПЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 7. С. 9-18.
25. Трубецков Д.И. Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков Т.1. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003