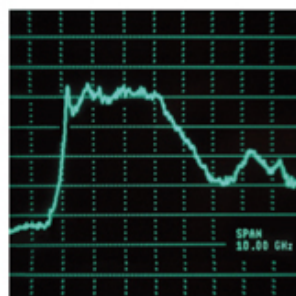


ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ

А.С. Дмитриев
Е.В. Ефремова
Н.А. Максимов
А.И. Панас

Генерация хаоса



ТЕХНОСФЕРА

УДК 621.37

ББК 32.85

Г29

Г29 Генерация хаоса / Под общ. ред. Дмитриева А.С.

Москва: Техносфера, 2012. – 424 с. + 8 с. цв. вклейки

ISBN 978-5-94836-321-9

Явление динамического хаоса, открытое в последней трети двадцатого века, широко распространено в природе и искусственных системах. Его необычные свойства буквально перевернули обычные представления о том, что малые возмущения или события могут приводить лишь к незначительным изменениям в будущем. Оказалось, что все может быть с точностью до наоборот («эффект бабочки»).

Подобно тому, как лазеры являются эффективными источниками узкополосного света, генераторы хаотических колебаний являются эффективными источниками широкополосных аналоговых шумоподобных колебаний.

Излагаются теория генерации динамического хаоса в радио- и микроволновом диапазонах частот, принципы построения источников хаоса и их реализация в виде твердотельных устройств с сосредоточенными параметрами.

УДК 621.37

ББК 32.85

Авторы: Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.

© Дмитриев А.С. и др., 2012

© 2012, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

Содержание

Предисловие	9
Введение	11
ГЛАВА 1. НАЧАЛО ПРОЦЕССА. ОБНАРУЖЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	19
1.1. Введение	19
1.2. Генерация хаоса в вакуумных приборах	20
1.3. Микрополосковые генераторы хаоса	23
1.4. Моделирование генераторов хаоса	26
ГЛАВА 2. РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С СОБСТВЕННОЙ СЛОЖНОЙ ДИНАМИКОЙ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ ...	32
2.1. Введение	32
2.2. Кольцевые радиофизические системы	34
2.3. Теоретические предпосылки исследования сложной динамики физических систем	40
2.4. Методы компьютерного моделирования	42
2.5. Экспериментальные методы исследования. Обработка данных	45
ГЛАВА 3. ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА КОЛЬЦЕВЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОЛУТОРА СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ	47
3.1. Введение	47
3.2. Динамика автогенератора с инерционным запаздыванием первого порядка	48
3.3. Теоретическое и численное исследование влияния асимметрии на динамику кольцевого автогенератора	70
3.4. Экспериментальное исследование автогенератора с асимметричной характеристикой нелинейного элемента	83
ГЛАВА 4. ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС В КОЛЬЦЕВЫХ СИСТЕМАХ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ	95
4.1. Введение	95
4.2. Странные аттракторы в кольцевых автоколебательных системах с апериодическими звеньями	96

4.3. Динамика модели с 2,5 степенями свободы и симметричной характеристикой нелинейного элемента.....	98
4.4. Явление затягивания и переключения мод в системе с 2,5 степенями свободы	114
4.5. Развитие странных аттракторов с ростом надкритичности. Фазовые переходы «хаос—гиперхаос»	119
4.6. Динамика модели с 3,5 степенями свободы. Хаос на основе двух- и трехчастотных колебаний	123
4.7. Экспериментальное исследование системы с 2,5 степенями свободы и асимметричной характеристикой нелинейного элемента.....	125
ГЛАВА 5. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ХАОСА	135
5.1. Введение	135
5.2. Понятие хаотического синхронного отклика	136
5.3. Примеры декомпозиции автоколебательных систем	138
5.4. Оценка качества хаотического синхронного отклика	141
5.5. Устойчивость отклика. Явление «on—off»-перемежаемости	142
5.6. Критерий прецизионности генераторов	146
5.7. Структура прецизионных генераторов хаоса	147
5.8. Генератор хаоса с 1,5 степенями свободы	149
5.9. Генератор хаоса с 2,5 степенями свободы	158
ГЛАВА 6. СИНТЕЗ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ЗАДАННЫМ СПЕКТРОМ МОЩНОСТИ	166
6.1. Введение	166
6.2. Модель автоколебательной системы (АКС).....	166
6.3. АКС с числами $n = 1, m = 0$	168
6.4. АКС с числами $n = 2, m = 0$	171
6.5. АКС с числами $n = 1, m = 1$	173
6.6. Динамические характеристики хаотических сигналов с заданными спектральными характеристиками	174
ГЛАВА 7. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА БАЗЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ	177
7.1. Введение	177
7.2. Базовые модели низкоразмерных автоколебательных систем на основе твердотельных активных элементов	177
7.3. Автоколебательная система с 1,5 степенями свободы	180
7.4. Автоколебательная система с 2,5 степенями свободы	182

7.5. Задача формирования спектральных характеристик сигналов в низкоразмерных автоколебательных системах	189
7.6. Спектральные характеристики автоколебательной системы с 1,5 степенями свободы	190
7.7. Спектральные характеристики автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы	195
7.8. Автоколебательная система с 2,5 степенями свободы с экспоненциальной характеристикой активного элемента	199
7.9. Влияние размерности автоколебательной системы на спектральные свойства хаотических сигналов.....	203
7.10. Генерация хаотических колебаний с более сложными формами спектра мощности	205

ГЛАВА 8. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ХАОСА МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

8.1. Введение	208
8.2. Принципы построения имитационных моделей для хаотических систем микроволнового диапазона	210
8.3. Средства моделирования	211
8.4. Модель твердотельного источника хаоса дециметрового диапазона.....	213
8.5. Экспериментальный макет твердотельного источника хаоса дециметрового диапазона	223
8.6. Модель твердотельного источника хаоса сантиметрового диапазона	227
8.7. Экспериментальный макет твердотельного источника хаоса сантиметрового диапазона.....	228
8.8. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов.....	230

ГЛАВА 9. ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ.....

9.1. Введение	232
9.2. Модель неавтономной автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы	233
9.3. Динамика низкоразмерной модели автоколебательной системы при внешнем гармоническом воздействии	235
9.4. Динамика низкоразмерной модели автоколебательной системы при периодическом воздействии видеоимпульсами.....	237
9.5. Генерация сложных идентичных импульсов	239
9.6. Модель неавтономной автоколебательной системы с сосредоточенными параметрами	240
9.7. Моделирование автоколебательной системы с сосредоточенными параметрами под внешним управляющим воздействием.....	241

9.8. Идентичность импульсов.....	244
9.9. Экспериментальный макет	245
9.10. Генерация импульсов. Эксперимент	246
ГЛАВА 10. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ХАОСА МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА.....	249
10.1. Введение.....	249
10.2. Динамика некоторых простых автоколебательных систем с сосредоточенными параметрами при учете эквивалентной схемы корпуса транзистора.....	249
10.3. Источник хаоса микроволнового диапазона с одним источником питания. Моделирование без учета топологии платы	256
10.4. Источник хаоса микроволнового диапазона с одним источником питания. Моделирование с учетом топологии платы	258
10.5. Экспериментальное исследование твердотельного источника хаоса микроволнового диапазона с одним питанием.....	260
10.6. Источник хаоса микроволнового диапазона с одним источником питания с печатными индуктивностями	262
10.7. Экспериментальное исследование динамических режимов твердотельного источника хаоса микроволнового диапазона с одним источником питания с печатными индуктивностями	267
10.8. Экспериментальное исследование зависимости спектральных характеристик сигнала от значений параметров системы.....	271
ГЛАВА 11. ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА	275
11.1. Введение.....	275
11.2. Модель автоколебательной системы с полевым транзистором в качестве активного элемента.....	275
11.3. Генерация хаоса на высоких частотах при заданной крутизне характеристики транзистора.....	279
11.4. Моделирование с учетом реальных характеристик транзистора.....	281
ГЛАВА 12. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ХАОСА МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА В ВИДЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ	285
12.1. Введение.....	285
12.2. Моделирование твердотельных источников хаоса микроволнового диапазона в виде интегральных микросхем на основе кремний-германиевой технологии	286

12.3. Экспериментальная реализация твердотельного источника хаоса микроволнового диапазона в виде интегральной микросхемы на основе кремний-германиевой технологии	293
ГЛАВА 13. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ТРЕМЯ АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	294
13.1. Введение.....	294
13.2. Структура автоколебательной системы	294
13.3. Экспериментальное исследование системы.....	295
13.4. Модель распределённой системы	299
13.5. Исследование бифуркационных явлений	302
ГЛАВА 14. СИСТЕМА НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ.....	309
14.1. Введение.....	309
14.2. Переход от системы с распределёнными элементами к структуре на сосредоточенных элементах.....	309
14.3. Динамика основных режимов колебаний	315
14.4. Экспериментальное исследование системы.....	320
14.5. Изменение спектральных и энергетических свойств колебаний при вариации количества активных элементов в кольце обратной связи.....	324
14.6. Управление спектром автоколебаний	326
ГЛАВА 15. ГЕНЕРАЦИЯ ХАОСА В СИСТЕМЕ НА КМОП-СТРУКТУРЕ....	330
15.1. Введение.....	330
15.2. Структура и модель системы.....	331
15.3. Исследование динамических свойств системы.....	334
15.4. Управление диапазоном частот спектра мощности колебаний	338
15.5. Влияние длины канала КМОП-структуры на частотные и энергетические характеристики хаотических колебаний.....	340
15.6. Эксперимент	344
Процесс разработки экспериментального макета.....	344
Исследование экспериментального макета.....	348
ГЛАВА 16. ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА В СИСТЕМЕ НА КМОП-СТРУКТУРЕ.....	351
16.1. Введение.....	351
16.2. Динамика системы при работе в импульсном режиме	351
16.3. Экспериментальное подтверждение возможности генерации хаотических импульсов	357



ГЛАВА 17. ГЕНЕРАТОРЫ ХАОСА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ В МИКРОПОЛОСКОВОМ ИСПОЛНЕНИИ	359
17.1 Введение.....	359
17.2 Описание конструкции генератора и его динамических режимов	359
17.3. Низкочастотное периодическое воздействие на СВЧ-генератор.....	366
ГЛАВА 18. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ИХ АНАЛИЗ.....	369
18.1 Введение.....	369
18.2. Динамика нелинейного осциллятора с $p-n$ -переходом при внешнем гармоническом воздействии. Численный эксперимент.....	369
18.3. Экспериментальное исследование физической модели нелинейного осциллятора	377
18.4. Нелинейный осциллятор при внешнем гармоническом воздействии и постоянном смещении на $p-n$ -переходе.....	383
18.5. Низкочастотная модель генератора с варактором	386
ГЛАВА 19. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ МИКРОВОЛНОВОГО ХАОСА ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ	391
Литература	397
Предметный указатель	418

ГЛАВА I

НАЧАЛО ПРОЦЕССА. ОБНАРУЖЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

I.1. Введение

Разработка генераторов хаоса радио- и СВЧ-диапазонов ведется начиная с шестидесятых годов двадцатого века. Созданию первых генераторов хаоса на вакуумных приборах предшествовало несколько лет интенсивных исследований по получению шумовых колебаний в плазменно-пучковых системах. Плазменно-пучковые системы с физической точки зрения были интересны тем, что хотя возникновение шумовых колебаний в них связывалось с множеством степеней свободы плазмы, выступающей в качестве рабочей среды, там явно присутствовала и динамическая составляющая в виде усилителя и цепи обратной связи. В результате интенсивность получаемых шумов была намного выше шумов «теплового уровня». Эти работы базировались на статье (*Ахиезер и Файнберг [1951]*), в которой была обнаружена возможность усиления высокочастотной плотности модуляции быстрого электронного пучка при прохождении его через электронно-ионную плазму. С точки зрения радиоэлектроники появлялась принципиальная возможность создания электронных усилителей и генераторов, в которых роль замедляющих структур, обеспечивающих взаимодействие электромагнитных волн с электромагнитным потоком, может играть прозрачная для электронного потока плазма. В конце 50-х годов в ИРЭ АН СССР были поставлены теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия плазмы газового разряда с электронными потоками (*Залогин и Кислов В.В. [2006]*). В ходе теоретической разработки и экспериментов была продемонстрирована возможность эффективного усиления электромагнитных волн в плазменных образованиях, пронизываемых быстрым электронным потоком, как в модели Ахиезера и Файнберга, так и в плазменно-пучковом образовании, находящемся в достаточно сильном продольном магнитном поле (*Бернашевский и др. [1965]*). Прибор представлял собой плазменный аналог лампы обратной волны (ЛОВ).

При экспериментальном изучении генерации электромагнитных волн в плазменно-пучковых системах с продольным магнитным полем был обнаружен неожиданный эффект излучения из такой системы интенсивных шумов в сантиметровом диапазоне длин волн. Излучение имело интенсивность, которая многократно превосходила тепловое излучение плазмы. Шум возникал сразу после включения электронного пучка. Никаких переходных режимов не наблюдалось ни при увеличении тока электронного пучка, ни при увеличении магнитного поля.

На генератор шума, использующий обнаруженный эффект, Н.Н. Залогин и В.Я. Кисловым было получено авторское свидетельство (*Залогин и Кислов В.Я.* [1963]). В развитие этого направления в середине 60-х годов шумовые колебания были получены в системе «плазма — электронный пучок» и на прямых волнах. Эти работы проводились в ИРЭ АН СССР и Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ). Макет генератора в ИРЭ представлял собой спиральную ЛБВ. В системе при включении электронного пучка возникала генерация монохроматических колебаний на одной из собственных частот. Эти колебания в сочетании с воздействием пучка способствовали ионизации остаточного газа в баллоне и возникновению в пространстве взаимодействия плазменно-пучкового разряда. Образовавшаяся плазма существенно увеличивала импеданс связи медленных волн с пучком, что приводило к одновременному возбуждению уже нескольких типов таких волн на разных, неэквидистантных из-за дисперсионных свойств замагниченной плазмы, частотах. Конкуренция различных типов возбуждаемых колебаний на нелинейностях системы «плазма — электронный пучок» в сочетании с релаксационными пульсациями концентрации плазмы приводила к тому, что результирующие колебания оказывались широкополосным шумом.

Уже в восьмидесятые годы после многолетних кропотливых теоретических и экспериментальных исследований сотрудники ХФТИ пришли к выводу о том, что генерация шума в плазменно-пучковых генераторах, так же как и в вакуумных приборах, носит нелинейно-динамический характер.

1.2. Генерация хаоса в вакуумных приборах

В первых генераторах стохастических (хаотических) колебаний, разработанных в ИРЭ АН СССР В.Я. Кисловым с сотрудниками, в качестве активного элемента использовались вакуумные электронные приборы — лампы бегущей волны (*Кислов и др.* [1967]; *Кислов и др.* [1979]; *Кислов* [1980]; *Кислов и др.* [1980]).

Вот как вспоминает события, связанные с созданием шумотрона, их активный участник Н.Н. Залогин (*Залогин и Кислов В.В.* [2006]):

«...В 1966 Е.А. Мясин, В.Я. Кислов и Е.В. Богданов обнаружили генерацию интенсивного электромагнитного шума в устройстве, состоящем из двух ЛБВ, замкнутых в кольцо. Это явление имело место тогда, когда одна из них была на-

строена как усилитель мощности, а другая, с уменьшенным током электронного пучка, была перегружена по току источника, что ослабляло сигнал с сильнейшими нелинейными искажениями. При рассмотрении в Институте патентной экспертизы поданной исследователями заявки на авторское свидетельство был обнаружен американский патент 1965 года, защищавший генератор шума на ЛБВ, выход которой был замкнут на вход. Поскольку схемы генераторов и трактовка их функционирования сильно отличались друг от друга, авторское свидетельство на «шумотрон» (*Кислов В.Я. и др.* [1967]) было выдано (с приоритетом от 31 июля 1967 года). Открытая публикация этого авторского свидетельства имела место лишь через 17 лет в 1984 году...».

Вскоре после обнаружения эффекта началось детальное изучение физических механизмов, приводящих к хаотичности генерируемых колебаний. Из-за отсутствия в шестидесятых годах высокопроизводительных компьютеров и удобных для исследователей систем программирования подавляющее большинство результатов, выявляющих происхождение и особенности генерируемых шумов, было получено экспериментальным путем.

В процессе исследований выяснилось, что природа возникновения хаоса в сложных автоколебательных системах кроется не в узкой специфике характеристик лампы с бегущей волной. Авторы пришли к выводу, что имеют дело с фундаментальным свойством автоколебательных систем со многими степенями свободы при наличии в них сильных нелинейностей определенного типа. Применительно к электронным генераторам большое количество степеней свободы означает многоконтурность или запаздывающую обратную связь в широкой полосе частот.

Обнаружение эффекта шумовой генерации в детерминированной системе с низким уровнем флуктуаций было воспринято вначале с недоверием многими специалистами в области статистической радиофизики и нелинейной теории колебаний, поскольку в то время понятие «автогенератор» ассоциировалось с возбуждением гармонических или несинусоидальных периодических колебаний.

Лампа бегущей волны, особенно в нелинейном режиме, является сложным электронным прибором, характеристики которого зависят от многих параметров. Тем не менее в процессе исследований шумовой генерации удалось построить ряд математических моделей, качественно адекватных поведению физической системы в некоторых частных случаях. В результате проведенных экспериментов и исследования динамики моделей было выявлено три основных сценария развития хаотических колебаний (*Залогин и Кислов В.В.* [2006]).

Первый сценарий (*автомодуляционный*) реализовывался при использовании в качестве нелинейного элемента ЛБВ, амплитудная характеристика которой имела острый пик насыщения и выраженный участок после насыщения.

С помощью аттенюатора в цепи обратной связи затухание постепенно уменьшалось. Сначала происходило регенеративное усиление начальных собственных

шумов ЛБВ, наблюдаемое с помощью чувствительного анализатора спектра. Максимумы шумового сигнала имели место на частотах, соответствующих балансу фаз в цепи обратной связи. При некотором критическом значении затухания в системе возникла генерация на одной частоте, соответствующей максимуму коэффициента передачи в кольце обратной связи. При этом регенеративное усиление шумов на других собственных частотах системы эффективно подавлялось. Такое подавление особенно имело место в районе, соответствующем максимальной амплитуде генерируемых колебаний, и в начале работы — на падающем участке. При сползании рабочей точки (точка пересечения амплитудной характеристики с прямой обратной связи) в зону, где тангенс угла наклона амплитудной характеристики становился меньше -1 (наклон отрицательный и по модулю больше 45°), в системе возникла автомодуляция — колебания амплитуды от обхода к обходу, период которой соответствовал двойному времени обхода цепи обратной связи. Затем автомодуляция усложнялась по закону удвоения (2, 4, 8, редко 16). Интервалы устойчивого существования цикла монотонно уменьшались с ростом их порядка. Наконец возникали шумовые колебания, которые имели вид амплитудной модуляции хорошо выделенной несущей (симметрия спектра). Коэффициент модуляции был невелик, но возрастал с уменьшением затухания в цепи обратной связи. При дальнейшем уменьшении затухания в цепи обратной связи шумовой режим модуляции снова вырождался в периодический. Период соответствовал трем периодам обхода в цепи обратной связи. Далее опять следовало удвоение периода модуляции и снова возникали шумовые колебания. Наиболее часто автомодуляционный сценарий наблюдался тогда, когда в цепь обратной связи включался фильтр, ограничивающий количество собственных частот в системе.

Второй сценарий развития хаотических колебаний в шумотроне был связан с особенностями фазовой характеристики ЛБВ, а именно с динамическим набегом фазы в нелинейном режиме. Эксперименты показали, что в диапазоне входных сигналов, соответствующем насыщению мощности, динамический набег фазы положителен. На падающем же участке амплитудной характеристики ЛБВ имеет место резкий отрицательный набег фазы с крутизной, достигающей $(\pi/2)$ рад/дБ.

Третий сценарий возбуждения широкополосных хаотических колебаний представлял собой резкий взрывной переход от узкополосного автомодуляционного режима к режиму возбуждения широкополосных шумовых колебаний. При обсуждении этих экспериментов было предположено, что в системе при определенной развязке в цепи обратной связи начинают выполняться условия одновременного возбуждения и конкуренции множества видов колебаний. Кроме того, при изучении эволюции спектров колебаний, возбуждаемых в системе, была отмечена неэквидистантность собственных частот автоколебательной системы, обусловленная дисперсией фазовой скорости в ЛБВ. В результате комбинационные частоты, рождающиеся при нелинейном взаимодействии, не совпадали с собственными частото-

тами системы. Возможно, это одна из причин, обуславливающих континуальность спектра генерируемых колебаний. Этот сценарий возникновения хаотических колебаний в шумотроне был впервые описан в статье (*Анисимова и др.* [1983]).

При дальнейших экспериментальных исследованиях генераторов с запаздывающей обратной связью на основе ЛБВ было подтверждено существование этих переходов к хаосу, а также зафиксированы переход к хаосу через разрушение двумерного тора и перемежаемость (*Кац и Трубецков* [1984]; *Кац* [1984]; *Кац* [1985]).

Вскоре после создания шумотрона была показана возможность генерации хаотических колебаний в устройствах на основе лампы обратной волны (*Безручко и др.* [1979]; *Безручко и др.* [1983]) и других вакуумных приборах.

Современное состояние исследований по генерации хаоса подробно описано в коллективной монографии (*Короновский и др.* [2009]).

В начале восьмидесятых годов возник интерес к генераторам хаоса радио- и СВЧ-диапазонов на основе полупроводниковых активных элементов, таких как транзисторы.

1.3. Микрополосковые генераторы хаоса

Первые генераторы хаоса с использованием биполярных транзисторов в качестве активных элементов были созданы в ИРЭ АН СССР весной 1981 года (*Кислов В.Я.* [1993]). Это были генераторы радиодиапазона, выполненные с применением микрополосковых элементов. В том же году на основе этих результатов был разработан передатчик хаотических сигналов «Шатер» для защиты информации в устройствах вычислительной техники от утечки по побочным излучениям. Передатчик оказался очень эффективным и в различных модификациях выпускается и используется до настоящего времени.

В 1983—1984 годах были разработаны транзисторные генераторы хаоса в диапазоне 3 ГГц и, таким образом, началось освоение СВЧ-диапазона. Ряд интересных динамических явлений в этих генераторах описан в работах (*Максимов и Кислов В.Я.* [1983]; *Максимов* [1984]). В последующие несколько лет был разработан ряд транзисторных генераторов хаоса в диапазоне до 6 ГГц. Все эти генераторы были реализованы на микрополосковой технологии и имели выходные мощности от нескольких десятков милливатт до 1 Вт.

Пример генератора хаоса СВЧ-диапазона (*Максимов* [1984]) подробно описан в главе 19.

В конце 90-х годов в связи с идеей использования динамического хаоса в системах связи встал вопрос о создании генераторов хаоса нового поколения. Существенными характеристиками этих новых генераторов должны были стать: небольшие мощности генерации (~ 1 мВт), компактность, низкая стоимость и пригодность к массовому производству.

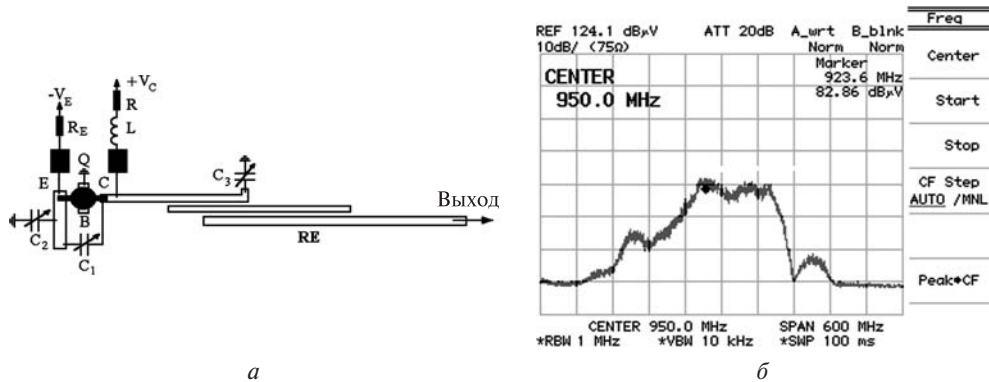


Рис. 1.1. Эскиз топологии генератора (а) и его спектр мощности (б) в диапазоне 880—1030 МГц

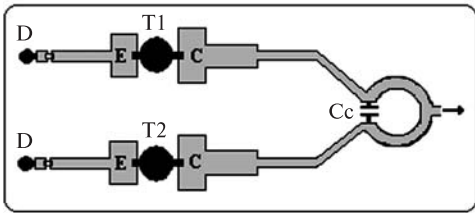
Было ясно, что в перспективе задачу нужно решать путем создания хаотических генераторов в виде монолитных интегральных схем (Губанов и др. [1999], Дмитриев и др. [2000а]). Однако это был вопрос будущего, а эксперименты по передаче информации нужно было начинать немедленно. Поэтому с учетом имеющегося опыта в создании хаотических генераторов был разработан микрополосковый генератор широкополосных хаотических колебаний дециметрового диапазона (Дмитриев и др. [2002а]) (рис. 1.1).

В качестве активного элемента (Q) в генераторе использован транзистор 2Т938А-2. В основу конструкции была положена трехточечная схема. Функцию резонансного элемента (пассивного осциллятора) выполнял резонатор на связанных полосковых линиях (RE). С макетом генератора были проведены эксперименты, которые показали, что при соответствующем подборе параметров элементов схемы в генераторе возбуждаются хаотические колебания, полоса и неравномерность спектра мощности которых определяются полосой пропускания и неравномерностью амплитудно-частотной характеристики резонатора. На рис. 1.1, б представлен спектр мощности выходного сигнала генератора. По уровню 10 дБ полоса генерации составляет ~150 МГц, при центральной частоте ~950 МГц, неравномерность спектральной характеристики менее 5 дБ.

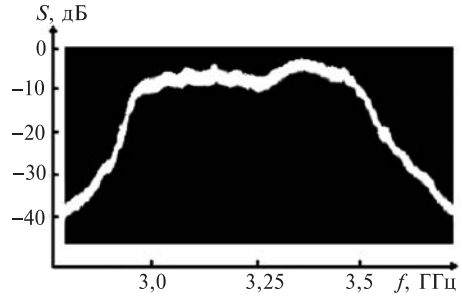
Весной 2000 года с применением этого генератора были проведены первые эксперименты по беспроводной прямохаотической передаче информации (Дмитриев и др. [2002], Dmitriev et al. [2001], Dmitriev et al. [2003а]).

В дальнейшем хаотические генераторы этого типа были созданы и в других диапазонах СВЧ-частот.

Один из возможных подходов к созданию генераторов хаотических колебаний предусматривает создание структуры из двух или нескольких взаимодействующих осцилляторов. Подробно этот подход описан в работе (Максимов и Панас [2003]; Maximov & Panas [2004]). В этой же работе предложен генератор хаотических коле-



а



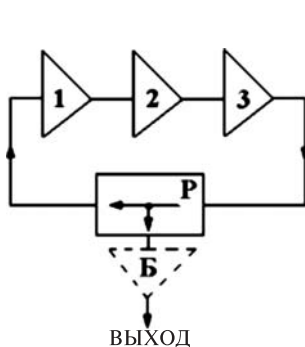
б

Рис.1.2. Эскиз топологии широкополосного генератора, структурно состоящего из идентичных связанных генераторов (а), спектр мощности генератора в диапазоне 3—3,5 ГГц (б)

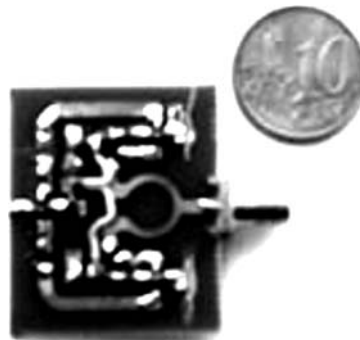
баний, построенный на основе двух взаимно связанных подсистем с идентичной топологией (рис. 1.2). Связь между подсистемами осуществлялась с помощью несбалансированного сумматора мощности и могла регулироваться емкостью C_c (рис. 1.2, а). На рис. 1.2, б приведен спектр мощности хаотического сигнала генератора. Ширина спектральной характеристики увеличилась примерно в 2,5 раза, а ее изрезанность уменьшилась по сравнению с одиночным генератором.

Транзистор — не единственный элемент, который может быть использован в качестве активного элемента при разработке источников хаоса микроволнового диапазона. Так, в работах (Дмитриев и др. [2005а]; Дмитриев и др. [2005б]; Panas et al. [2007]) предложен и описан генератор хаоса кольцевой структуры на основе чип-усилителей.

Блок-схема источника хаоса представлена на рис. 1.3, а, а внешний вид его экспериментального макета — на рис. 1.3, б. Система состоит из трех чип-усилителей, последовательно включенных и замкнутых в кольцевую схему через ми-



а



б

Рис. 1.3. а) Структура генератора хаоса. 1, 2, 3 — ЧИП-усилители; Р — разветвитель; Б — буферный ЧИП-усилитель; б) экспериментальный макет генератора.

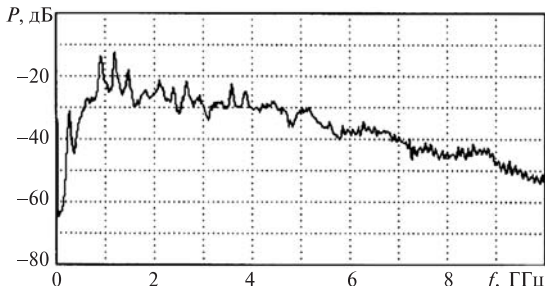


Рис. 1.4. Спектр мощности сигнала для одного из типовых режимов источника хаоса

крополосковый разветвитель. Функция последнего — отвести большую часть сигнала из кольца обратной связи в нагрузку, а оставшуюся часть направить снова в кольцо. Основной волноведущей структурой генератора является 50-омная микрополосковая линия. В качестве ЧИП-усилителей были использованы стандартные, промышленно выпускаемые усилительные элементы, согласованные по входу и выходу на 50 Ом.

Анализ сигналов на выходах усилителей показал, что первый из усилителей (по направлению распространения сигнала по кольцевой схеме) работает в режиме, близком к линейному, второй выполняет функцию усилителя средней мощности, а третий работает в режиме насыщения, играя тем самым роль основного нелинейного элемента системы.

Макеты источников были реализованы по микрополосковой технологии. В качестве подложки использовались диэлектрические материалы толщиной 1 мм с $\epsilon = 2.8$ и $\epsilon = 10.0$. В процессе работы с экспериментальными макетами источников хаоса были опробованы различные ЧИП-усилители, отличающиеся как параметрами, так и технологией их изготовления.

Было установлено, что диапазон и полоса частот генерируемых колебаний соответствуют аналогичным параметрам усилителей. Так, если рабочая полоса ЧИП-усилителя по паспортным данным находится в диапазоне 100—5500 МГц, то именно ее и занимает спектр мощности выходного сигнала генератора. Один из типовых спектров мощности выходного сигнала в режиме генерирования хаотических колебаний для случая использования усилителей MSA-0986 приведен на рис. 1.4.

1.4. Моделирование генераторов хаоса

Динамический хаос является принципиально нелинейным явлением. В силу его неперIODичности, чувствительности к начальным условиям и непредсказуемости траекторий на большие времена для него нельзя получить решение в замкнутом аналитическом виде. Поэтому основная роль в теоретическом исследовании динамических систем с хаотическим поведением принадлежит численному модели-

рованию на компьютерах в совокупности с методами развитой за последние десятилетия качественной теории динамических систем. Сейчас это общая схема исследования любой динамической системы со сложным поведением. Более сорока лет назад, когда начиналась история генераторов хаоса, не было ни соответствующих разделов теории динамических систем, ни мощных компьютеров с графическим интерфейсом, ни широкого взаимодействия специалистов различных специальностей из Горького, Москвы, Киева, Новосибирска, Саратова, Ярославля и других научных центров по изучению явления динамического хаоса, которое сформировали в СССР десятью годами позже. Не было даже термина «динамический (детерминированный) хаос». Поэтому первые модельные представления о характере явления, приводящего к генерации шумоподобных колебаний в электронных приборах, носили качественно описательный характер, вызывали напряженное отношение коллег к реальности и физической природе полученных шумоподобных колебаний и, конечно, не удовлетворяли самих авторов. Словом, ситуация была типичной для результатов, претендующих на серьезное открытие: а есть ли мальчик?

Но приборы работали, представления уточнялись, и к 1974 году В.Я. Кисловым с сотрудниками были созданы первые математические модели шумотрона на основе нелинейных разностных и дифференциально-разностных уравнений. Модели качественно верно объясняли природу наблюдаемых нерегулярных колебаний. В силу специфики работы лаборатории эти результаты в открытой печати были опубликованы несколько позже (*Кислов В.Я. и др.* [1979]; *Кислов В.Я.* [1980а, б]). А в 1980 за цикл работ по генераторам хаоса авторскому коллективу была присуждена Государственная премия СССР.

Итак, первые математические модели шумотрона помогли описать явление и понять его природу.

Следующий этап моделирования генераторов хаоса связан с исследованием электронных автоколебательных с малым числом степеней свободы. К ним относятся генератор на туннельном диоде (*Пиковский и Рабинович* [1978]; *Кияшко и др.* [1980]), генератор с инерционной нелинейностью (*Анищенко и др.* [1982]), кольцевые генераторы (*Дмитриев и Кислов В.Я.* [1984]), цепи Чуа (*Matsumoto* [1984]), системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (*Endo & Chua* [1988]; *Алексеев и др.* [1994]) и некоторые другие схемы.

В отличие от первого этапа работ в области хаотической динамики, на этом этапе детально изучались бифуркационные явления в моделях и свойства самого хаоса. В частности, в ИРЭ АН СССР были предложены и детально исследованы модели генераторов в виде кольцевых автоколебательных систем (*Дмитриев и Кислов В.Я.* [1984]; *Гуляев и др.* [1985]; *Дмитриев и Панас* [1986а]; *Дмитриев и Старков* [1986а]; *Dmitriev et al.* [1988]). Модели отражали как часть существенных черт шумотрона, так и помогали объяснить и понять бифуркационные явления в тран-

зисторных генераторах хаоса на микрополосковых элементах. Кроме того, на этих моделях была показана принципиальная возможность формирования спектра мощности хаотических колебаний, близкого к заданному спектру, в системах с малым числом степеней свободы путем введения фильтров в цепь обратной связи генератора (Бельский и др. [1992]; Dmitriev et al. [1996]). В дальнейшем эти результаты были использованы при создании СВЧ транзисторных генераторов с заданной полосой частот.

Использование транзисторов в генераторах хаоса требовало создания математических моделей генераторов с этими активными элементами. Прежде всего, это было нужно для понимания и исследования механизмов, приводящих к хаотизации колебаний, а затем уже можно было бы подумать и о синтезе генераторов хаоса с заданными характеристиками.

Простая математическая модель генератора хаоса с 1,5 степенями свободы и транзистором в качестве активного элемента была предложена в (Дмитриев и Иванов [1988]). Там же были описаны эксперименты по возбуждению хаотических колебаний в транзисторном генераторе с сосредоточенными элементами мегагерцового диапазона частот.

Следующий важный шаг в разработке моделей транзисторных генераторов хаоса был сделан в работе (Kennedy [1994]), где было показано, что классическая емкостная трехточечная схема генератора (рис. 1.5, а) при определенном выборе параметров может демонстрировать хаотическое поведение. Первые результаты относились к генерации хаоса в области низких частот, впоследствии с помощью моделирования в пакете PSpice была показана возможность получения хаотических колебаний в генераторе Колпитца и в радиодиапазоне (Wegener & Kennedy [1995]; Burykin & Panas [1997]). Эта система получила большую популярность, и впоследствии ряд групп занимались исследованием хаотической динамики в ге-

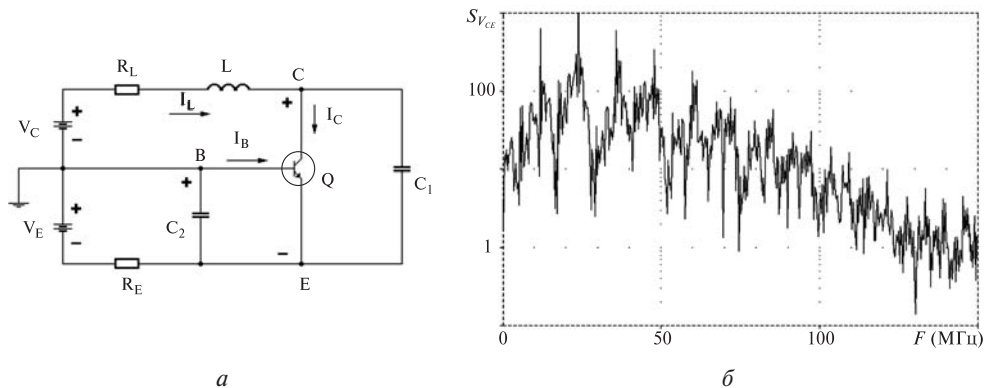


Рис. 1.5. Схема емкостной трехточки (генератора Колпитца) (а) и спектр мощности генерируемого в ней хаотического сигнала (б)

нераторе Колпитца и его модификациях (*Lindberg* [1997]; *Maggio et al.* [1999]; *Cenys et al.* [2003]; *Tamaševicius* [2004]; *Максимов* [2006]).

На рис. 1.5, б представлен типичный хаотический режим, наблюдаемый в генераторе Колпитца (*Burykin & Panas* [1997]).

Особенностью хаотического режима генератора Колпитца является широкополосность возбуждаемых в нем колебаний. В приведенном примере спектр мощности сигнала простирается как в область очень низких частот, так и в область высоких частот, во много раз превышающих основную частоту генерации (рис. 1.5, б). С точки зрения применения генератора в системах связи такие режимы малоперспективны, поскольку в этом случае необходимо получение хаотических колебаний в ограниченной, наперед заданной полосе частот.

Для того чтобы получить возможность реализации полосовых хаотических сигналов, в работе (*Максимов и Панас* [2000]) было предложено, как и в кольцевых системах, ввести в обратную связь генератора резонансный элемент (фильтр), обеспечивающий ей необходимые частотно-избирательные свойства и тем самым создающий условия для генерации колебаний преимущественно в полосе пропускания резонансного элемента. При этом ширина и неравномерность спектра мощности колебаний определяется соответствующими характеристиками резонансного элемента.

Данный подход был апробирован в численном эксперименте. В качестве активного осциллятора использовался генератор с емкостной трехточкой, а в качестве пассивного осциллятора — частотно-избирательная система, составленная из цепочки нескольких последовательно-параллельных *RLC*-звеньев, которые в совокупности формировали полосно-пропускающий фильтр (*Максимов и Панас* [2000]; *Panas et al.* [2000]).

До сих пор мы обсуждали применение математического и компьютерного моделирования для целей исследования динамики генераторов хаоса. Но, как уже отмечалось, «голубой мечтой» является полная или почти полная разработка генераторов хаоса радио- и СВЧ-диапазонов с помощью компьютерного моделирования. Что нового в моделировании требует эта задача?

Во-первых, нужно иметь конкретную электрическую схему создаваемого устройства, которую можно аккуратно описать с помощью эволюционных уравнений. Поэтому предпочтительно иметь дело со схемой на сосредоточенных параметрах. Схемы на сосредоточенных параметрах (без микрополосков) привлекательны также с точки зрения простоты реализации их в виде интегральных монолитных микросхем.

Во-вторых, реальные транзисторы, также как и пассивные элементы схем, на высоких частотах имеют значительно более сложную структуру, чем та, которую отражают их простейшие математические модели. Поэтому, если в простейшем случае модель транзистора — просто нелинейная функция, описывающая зави-

симось тока коллектора от напряжения база—эмиттер, то для адекватного описания поведения высокочастотного или СВЧ-генератора необходимо использовать модели, содержащие десятки дифференциальных уравнений и соответствующее число параметров. Для СВЧ-транзисторов имеется несколько типовых моделей, и производители, как правило, предоставляют параметры своих устройств для одной из них. То же самое относится и к пассивным элементам.

Но и этого недостаточно. Для моделирования нужно еще иметь специальные программные средства, которые позволяли бы собирать модели из этих кубиков. Кроме того, при проектировании необходимо учитывать реальные характеристики материала подложки, на которой реализуется схема. Только при выполнении совокупности этих условий можно рассчитывать на то, что разрабатываемое устройство будет вести себя так же, как построенная модель.

Программные средства, обеспечивающие такое адекватное моделирование, начали создаваться еще в 70-е годы. Одной из первых разработок был пакет Spice, созданный в Калифорнийском университете (Беркли). На его основе позднее был создан пакет второго поколения Electronic Work Bench, предназначенный первоначально для моделирования относительно низкочастотных устройств без учета влияния подложки. Следует отметить, что начиная с 70-х годов прошлого века возник, в первую очередь в США, новый сектор экономики, занимающийся разработкой систем автоматического проектирования электронных устройств (Electronic Design Automation — EDA). Объем продаж в этой отрасли в 2006 году составил 6 млрд долл. В отрасли многократно происходила смена компаний-лидеров. Сейчас основными производителями программного обеспечения являются такие компании как Mentor Graphics, Cadence Design Systems и Synopsys. Хорошие позиции на этом рынке имеет и компания HP со своим продуктом Advance Design Systems (ADS).

Благодаря усилиям этих компаний на рынке имеется несколько программных пакетов для разработки высокочастотных и СВЧ-устройств, хорошо зарекомендовавших себя при создании приборов, предназначенных для работы с регулярными сигналами.

Как правило, в таких пакетах имеется возможность работать как в частотной, так и во временной области. В процессе моделирования обычно основная часть исследования проводится в частотной области, а временная область используется для анализа переходных характеристик и учета нелинейных свойств. При моделировании во временной области широко применяются приближенные методы описания динамики систем.

В случае систем с хаосом можно использовать только моделирование во временной области без использования приближенных методов. Поэтому возможность адекватного анализа динамики генераторов хаоса с использованием имеющихся на рынке пакетов схемотехнического моделирования, предназначенных,

вообще говоря, для решения других задач, неочевидна и потребовала серьезных исследований. Успех этих исследований вместе с разработкой теории генерации микроволнового хаоса в системах с конечным числом степеней свободы позволил перейти от экспериментальной отработки генераторов хаоса к почти полностью компьютерной разработке с последующей экспериментальной проверкой и доводкой.

Генерация хаотических колебаний как научное направление к концу 80-х годов получила значительное развитие как в вакуумной, так и в полупроводниковой электронике. Вместе с тем, к этому времени назрела потребность в разработке генераторов хаоса, пригодных к массовому производству, с малыми габаритами и низким энергопотреблением, воспроизводимыми характеристиками, а также возможностью их последующей реализации в виде микрочипа. Для устройств с такими свойствами микрополосковая технология оказывается неприменимой.

Таковыми устройствами являются генераторы хаоса, выполненные на основе сосредоточенных элементов. Результаты исследований в этом направлении подробно рассматриваются в последующих главах книги.