



МИР

ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ

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

Генерация хаоса

Под общ. ред. д.ф.-м.н.
А.С. Дмитриева

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2012

УДК 621.37

ББК 32.85

Г29

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

Москва: Техносфера, 2012. – 424 с., 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 аperiodическими 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** 208

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..... 232

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 видеопульсами.....	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

Предисловие

Нашим учителям и соратникам посвящается...

Динамический хаос — фундаментальное явление, открытое в поведении нелинейных систем в последней трети двадцатого века, детально исследовалось в последующие годы учеными разных специальностей и к началу 90-х годов превратилось их усилиями в зрелую область знаний. Тогда, а на самом деле даже раньше, перед исследователями встал вопрос: как это явление может быть конструктивно использовано в промышленности, медицине, бизнесе и других направлениях человеческой деятельности.

Встал этот вопрос и перед авторами предлагаемой книги, работающими в области радиотехники, электроники и телекоммуникаций. К тому времени в Институте радиотехники и электроники АН СССР (впоследствии РАН) был накоплен значительный опыт разработки и применения источников хаотических колебаний радио- и СВЧ-диапазона. Это наталкивало на мысль использовать хаотические колебания в системах беспроводной связи и радиолокации. Имелись также теоретические представления о генерации хаотических колебаний в электронных системах с различным числом степеней свободы, в том числе с заданными спектральными характеристиками (*Дмитриев и Кислов [1989]*). Наконец, в это время мысль об использовании хаотических колебаний в средствах беспроводной связи витала в воздухе, и вскоре были опубликованы первые теоретические схемы по передаче информации с его помощью.

Наши исследования в этом направлении, результаты которых обобщены в книге (*Дмитриев и Панас [2002]*), привели к идее прямохаотической передачи информации (*Дмитриев и др. [2001], [2002]*).

Реализация этой идеи потребовала создания нового поколения источников хаотических колебаний — компактных, небольшой мощности, работающих в заданных диапазонах частот и реализуемых (в перспективе) в виде интегральных схем. Решение этой проблемы заняло несколько лет. В результате была создана теория генерации хаоса, разработаны методы расчета и моделирования генераторов хаотических колебаний, сконструирован и экспериментально исследован ряд источников хаоса в различных участках радио- и СВЧ-диапазона.

Этим исследованиям и разработкам посвящена предлагаемая книга.

Создание компактных твердотельных генераторов хаоса позволило спроектировать и реализовать малогабаритные сверхширокополосные прямохаотические приемопередатчики и начать использование этих коммуникационных средств в беспроводных системах связи и сенсорных сетях.

В 2007 году метод прямохаотической передачи информации (передача с помощью хаотических импульсов) был введен в стандарт сверхширокополосной беспроводной персональной связи IEEE 802.15.4a (Standard IEEE802.15.4a [2007]), и тем самым международное научно-техническое сообщество впервые признало динамический хаос в качестве нового эффективного носителя информации для беспроводных систем связи.

В 2012 году сверхширокополосные хаотические импульсы были введены в качестве носителя информации еще в один стандарт беспроводной персональной связи — беспроводные нателные сенсорные сети (Standard IEEE 802.15.6 — Wireless Body Area Networks — WBAN [2012]).

Так шаг за шагом осуществляется переход из области фундаментальных и прикладных исследований в практическую деятельность.

Во время проведения исследований и при подготовке самой книги нам повезло работать и взаимодействовать со многими отечественными и зарубежными исследователями. Практически всегда это общение было не только конструктивным, но и максимально дружеским. Особенно хотелось бы выделить плодотворные дискуссии и обсуждения с В.С. Анищенко, Б.П. Безручко, В.Н. Белых, А.В. Гапоновым-Греховым, Г.Т. Гурия, С.А. Кашенко, М.В. Краюшкиным, С.П. Кузнецовым, Д.С. Лукиным, В.Л. Майстренко, Ю.Л. Майстренко, Г.Г. Малинецким, В.И. Некоркиным, Н.В. Рувльковым, Ю.Г. Тратасом, Д.И. Трубецковым, В.И. Федоренко, М. Хаслером, Л.О. Чуа, Н.П. Чубинским, Д.В. Шалфеевым, А.Н. Шарковским, В. Шварцем, Л.П. Шильниковым.

Авторы высоко ценят внимание к тематике книги и постоянную поддержку исследований в области динамического хаоса со стороны руководства Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН: Ю.В. Гуляева, С.А. Никитова, В.А. Черепенина и И.И. Чусова.

Считаем своим приятным долгом выразить глубокую благодарность за сотрудничество своим коллегам и соавторам ряда результатов, представленных в книге: Ю.В. Андрееву, М.Ю. Герасимову, А.В. Клецову, Л.В. Кузьмину, Б.Е. Кяргинскому, В.А. Лазареву, А.М. Лактюшкину, Т.И. Мохсени, А.Ю. Никишову, Д.Ю. Пузикову, А.И. Рыжову, Н.В. Румянцеву, В.И. Синякину, С.О. Старкову, А.Д. Хилинскому.

Введение

Динамический (детерминированный) хаос, часто называемый просто хаосом, — непериодические колебания в нелинейных детерминированных системах, демонстрирующие высокую чувствительность к начальным условиям. Эти колебания имеют ряд общих черт со случайными процессами, в частности непредсказуемость на длительные периоды времени и сплошной спектр мощности, но их природа связана не со случайностью, а с нелинейными свойствами порождающих эти колебания динамических систем.

Открытие и исследование динамического хаоса явились настоящей научной революцией последней трети 20 века. Они привлекли пристальное внимание исследователей из разных областей знаний своей красотой, широкой распространенностью как в естественных, так и в искусственных системах, простотой математических моделей, с помощью которых их можно исследовать, универсальностью бифуркационных механизмов и путей возникновения хаоса из регулярной динамики. Изучение динамического хаоса и связанных с ним явлений потребовало, по существу, создания нового раздела математики — математики нелинейных динамических систем со сложным поведением.

Не менее важными явились и мировоззренческие следствия этого открытия. Еще в начальный период исследований в области детерминированной сложной динамики и хаоса Р. Мэй, обнаружив удивительное многообразие типов поведения логистического отображения, пришел к выводу: «...Вероятно, для всех нас было бы гораздо лучше, если бы не только при обучении или в научной работе, но и в повседневной, политической или экономической жизни как можно большее число людей поняло, что простые динамические системы не обязательно приводят к простому динамическому поведению...» (May [1976]). И значительное число людей уже осознало, что малые изменения условий в начальный момент могут приводить в результате через некоторое время не только к малым, но и к большим изменениям («эффект бабочки»), а это означает, что системы, в том числе социальные, политические и другие, обладая собственным сложным поведением, могут эффективно управляться с помощью малых воздействий. Термины «хаос», «теория хаоса», «управляемый хаос» и стоящее за ними содержание постепенно становятся элементом общей культуры и часто используются как метафора.

Кроме общенаучного и мировоззренческого интереса, динамический хаос представляет значительный интерес и обладает большими потенциальными возможностями в сфере прикладных исследований и разработок, прежде всего в радиопрофизике, электронике, системах передачи и защиты информации.

Усилиями многих коллективов у нас в стране и за рубежом был пройден гигантский путь от экспериментального открытия этого явления, его осознания, первого этапа исследований, через пришедшее понимание того, что динамический хаос — явление вселенское в прямом смысле этого слова: оно присутствует и наблюдается всюду в природе, в человеческом обществе — в искусственных объектах и системах, к целенаправленным исследованиям приборов и устройств, генерирующих хаос, изучению свойств этих процессов и поиску путей их применения.

Сегодня динамическому хаосу посвящены сотни книг и тысячи статей. В эти книги вошли основополагающие теоретические и экспериментальные результаты, описание исследований этого явления в разных областях науки, техники и технологий. Почетное место в этом списке занимают книги математиков, ибо именно математика является цементирующим раствором, позволившим идентифицировать, систематизировать и дать прочное методологическое обоснование для исследования хаоса во всех остальных областях знания.

Среди областей знаний, где наблюдаются и исследуются хаотические колебания, нелинейные электрические и электронные системы занимают особое место.

Во-первых, простые нелинейные устройства, состоящие из хорошо знакомых со школы резисторов, емкостей и индуктивностей, дополненных нелинейными элементами, оказались прекрасным экспериментальным полигоном для изучения бифуркационных явлений и хаоса.

Во-вторых, эти устройства являются моделями с достаточно хорошо контролируемыми параметрами, и для них можно добиться хорошего совпадения (не только качественного, но и количественного) между экспериментальными результатами и моделированием.

И, наконец, в-третьих, радиотехника, электроника, информационные и телекоммуникационные технологии в целом являются очень привлекательными областями применения хаоса (хаотических колебаний).

Однако для практического применения хаоса в указанных областях недостаточно просто фиксации явления и его исследования в тех или иных объектах. Нужно научиться создавать простые системы с контролируемыми параметрами, способные генерировать хаос в нужных для решения той или иной задачи диапазонах частот, и много чего другого.

Генерации хаоса в электронных устройствах посвящена предлагаемая книга.

За исключением первой обзорной главы, она содержит только оригинальные материалы, в разное время опубликованные авторами в ведущих советских, российских и зарубежных журналах.

Книга состоит из 19 глав, объединенных в 4 части.

Первая часть книги, состоящая из шести глав, посвящена построению теории генерации хаоса в радиофизических системах.

В первой главе дан краткий экскурс в историю исследований хаотических колебаний в электронике СВЧ, в основном в СССР, до начала девяностых годов (исследования в других странах, относящиеся к этому времени, авторам неизвестны).

В последующих главах в качестве модельных систем для построения теории вводятся и исследуются кольцевые автоколебательные системы, которые включают в себя системы с числом степеней свободы от одной до бесконечности, демонстрируют богатый арсенал бифуркационных явлений, переходов к хаосу и хаотических режимов и, что существенно, близки по своей структуре к классическим генераторам электромагнитных колебаний радио- и СВЧ-диапазонов.

Здесь рассматриваются общие принципы построения радиофизических систем со сложной динамикой и методов их исследований, вводятся кольцевые автоколебательные системы с полутора степенями свободы, имеющие в качестве единственного нелинейного элемента усилитель с падающим участком. Исследуется их хаотическая динамика. Анализируется влияние различных факторов на динамику этих систем, в том числе влияние асимметрии нелинейного элемента и вырождения в систему, близкую к системе с одной степенью свободы, изучается динамика простейших кольцевых автоколебательных систем при внешнем гармоническом воздействии. Главы 2, 3 представляют собой достаточно полную, экспериментально подтвержденную теорию кольцевых автоколебательных систем с полутора степенями свободы.

После этого центр тяжести исследований переносится на автоколебательные системы с произвольным числом степеней свободы (глава 4). При этом детально исследуются системы с 2,5 и 3,5 степенями свободы, прежде всего как системы, в которых возможны новые, по отношению к системам с полутора степенями свободы, механизмы перехода к хаосу и хаотические аттракторы повышенной размерности (гиперхаос).

Принципиальным вопросом для практического использования генераторов хаоса является вопрос о воспроизводимости этих устройств от образца к образцу и чувствительность хаотических режимов в этих устройствах к изменению внешних и внутренних параметров. Разобраться с этим вопросом можно только путем создания серии экспериментальных устройств и исследования варибельности их свойств для каждого из образцов. Естественно, при этом нужно сконструировать и реализовать генераторы хаоса с контролируемыми параметрами — «прецизионные генераторы хаоса», в которых, в частности, должны достаточно точно воспроизводиться нелинейные характеристики входящих в устройство компонентов. Для решения этой задачи был предложен и исследован вариант кольцевого генератора с кусочно-линейной характеристикой усилителя и установлены условия на точность значений компонентов, при которых достигается приемлемая точность воспроизведения характеристик генераторов. Было показано, как теорети-

чески, так и экспериментально, что это вполне реализуемая задача при использовании имеющихся на рынке электронных компонентов (глава 5).

Использование хаоса в радиосвязи и других прикладных задачах требует создания генераторов в нужном диапазоне частот с заранее определенной полосой, а иногда и с заданной формой спектра мощности внутри полосы и скоростью его спада вне ее. Таким образом, речь идет о синтезе хаотических колебаний с заданным спектром мощности. Эта задача рассматривается и решается в последней, шестой главе первой части книги. Здесь вводятся модифицированные кольцевые автоколебательные системы, содержащие частотно-избирательные элементы, и показывается их эффективная управляемость спектром колебаний уже в системах с 2,5 и 3,5 степенями свободы.

В целом, в первой части книги построена модельная теория возбуждения, развития и синтеза хаотических колебаний с заданными спектральными характеристиками в системах с различным числом степеней свободы. Она используется в последующих частях при создании структуры автоколебательных хаотических систем микроволнового диапазона, разработке математических и функциональных моделей генераторов хаоса, а также при интерпретации их поведения.

Вторая часть книги (главы 7—12) посвящена созданию твердотельных источников хаоса микроволнового диапазона на основе автоколебательных систем с сосредоточенными параметрами.

Прежде всего формулируется и обсуждается задача построения микроволновых источников хаоса. В теоретической части она в значительной степени опирается на результаты первой части книги, но вместе с тем имеет ряд принципиальных отличий:

- практические схемы генераторов микроволнового хаоса должны использовать в качестве активных элементов стандартные активные элементы электроники и микроэлектроники. Предпочтительнее всего биполярные и полевые транзисторы, но они не имеют падающего участка;

- в таких устройствах не всегда можно реализовать развязывающие элементы;

- на высоких частотах как активные, так и пассивные элементы имеют достаточно сложные эквивалентные модели, которые должны быть учтены при моделировании. Это, в частности, означает, что возможности математического моделирования с помощью прямого описания модели на основе законов Кирхгофа весьма ограничены и требуется переход к моделированию в специальных пакетах для разработки нелинейных электронных устройств.

Базовая структура автоколебательных систем состоит из единственного нелинейного элемента и цепочки последовательно соединенных RLC -цепей (контуров), между которыми отсутствуют буферные элементы. На примере емкостной трехточечной схемы показано, что в генераторах с такой структурой можно получить спектр мощности, близкий к АЧХ петли обратной связи. Далее вводится мо-

дель генератора хаоса с 2,5 степенями свободы. Этот генератор получен из исходной трехточечной схемы путем добавления в цепь обратной связи дополнительного RLC-звена, являющегося фильтром нижних частот второго порядка.

С увеличением числа степеней свободы, также как в модельных кольцевых автоколебательных системах в первой части книги, увеличивается многообразие форм АЧХ и, соответственно, спектров сигналов, реализуемых в системе. Так, становится возможным получение спектров мощности, близких к полосовым. При этом возрастает степень соответствия огибающей спектра форме АЧХ, а также увеличиваются размеры зон хаотических режимов в пространстве параметров.

Кроме того, повышение размерности системы приводит к обогащению динамики системы и возникновению новых сценариев перехода к хаосу.

Существенной характеристикой хаотических колебаний является степень изрезанности их спектра мощности в полосе частот генерации. Показано, что в рассмотренных случаях она может регулироваться путем подбора параметров системы, на основе анализа двухпараметрической диаграммы показателей Ляпунова.

На основании полученных результатов сформулированы принципы построения транзисторных генераторов хаоса с заданными спектральными характеристиками.

Использование для исследования радиотехнических схем математических моделей позволяет проанализировать основные особенности динамики системы. Однако при переходе от таких упрощенных математических моделей к реальным радиотехническим устройствам возникает ряд проблем, связанных с несоответствием параметров, при которых реализуются аналогичные режимы в реальном устройстве и его математической модели. Это несоответствие затрудняет реализацию систем со сложной динамикой в виде электронных устройств. Ведь в этом случае, помимо разработки и исследования упрощенной математической модели, которую можно провести на компьютере, и разработки электрической схемы устройства, необходимо провести экспериментальное исследование динамики и подстройку параметров системы для того, чтобы получить характеристики, удовлетворяющие требованиям конкретной задачи. Для того чтобы решить задачу перехода от математической модели генератора к радиотехническому устройству, допускающему промышленное производство без дополнительной настройки, необходимо создать методику компьютерной разработки генераторов хаоса.

Предложенная методика включает в себя следующие этапы.

Первый этап — это выбор структуры генератора, включая выбор типа транзистора (например биполярного), структуры, размерности и параметров пассивного четырехполюсника так, чтобы обеспечить требуемую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) петли обратной связи, а также, возможно, выбор конфигурации цепи отвода сигнала.

Далее — создание математической модели устройства, поиск хаотических режимов, получение требуемых спектральных характеристик, регулировка изрезанности спектра мощности.

Следующий этап — переход от математической модели к схемотехнической. Здесь важнейший пункт — это выбор транзистора, пригодного для использования в предполагаемом частотном диапазоне.

Затем разрабатывается схемотехническая модель, собранная из идеальных элементов, но с реальной моделью транзистора. Поскольку математические модели на основе кусочно-линейных или экспоненциальных характеристик транзистора являются низкочастотными, то целесообразно вначале создать низкочастотную схемотехническую модель, отладить ее, т. е. получить подходящий режим генерации, путем анализа бифуркационных диаграмм, после чего поднимать рабочую частоту системы, пересчитывая ее параметры и при необходимости внося коррекцию, чтобы получить нужный режим. При повышении частоты до требуемого диапазона проводится коррекция спектральных характеристик.

После этого идеальные элементы заменяются моделями реальных элементов и проводится настройка характеристик и компенсация паразитных эффектов, возникающих из-за неидеальности элементов схемы.

Далее необходимо учесть влияние топологии площадок платы и материала подложки. Для этого разрабатывается топология будущей платы, учитываются характеристики материала подложки, элементы, составляющие генератор, переносятся на этот проект платы и проводятся расчеты с учетом влияния платы. По результатам моделирования делается коррекция топологии платы или параметров генератора для достижения режима генерации хаоса с требуемыми спектральными характеристиками.

На конечном этапе изготавливается плата, создается макет генератора и проводится его экспериментальное исследование. Неизбежные расхождения характеристик могут быть скомпенсированы внесением соответствующих поправок в модель генератора.

Описано применение разработанной методики при создании генератора микроволнового хаоса с биполярным транзистором в качестве активного элемента и ряда других систем. Во всех системах имеет место хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

Разработанные в последующих главах теория, методики моделирования в специальных пакетах и методы экспериментальной отработки изготовленных устройств применяются к решению следующих задач, имеющих принципиальное значение в системах связи и локации, которые используют хаотические сигналы.

1. Формирование потока сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов с заданной частотой повторения и скважностью за счет внутренней модуляции хаотической автоколебательной системы (глава 9).

2. Создание генератора полосового микроволнового хаоса на основе автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы с единственным источником питания и его исследование (глава 10).

3. Разработка автоколебательной системы с полевым транзистором в качестве активного элемента (глава 11). Полевые транзисторы имеют некоторые преимущества перед биполярными. Прежде всего они являются типичными элементами, применяемыми в технологии, основанной на комплементарной структуре металл–оксид–полупроводник (КМОП). В настоящее время это наиболее активно развивающаяся твердотельная технология, а так же наиболее дешевая как с точки зрения разработки, так и массового производства устройств.

4. Создание источников хаоса микроволнового диапазона на основе автоколебательных систем с сосредоточенными параметрами в виде интегральных микросхем. Рассмотрена задача разработки источников хаоса микроволнового диапазона с биполярным транзистором в качестве активного элемента на основе кремний–германиевой технологии 0,25 мкм (глава 12).

В первых двух частях книги рассматриваются кольцевые автоколебательные системы с единственным активным элементом. Однако исторически первыми микроволновыми генераторами хаоса были шумотроны — системы с распределенными параметрами, выполненные на двух лампах бегущей волны, включенных в цепь обратной связи. Уже в начале 2000-х годов в результате экспериментальных исследований были созданы и твердотельные источники хаотических колебаний с распределенными элементами — фрагментами полосковых линий в цепи обратной связи. Переход к системам на сосредоточенных параметрах дает новое качество: во-первых, резко уменьшаются размеры системы и технологически становится осуществимой ее реализация в виде микросхемы и, во-вторых, становится возможным применение развитых для систем с сосредоточенными параметрами в предыдущих частях методов и подходов для моделирования и проектирования микросхем генераторов хаоса. Таким образом, исследование возможности создания хаотических кольцевых автоколебательных систем с несколькими активными твердотельными элементами и генераторов хаоса на их основе представляет несомненный интерес.

Третья часть книги посвящена генерации хаоса в кольцевых автоколебательных системах с несколькими активными элементами (главы 13—16).

Сначала в ней проведены теоретический анализ и моделирование экспериментальной хаотической автоколебательной системы с тремя активными элементами, в результате чего определены условия возбуждения в системе автоколебаний на разных частотах. После этого высказана идея, что условия возбуждения на нескольких частотах могут быть реализованы и в системе с сосредоточенными параметрами за счет запаздываний, вносимых активными элементами и пассивными цепями на сосредоточенных параметрах. Предложена структура автоколе-

бательной системы, удовлетворяющая условиям возбуждения двух и более частот, и проведено ее математическое и схемотехническое моделирование, которое показало возможность генерации хаотических микроволновых колебаний с требуемыми параметрами. Разработан и исследован макет генератора, генерирующий хаос с характеристиками близкими, к расчетным.

Полученные результаты позволили перейти к созданию микросхем — генераторов хаоса с несколькими активными элементами на основе КМОП-технологии. Рассмотрены основные этапы разработки, изготовления и исследования таких устройств.

В последней главе третьей части рассматривается и исследуется задача формирования хаотических импульсов микроволнового диапазона в системе на КМОП-структуре.

Полученные во второй и в третьей частях книги результаты позволяют проектировать и создавать генераторы микроволнового хаоса. В основном в этих главах шла речь о генераторах с выходной мощностью от долей милливатта до десятков милливатт. Такой уровень выходной мощности определяется требованиями со стороны приложений, например, для беспроводных коммуникаций. Однако в других потенциально интересных случаях требуется генерировать хаотические колебания с мощностью от десятков до нескольких сотен милливатт.

Вопросы генерации микроволнового хаоса таких мощностей рассматриваются в четвертой части книги (главы 17—19).

Здесь описывается экспериментально созданный генератор хаоса в микроволновом исполнении. Он имеет мощность ~ 200 мВт и коэффициент полезного действия (КПД) около 25 %. К сожалению, его нельзя непосредственно использовать в качестве основы для разработки других генераторов хаоса. Это связано с двумя обстоятельствами. Первое — рассматриваемый генератор является генератором с распределенными элементами (микрополосками), второе — у производителя отсутствует детальная схемотехническая модель используемого в этом устройстве активного элемента. Однако сама эквивалентная феноменологическая схема системы представляет интерес прежде всего с точки зрения полученного в ней высокого КПД. Поэтому в ходе исследований анализируется эта феноменологическая модель автоколебательной системы, затем выбирается транзистор повышенной мощности, работающий в нужном диапазоне частот и имеющий схемотехническую модель от производителя.

Полученная модель с активным элементом повышенной мощности изучается и оптимизируется при моделировании с использованием специализированных пакетов. В результате показывается, что в генераторах с сосредоточенными параметрами и использованием транзисторов повышенной мощности можно получать хаос с мощностью до несколько сотен милливатт при КПД ~ 20 —25 %, что в 5—10 раз превышает расчетный КПД в маломощных генераторах ($< \sim 1$ мВт).

В заключении суммируются изложенные результаты и делаются выводы.

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 возникала 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 возникала 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 милливольт 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.

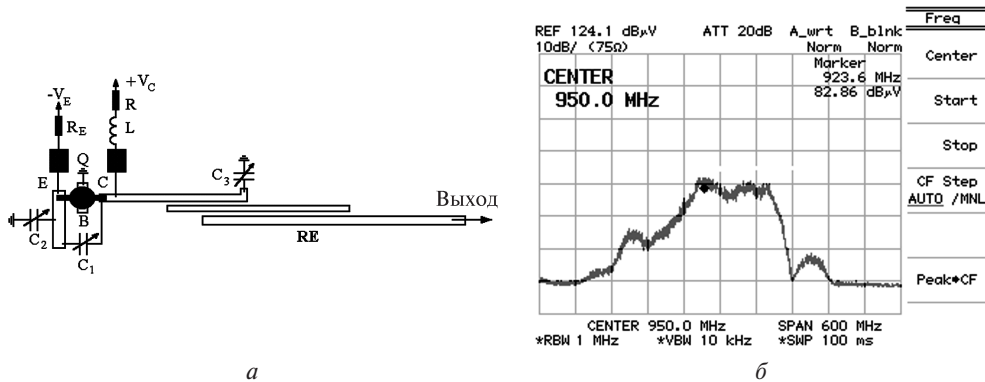


Рис. 1.1. Эскиз топологии генератора (а) и его спектр мощности (б) в диапазоне 880—1030 МГц

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-

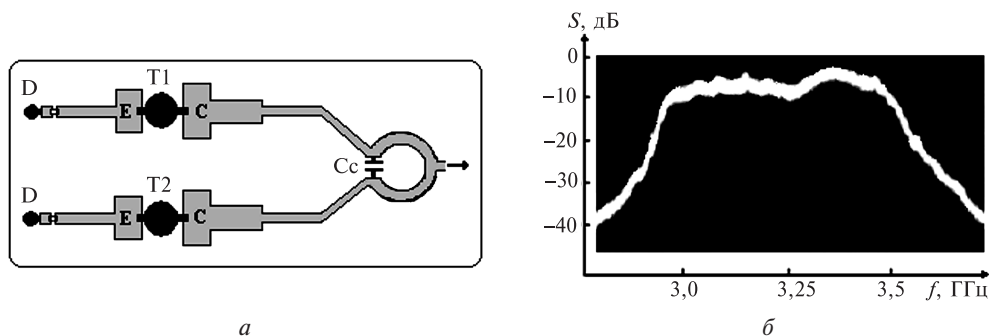


Рис. 1.2. Эскиз топологии широкополосного генератора, структурно состоящего из идентичных связанных генераторов (а), спектр мощности генератора в диапазоне 3–3,5 ГГц (б)

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-

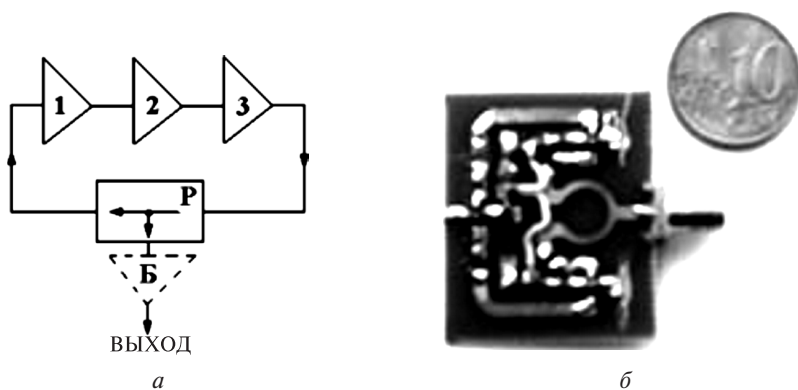


Рис. 1.3. а) Структура генератора хаоса. 1, 2, 3 — ЧИП-усилители; P — разветвитель; Б — буферный ЧИП-усилитель; б) экспериментальный макет генератора.

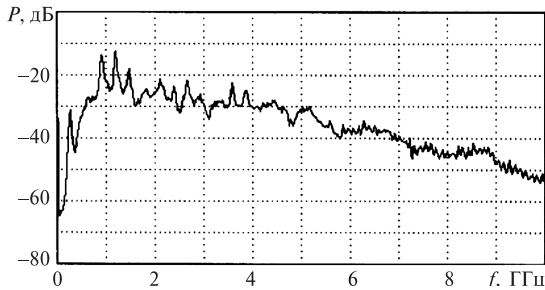


Рис. 1.4. Спектр мощности сигнала для одного из типовых режимов источника хаоса

крошечный 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 настороженное 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-

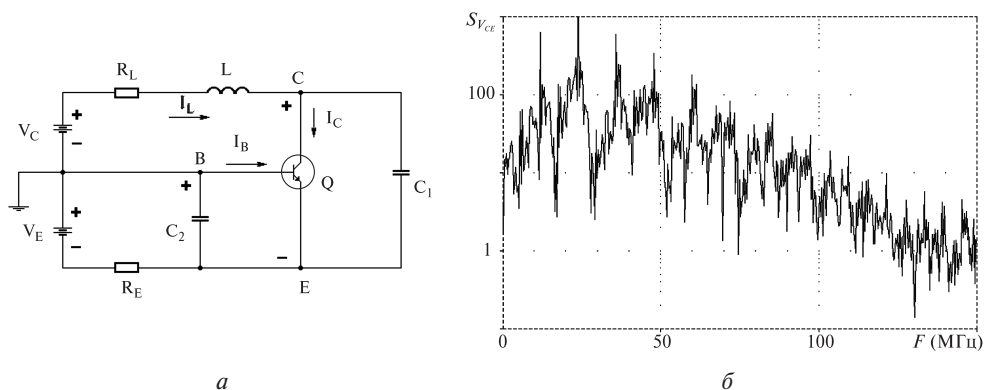


Рис. 1.5. Схема емкостной трехточки (генератора Колпитца) (а) и спектр мощности генерируемого в ней хаотического сигнала (б)

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 неприемлимой.

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

ГЛАВА 2

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С СОБСТВЕННОЙ СЛОЖНОЙ ДИНАМИКОЙ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Введение

Математические модели радиофизических и электронных систем с хаотическим поведением описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, системами таких уравнений, дифференциально-разностными уравнениями, уравнениями в частных производных и т. д. Уже это разнообразие математических моделей, описывающих явление динамического хаоса в радиофизических системах, говорит о том, что для понимания общих закономерностей динамики таких систем целесообразно попытаться перейти от конкретных уравнений к некоторой другой форме моделей, которая при ее математической трактовке породила бы конкретные уравнения.

Такая постановка задачи представляет интерес не только с теоретической точки зрения, но и с практической. Рассмотрим проблемы, возникающие при разработке моделей генераторов хаотических колебаний радио- и СВЧ-диапазонов.

Большинство практических схем таких генераторов имеет относительно простую структуру. Вместе с тем при попытках создания математических моделей генераторов с целью изучения закономерностей их динамики приходится сталкиваться со следующими трудностями:

- построение адекватной математической модели на основе законов Кирхгофа даже при наличии радиотехнической схемы оказывается весьма сложной задачей;
- в зависимости от выбранных переменных получаются и изучаются разные системы уравнений, т. е. разные математические модели, соответствующие одной и той же радиофизической системе;
- возникают трудности с адекватным представлением характеристик нелинейных элементов, поэтому при различиях в поведении исходной системы

и ее модели остается открытым вопрос о причинах несоответствия (они могут быть связаны как с неадекватным описанием нелинейных элементов, так и с неточным выбором структуры уравнений модели);

- неясно, насколько результаты исследования конкретных систем отражают общие закономерности динамики генераторов хаотических колебаний.

Актуальность проблемы поиска и исследования общих закономерностей сложной динамики радиофизических систем приводит к необходимости поиска альтернативных по отношению к прямому написанию уравнений путей моделирования радиофизических систем. В качестве такого альтернативного подхода рассмотрим подход, связанный с моделированием системы через совокупность стандартных элементов, соответствующим образом связанных между собой. В дальнейшем будем называть такие модели структурными.

Имеется ряд предпосылок для успешного построения, анализа и использования структурных моделей в интересах исследования общих закономерностей поведения систем со сложной динамикой.

1. Наличие методов операторного описания систем из стандартных звеньев с сосредоточенными параметрами (*Фельдбаум и Бутковский* [1971]): интегрирующих, усилительных, дифференцирующих, аperiodических, колебательных. Имеется возможность описания в рамках такого подхода звеньев распределенными параметрами (*Бутковский* [1977]) и нелинейных безынерционных преобразований.
2. Прямое соответствие между стандартными звеньями и типовыми элементами радиофизических систем: усилителями, RC - и RLC -цепочками, фильтрами и т. д. При наличии структурной схемы это дает возможность перейти к ее реализации в радиофизическом эксперименте.
3. Универсальность языка моделей, состоящих из стандартных звеньев, и применимость его не только при исследовании радиофизических систем, но и в механике, теории управления, биологии и т. д.

Таким образом, подход к моделированию радиофизических систем, основанный на применении типовых элементов, потенциально обладает большими возможностями. Вместе с тем нужно отчетливо сознавать, что далеко не все реальные системы можно представить в виде простой, состоящей из типовых взаимодействующих элементов схемы. В некотором смысле простота структурной модели определяет простоту и математической модели.

Хотя требование структурного представления и накладывает ограничения на возможные модели радиофизических систем, множество таких моделей остается все еще слишком широким для конструктивного исследования общих закономерностей поведения систем со сложной собственной динамикой. К тому же не объединенные общей идеологией, эти модели по-прежнему остаются слишком частными, чтобы на основании их свойств можно было говорить об общности за-

кономерностей, приводящей к хаотической динамике и характеризующей ее развитие.

Для выяснения этих закономерностей необходимо выявить роль различных факторов, определяющих поведение систем. Поэтому желательно изучать не отдельные системы, а классы систем, в рамках которых можно исследовать роль различных структурных элементов (числа степеней свободы, числа и характера положений равновесия, фильтрующих свойств, различных нелинейностей и т. д.) в формировании странных аттракторов и свойств этих аттракторов.

Применительно к радиофизическим и электронным системам класс (классы) моделей должен удовлетворять следующим требованиям:

- содержать системы с произвольным числом степеней свободы и произвольным числом положений равновесия при фиксированном числе степеней свободы;
- обладать достаточно широким набором явлений сложной динамики;
- иметь возможно более простую структуру;
- допускать наряду с численным и теоретическим экспериментальное исследование;
- иметь отношение к практически используемым схемам;
- допускать ясную физическую трактовку элементов, составляющих систему, и процессов, протекающих в них.

2.2. Кольцевые радиофизические системы

Рассмотрим совокупность систем, состоящих из замкнутых в кольцо, последовательно включенных активных и пассивных элементов. Под активными элементами будем понимать линейные и нелинейные усилители и безынерционные элементы, производящие нелинейное преобразование сигнала. В кольце одновременно могут быть задействованы один или несколько активных элементов. В него включаются также пассивные элементы: дифференцирующие, интегрирующие, колебательные и апериодические звенья, которые могут быть как линейными, так и нелинейными. Кроме элементов с сосредоточенными параметрами, в кольце могут присутствовать элементы с распределенными параметрами, простейшим из которых является задержка. Предполагается, что сигнал в кольце распространяется только в одну сторону.

Таким образом, описанная совокупность выделяется из общего множества структурных моделей двумя признаками: наличием единственной петли обратной связи и односторонним распространением сигнала в кольце.

С целью сделать задачу более конструктивной и обозримой в главах 2—5 рассматриваются системы только с единственным активным нелинейным элементом, а список применяемых пассивных элементов ограничивается апериодиче-

ским звеном, колебательным звеном, дифференцирующим звеном и задержкой. В радиофизической трактовке апериодические звенья играют в кольцевых системах роль фильтров нижних частот первого порядка, колебательные звенья — фильтров нижних частот второго порядка.

В главах 3, 4 будет показано, что в качестве класса автоколебательных систем (АКС), обладающих достаточно широким набором явлений сложной динамики, может рассматриваться совокупность кольцевых автоколебательных систем, состоящих из замкнутых в кольцо нелинейного усилителя, N апериодических звеньев и K колебательных звеньев. Система дифференциальных уравнений, описывающая такие АКС, имеет вид

$$\begin{aligned} T_1 \dot{X}_1 + X_1 &= F(Y_K), \\ T_2 \dot{X}_2 + X_2 &= X_1, \dots, T_N \dot{X}_N + X_N = X_{N-1}, \\ \ddot{Y}_1 + \alpha_1 \dot{Y}_1 + \omega_1^2 Y_1 &= \omega_1^2 X_N, \dots, \ddot{Y}_K + \alpha_K \dot{Y}_K + \omega_K^2 Y_K = \omega_K^2 Y_{K-1}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где T_i — постоянные времени апериодических звеньев, α_i и ω_i — коэффициенты диссипации и резонансные частоты колебательных звеньев, $F(Y)$ — характеристика нелинейного элемента.

Совокупность систем (2.1) будем рассматривать в дальнейшем как базовую, включающую единственный нелинейный элемент, а в качестве линейных элементов — только апериодические звенья (RC -фильтры нижних частот первого порядка) и колебательные звенья (RLC -фильтры нижних частот второго порядка). Модели (2.1) обеспечивают возможность достаточно эффективного изучения общих закономерностей динамики радиофизических систем в смысле требований, выдвинутых выше.

Действительно, класс систем, описываемый уравнениями (2.1), содержит системы с произвольным числом степеней свободы, имеет очень простую структуру (в частности поиск точек равновесия системы сводится просто к решению нелинейного уравнения $X = F(X)$), допускает наряду с численным и теоретическим экспериментальное исследование при реализации апериодического и колебательного звеньев в виде фильтров нижних частот первого и второго порядков, а нелинейного усилителя в виде последовательно соединенных нелинейного элемента (например на основе $p - n - p - n$ -структуры, глава 4) и линейного усилителя. Многие практические схемы генераторов хаотических колебаний по своей структуре близки к кольцевым схемам.

Остановимся несколько подробнее на трактовке физических процессов, протекающих в системе.

Одной из особенностей рассматриваемой базовой совокупности систем (2.1) является возможность ее представления в виде последовательно соединенных и замкнутых в кольцо нелинейного безынерционного элемента и линейного филь-

тра нижних частот. В таком представлении кольцевая автоколебательная система представляет собой модель типичного генератора, состоящего из усилителя и внешней цепи обратной связи. Правда, обычно при исследовании таких генераторов рассматривается случай резонансного усилителя (Андреев В.С. [1982]; Харкевич [1956]).

Рассмотрим амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) фильтра нижних частот первого порядка и фильтра нижних частот второго порядка, входящих в цепь обратной связи кольцевой системы (рис. 2.1, а, б). Оба этих фильтра характеризуются наличием фазового запаздывания выходного сигнала относительно входного. На высоких частотах для RC -фильтра это запаздывание достигает 90° , а для RLC -фильтра — 180° (рис. 2.1, б). Используя метод D -разбиения по комплексному параметру, можно показать, что для возбуждения автоколебаний в кольцевой системе с RC - и RLC -фильтрами должны выполняться условия баланса фаз для фазового запаздывания в усилителе $\varphi_y(\omega)$ и в цепи обратной связи $\varphi_{o.c.}(\omega)$

$$\varphi_y(\omega) + \varphi_{o.c.}(\omega) = 2\pi n, n = 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

и условие для коэффициента передачи усилителя $K_y(\omega)$ и цепи обратной связи $K_{o.c.}(\omega)$

$$K_y(\omega)K_{o.c.}(\omega) > 1. \quad (2.3)$$

Частота возбуждения колебаний ω определяется из соотношения (2.2). Из (2.2) следует, что для возбуждения автоколебаний в системе, содержащей только RC -фильтры, требуется, чтобы их было не меньше трех при условии, что усилитель вносит сдвиг фаз, равный 180° . Если же усилитель вносит фазовый сдвиг, равный нулю, то для возбуждения автоколебаний требуется наличие не менее пяти RC -фильтров.

Проанализируем частотные характеристики двух комбинаций из RC - и RLC -фильтров: 1) RC -фильтр плюс RLC -фильтр; 2) RC -фильтр плюс два RLC -фильтра. АЧХ и ФЧХ этих линейных систем приведены на рис. 2.1, в, г. Из рисунка следует, что возбуждение автоколебаний при замыкании обратной связи первой системы возможно, если входящий в нее усилитель вносит фазовый сдвиг, равный 180° . Во второй системе с двумя RLC -фильтрами возможно возбуждение автоколебаний как при наличии усилителя, сдвигающего фазу сигнала на 180° , так и в случае усилителя, обеспечивающего нулевой сдвиг фаз.

Из аналогичных рассуждений следует, что фазовые соотношения (2.2) допускают возбуждение колебаний на двух частотах в системе с тремя RLC -фильтрами и усилителем, инвертирующим фазу на 180° , или в системе с четырьмя RLC -фильтрами и усилителем, не сдвигающим фазу. Наконец, для дальнейшего рассмотрения представляет интерес ситуация с возможностью возбуждения колебаний на

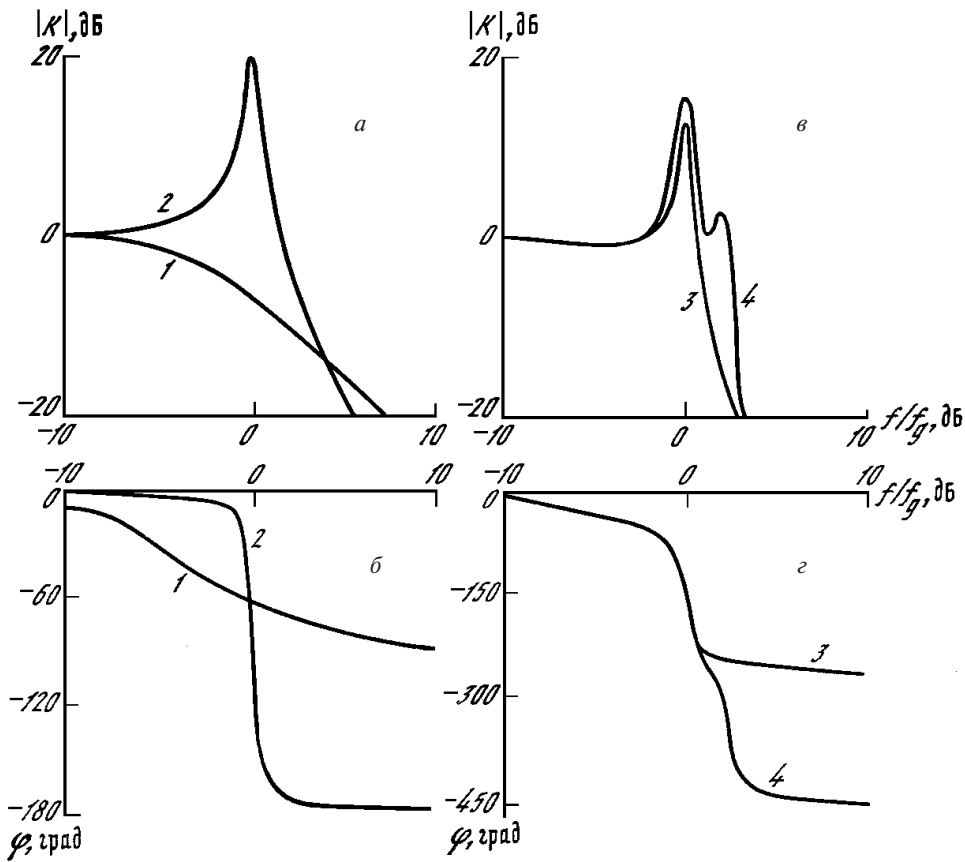


Рис. 2.1. Амплитудные (а, в) и фазовые (б, г) характеристики фильтров нижних частот и их комбинаций:
 1 — RC-фильтра; 2 — RLC-фильтра с добротностью $Q = 10$; 3 — RC-фильтра и RLC-фильтра; 4 — RC-фильтра и двух RLC-фильтров

двух различных частотах уже в системе с 2,5 степенями свободы (двумя RLC-фильтрами), но в которой характеристика усилителя имеет как восходящий, так и падающий участки.

Рассмотренные случаи связаны со сдвигом фаз в усилителе на 0° и 180° и приводят к наиболее простым математическим моделям. Однако в общем случае сдвиг фаз в усилителе может быть произвольным и, кроме того, зависящим от частоты.

Помимо баланса фаз, возможность возбуждения колебаний на той или иной частоте определяется также соотношением (2.3) для коэффициента передачи по цепи обратной связи, величина которого при прочих равных условиях оказывается решающей для возбуждения того или иного автоколебательного режима.

Таким образом, в рамках кольцевых систем (2.1) можно трактовать и устанавливать ряд закономерностей развития динамики на основе анализа традиционных в радиофизике понятий, связанных с частотными характеристиками. Кроме того, соотношение резонансных частот в RLC -фильтрах и частот среза RC -фильтра дает возможность предсказывать некоторые предельные случаи поведения системы без детального исследования каждой конкретной ситуации.

Наряду с исследованием кольцевых систем, описываемых маломерными системами обыкновенных дифференциальных уравнений, представляет интерес изучение и другого предельного случая — поведения кольцевых систем с очень большим числом степеней свободы. Каковы уравнения, описывающие динамику таких моделей?

Пусть в кольцевую автоколебательную систему входит N одинаковых линейных элементов. Представим линейный элемент, входящий в состав системы, в виде четырехполюсника (рис. 2.2, а).

В общем случае линейный четырехполюсник описывается двумя уравнениями:

$$I_1 = G_{11}U_1 + G_{12}U_2, \quad I_2 = G_{21}U_1 + G_{22}U_2, \quad (2.4)$$

которые связывают между собой четыре переменные величины — ток и напряжение на входе четырехполюсника с током и напряжением на его выходе. Типичными четырехполюсниками являются RC -, LC - и RLC -звенья (рис. 2.2, б–г).

Рассмотрим цепочку, состоящую из RC -звеньев. Разобьем ее на T -образные элементы (рис. 2.3). Применяя к каждому из T -образных элементов законы Кирхгофа для комплексных амплитуд тока и напряжения, приходим к уравнениям

$$U_n + U_n^0 = RI_n / 2, \quad U_n^0 - U_{n+1} = RI_{n+1} / 2, \quad CPU_{n+1}^0 = I_n - I_{n+1}, \quad (2.5)$$

где C — емкость, P — оператор дифференцирования.

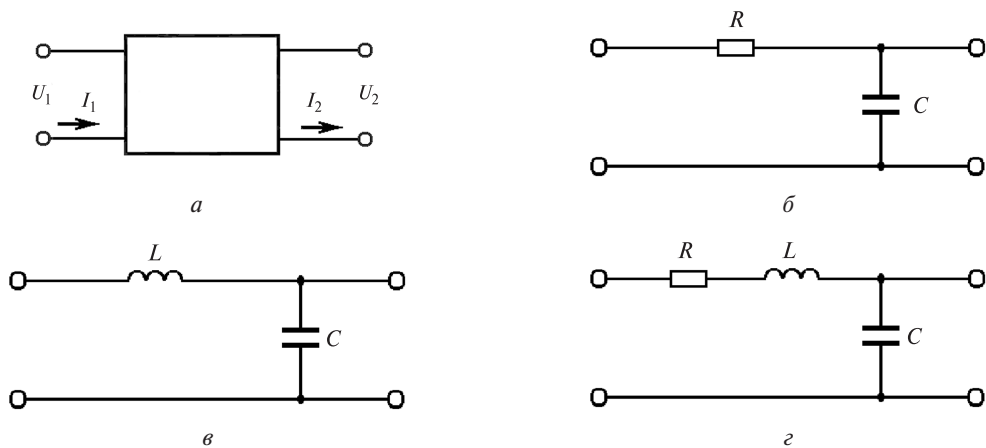
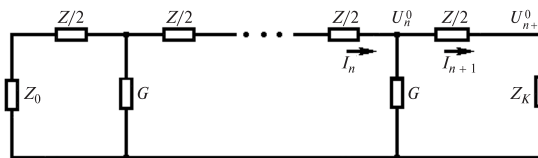


Рис. 2.2. Четырехполюсники:

а) общая схема; б) RC -звено; в) LC -звено; г) RLC -звено

Рис. 2.3. T-образный элемент цепочки четырехполюсников



Непосредственно из (2.5) получаем

$$U_{n+2} - 2U_{n+1} + U_n = RC\dot{U}_n, \quad (2.6)$$

откуда при условии малости сдвига фаз в каждом отдельном четырехполюснике на данной частоте по сравнению с 2π и предельном переходе при $N \rightarrow \infty$ получаем уравнение

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = RC \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (2.7)$$

Уравнение в частных производных (2.7) есть не что иное, как уравнение диффузии.

Аналогично в предельном случае для цепочки из LC -звеньев приходим к волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (2.8)$$

а в случае цепочки из RLC -звеньев — к уравнению

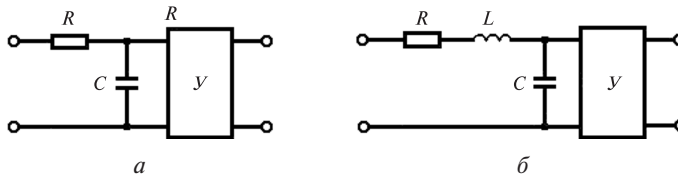
$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = RC \frac{\partial U}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}. \quad (2.9)$$

Таким образом, в пределе $N \rightarrow \infty$ цепочка RC -звеньев эквивалентна уравнению диффузии, а цепочка, состоящая из RLC -звеньев, — волновому уравнению для среды с потерями.

В кольцевых системах, описываемых уравнениями (2.1), в качестве базовых линейных элементов используются не RC - и RLC -звенья, а RC - и RLC -фильтры с единичными коэффициентами передачи. Эти элементы, в отличие от RC - и RLC -звеньев, невзаимны, и соответствующие им четырехполюсники можно представить в виде, изображенном на рис. 2.4. На этом рисунке Y — усилитель, играющий роль развязывающего элемента. Для случая RC -фильтра (рис. 2.4, а) из соотношения

$$RC\dot{U}_{n+1} + U_{n+1} = U_n \quad \text{или} \quad U_n - U_{n+1} = RCP U_{n+1}, \quad (2.10)$$

где P — оператор дифференцирования, следует, что выход RC -звена нагружен на высокоомный импеданс. Поэтому токи в конденсаторе и в резисторе практически равны друг другу. Выход усилителя также высокоомный (это источник напряжения).

Рис. 2.4. RC -фильтр (а) и RLC -фильтр (б) как четырехполюсники

Из (2.10) имеем в пределе $N \rightarrow \infty$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + RC \frac{\partial U}{\partial t} = 0. \quad (2.11)$$

Решение уравнения (2.10) — волна, движущаяся слева направо:

$$U = U(X - t/RC).$$

В случае RLC -фильтра (рис. 2.4, б) в результате аналогичных выкладок приходим к параболическому уравнению в частных производных

$$\frac{\partial U}{\partial X} + RC \frac{\partial U}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0. \quad (2.12)$$

Интересно отметить, что элемент системы, описываемый уравнением (2.11), также как длинная линия, может быть использован в качестве задержки для кольцевой автоколебательной системы. При этом в отличие от длинной линии, описываемой волновым уравнением второго порядка, в цепочке из RC -фильтров при любых значениях параметров элемента, стоящего на выходе цепочки, отсутствует отраженная волна.

2.3. Теоретические предпосылки исследования сложной динамики физических систем

Рассмотрим детерминированную модель радиофизической системы, описываемую для определенности нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями

$$\dot{X} = f(X, \mu), \quad (2.13)$$

где X — вектор размерности n , $f(\cdot)$ — вектор-функция размерности n , μ — вектор параметров размерности p . Пусть при $\mu = 0$ (2.13) имеет по меньшей мере одно устойчивое положение равновесия X_0 и находится в нем в начальный момент времени. При изменении параметров системы положение равновесия может потерять устойчивость, и система перейдет в новый режим. Этим режимом может быть новое устойчивое положение равновесия или другой аттрактор, на который система попадает в случае жесткой потери устойчивости. В общем случае при жесткой поте-

ре устойчивости фазовая траектория системы уходит в удаленную от первоначального положения равновесия область фазового пространства, и ее дальнейшее поведение не связано со строением окрестности потерявшего устойчивость положения равновесия. Другой тип потери устойчивости — мягкая потеря устойчивости, при которой возникающее новое решение лежит в окрестности бывшей устойчивой неподвижной точки. Наиболее интересным с точки зрения рассматриваемых в данной работе вопросов здесь является возникновение нового типа решений — автоколебаний. Мягкому рождению автоколебаний соответствует выход системы на «безопасную» границу устойчивости (Баутин и Шильников [1980]; Баутин [1984]).

С дальнейшим изменением μ автоколебания также могут потерять устойчивость. Классификация типичных случаев потери устойчивости автоколебаний приведена в (Арнольд [1978]; Арнольд [1979]). В частности, при последовательном усложнении характера динамических режимов типичными являются три случая: 1) одно из собственных значений линеаризованного в окрестности неподвижной точки отображения Пуанкаре выходит из единичного круга в точке $+1$; 2) одно из собственных значений линеаризованного в окрестности неподвижной точки отображения Пуанкаре выходит из единичного круга в точке -1 ; 3) пара комплексно-сопряженных собственных значений выходит из единичного круга. Первый случай соответствует жесткой потере устойчивости автоколебаний. Во втором случае при выходе через «безопасную» границу происходит мягкое рождение цикла удвоенного периода, и наконец, в третьем в спектре колебаний возникает вторая частота, а в фазовом пространстве рождается двумерный тор.

Перечисленные режимы в основном исчерпывают регулярные типы колебаний в нелинейных системах. Спектры этих колебаний могут быть как простыми, например в момент рождения предельного цикла из потерявшего устойчивость фокуса, так и достаточно сложными, содержащими гармоники основных частот, комбинационные составляющие, субгармоники и т. д. Общим свойством спектров регулярных колебаний является их линейчатый характер.

Другим важным классом режимов в нелинейных системах являются хаотические колебания, которые в отличие от регулярных колебаний обладают многими свойствами случайных процессов: сплошным спектром мощности, затухающей автокорреляционной функцией, предсказуемостью поведения траектории лишь на ограниченные интервалы времени. Математическим образом таких колебаний в фазовом пространстве является хаотический (странный) аттрактор. Общим свойством хаотических аттракторов является экспоненциальное в среднем разбегание на них первоначально близких траекторий, порождаемое экспоненциальной в среднем неустойчивостью траекторий.

Ниже свойство экспоненциального разбегания траекторий будет использоваться в качестве операционного определения странного аттрактора. Хотя такое определение в ряде случаев сильно огрубляет картину, оно весьма удобно для

идентификации типа колебательного режима. Непосредственный способ выяснения принадлежности данного режима к хаотическому или регулярному заключается в вычислении максимального ляпуновского показателя, величина которого и характеризует тип колебаний.

Для определения тонкой структуры многочастотных и хаотических колебаний и анализа механизмов перехода между различными колебательными режимами недостаточно изучения какой-то одной характеристики колебаний. Решение этой задачи требует привлечения совокупности различных характеристик, таких как реализации колебательного процесса, фазовые портреты, спектральная плотность мощности, размерность аттрактора, спектр ляпуновских характеристических показателей, отображение Пуанкаре, бифуркационные диаграммы и т. д.

Строгие результаты, относящиеся к этому вопросу, имеются для гиперболических аттракторов (*Синай* [1979]; *Синай* [1981]) и утверждают, что динамическая стохастичность, вызванная гиперболичностью, «сильнее» стохастичности, вызванной малыми случайными добавками. Точнее, при малом случайном возмущении динамической системы со свойствами гиперболичности ее свойства меняются мало.

Рассмотрим основные характеристики, используемые при исследовании систем со сложной динамикой, и возможности их получения в численном и физическом экспериментах.

2.4. Методы компьютерного моделирования

Реализация колебательного процесса — простейшая, но достаточно информативная характеристика. Для большинства систем, обладающих сложной динамикой (за исключением «жестких» систем) выбор конкретного численного метода интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений не является принципиальным. Мы в основном используем один из самых распространенных методов численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений — метод Рунге—Кутты четвертого порядка.

Фазовые портреты и их проекции дают наглядное представление о потоке траекторий системы в фазовом пространстве и позволяют идентифицировать такие важные явления, как рождение предельного цикла, удвоение периода предельного цикла, появление и характер двумерных торов.

Спектр мощности процесса — одна из основных и универсальных характеристик многочастотных и стохастических колебаний в радиофизических системах. Она определяет распределение дисперсии (среднеквадратичного значения) временной реализации по частотам. Для получения оценки плотности спектра мощности (ПСМ) используется быстрое преобразование Фурье (БПФ) с последующим усреднением по ансамблю спектрограмм.