

Синергетика

От прошлого
к будущему

№ 51



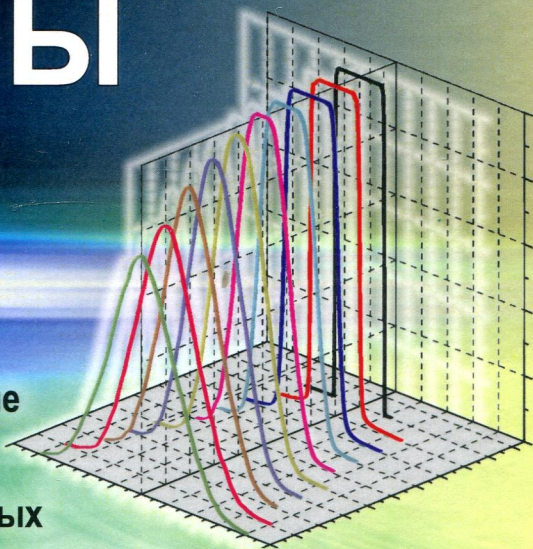
Серия основана
в 2002 г.

Председатель редколлегии
профессор
Г. Г. Малинецкий

П. С. ЛАНДА

НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

- **Динамические модели**
- **Собственные и вынужденные колебания и волны**
- **Колебания и волны в активных системах. Автоколебания и автоволны**
- **Автоколебания в жидкостях и газах и переходы к турбулентности**



URSS

П. С. Ланда

НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Издание стереотипное



URSS

МОСКВА

ББК 22.336 22.318

Ланда Полина Соломоновна

Нелинейные колебания и волны. Изд. стереотип.

М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. — 552 с.

(Синергетика: от прошлого к будущему. № 51.)

В настоящей книге представлено современное состояние теории нелинейных колебаний и волн. С единой точки зрения рассматриваются колебательные и волновые процессы, как периодические, так и хаотические, в системах самой различной физической природы. Показано, что такие популярные и быстро развивающиеся в последние годы науки, как нелинейная динамика, теория солитонов и синергетика, которые часто изучаются независимо друг от друга, фактически являются составными частями теории колебаний и волн. На ряде примеров демонстрируется, что эта теория отражает наиболее общие законы природы, справедливые для систем, являющихся объектами изучения различных наук: физики, химии, биологии и т. д. Единство колебательных законов позволяет строить простые модели сложных систем, которые, в свою очередь, позволяют прояснить общие свойства изучаемых систем и предсказать их поведение в конкретных условиях. Кроме классических колебательных и волновых явлений в книге рассматриваются нетрадиционные проблемы шумоиндуцированных колебаний и турбулентности.

Книга предназначена для специалистов в области теории нелинейных колебаний и волн, научных работников и инженеров, чья деятельность связана с исследованием колебательных и волновых процессов; а также аспирантов и студентов старших курсов для углубленного изучения общих законов теории колебаний и волн и их приложений к конкретным системам.

Издательство «Книжный дом «ЛИБРОКОМ»». 117335, Москва, Нахимовский пр-т, 56.
Формат 60×90/16. Доп. тираж. Печ. л. 34,5.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД». 117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-397-04968-9

© Книжный дом «ЛИБРОКОМ»,
2010, 2015

17199 ID 197537



9 785397 049689



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

Содержание

От редакции	9
Предисловие	11
Введение	12
1. Основное содержание книги	12
2. Определение и значение теории колебаний и волн, предмет ее исследования	13
3. История создания и развития теории колебаний и волн	16
Раздел I	
Основные понятия и определения. Динамические модели	18
Глава 1. Динамические системы и их фазовое пространство.	
Стохастические и хаотические системы	18
1.1. Определение динамической системы и ее фазового пространства. Число степеней свободы	18
1.2. Классификация динамических систем. Понятие энергии	19
1.3. Интегрируемые и неинтегрируемые системы. Переменные действие–угол	23
1.4. Системы с медленно меняющимися параметрами. Адиабатические инварианты	26
1.5. Диссипативные системы. Усилители и генераторы	27
Глава 2. Гамильтоновы системы, близкие к полностью интегрируемым	28
2.1. Основное содержание теории Колмогорова—Арнольда—Мозера	28
2.2. Система Хенона—Хейлеса	28
Глава 3. Аттракторы и репеллеры	31
3.1. Простые и сложные аттракторы и репеллеры. Стохастические и хаотические аттракторы	31
3.2. Реконструкция аттрактора из экспериментальных данных	32
3.3. Количественные характеристики аттракторов	33
Глава 4. Различные типы колебаний и волн	37
4.1. Собственные и вынужденные колебания и волны	37
4.2. Автоколебания и автоволны	39
Глава 5. Примеры динамических моделей	41
5.1. Типы динамических моделей и их роль в познании природы	41
5.2. Консервативные модели	42
5.3. Неконсервативные гамильтоновы и диссипативные модели	64

Раздел II

Собственные и вынужденные колебания и волны	74
Глава 6. Собственные и вынужденные колебания нелинейных осцилляторов с одной степенью свободы	74
6.1. Колебания линейных и слабо нелинейных осцилляторов	74
6.2. Колебания сильно нелинейных осцилляторов	87
6.3. Колебания численности видов в модели Лотки—Вольтерра	98
6.4. Колебания пузырька газа в жидкости	100
6.5. Колебания осциллятора с медленно меняющимися параметрами	104
Глава 7. Собственные и вынужденные колебания в системах с полутора и более степенями свободы	109
7.1. Линейные консервативные системы. Нормальные колебания	109
7.2. Нормальные колебания в нелинейных консервативных системах	110
7.3. Нормальные колебания в квазиконсервативных системах. Устройство Лаврова	112
7.4. Акустическая эмиссия и ее модель в виде связанных нелинейных осцилляторов	116
7.5. Примеры хаотизации колебаний в трехмерных системах с гармоническими внешними воздействиями	119
7.6. Колебания двух связанных нелинейных осцилляторов под действием гармонической внешней силы в области основного резонанса	125
7.7. Комбинационные резонансы в системе двух связанных нелинейных осцилляторов	129
7.8. Параметрические резонансы в системе двух связанных осцилляторов	134
Глава 8. Колебания в цепочках однородных и периодически чередующихся элементов	141
8.1. Колебания в линейных цепочках однородных элементов	141
8.2. Колебания в линейных цепочках периодически чередующихся элементов	146
8.3. Колебания в нелинейных цепочках однородных элементов	151
8.4. Колебания в нелинейных цепочках с периодически чередующимися элементами, обусловленные гармоническими возмущениями на границе. Возбуждение второй гармоники и распадная неустойчивость	159
Глава 9. Шумоиндуцированные фазовые переходы в нелинейных системах	166
9.1. Параметрическое возбуждение колебаний маятника со случайно колеблющейся осью подвеса как шумоиндуцированный фазовый переход	166
9.2. Автопараметрическое возбуждение колебаний осциллятора с квадратичной нелинейностью при аддитивном случайном воздействии	181
9.3. Стабилизация верхнего положения равновесия маятника, обусловленная быстрыми случайными колебаниями оси подвеса	185
9.4. Шумоиндуцированные колебания в стандартной модели детских эпидемий, обусловленные случайными сезонными изменениями степени контакта с инфекцией	187
9.5. Шумоиндуцированные фазовые переходы в нелинейных цепочках	191

Глава 10. Собственные и вынужденные волны в ограниченных и неограниченных сплошных средах	194
10.1. Волны с нормальной и аномальной дисперсией	194
10.2. Одномерные волны в нелинейных однородных средах со слабой дисперсией, описываемые уравнением Кортевега—де Вриза	198
10.3. Солитонные решения уравнения Буссинеска	203
10.4. Солитонные решения кубического уравнения Шредингера и уравнения Гинзбурга—Ландау	204
10.5. Нелинейные волны, описываемые уравнениями Борна—Инфельда, Клейна—Гордона и синус-Гордона	206
10.6. Генерация второй гармоники и распадная неустойчивость в слабо нелинейных средах с сильной дисперсией	212
10.7. Одномерные волны в нелинейных однородных средах без дисперсии. Простые, пилообразные и ударные волны	215
10.8. Вынужденные колебания струны под действием распределенной гармонической внешней силы	223
10.9. Собственные волны в слабо неоднородных и слабо нестационарных средах. Волновое действие как адиабатический инвариант	224
10.10. Волны в слоистых средах с периодической структурой	229
10.11. Волновые пучки в нелинейных средах с дисперсией	232
10.12. Волновые пучки в нелинейных средах без дисперсии. Приближенные решения уравнения Хохлова—Заболотской	239

Раздел III

Колебания и волны в активных системах.

Автоколебания и автоволны

Глава 11. Вынужденные колебания и волны в активных неавтоколебательных системах	243
11.1. Усилители с сосредоточенными параметрами	243
11.2. Сплошные полуграниченные среды с конвективной неустойчивостью	244
11.3. Взрывная неустойчивость	245
11.4. Волны с отрицательной энергией и связанная с ними неустойчивость	249
Глава 12. Некоторые общие сведения об автоколебательных системах	253
12.1. Механизмы возбуждения автоколебаний и ограничения их амплитуды в системах с малым числом степеней свободы. Мягкое и жесткое возбуждение автоколебаний	253
12.2. Механизмы возбуждения автоколебаний в системах с высокочастотными источниками энергии	254
12.3. Механизмы возбуждения автоколебаний в распределенных системах. Абсолютная неустойчивость как механизм возбуждения автоволн	255
12.4. Автоколебательные системы томсоновского и релаксационного типов. Стохастические и хаотические автоколебания	256
12.5. Возможные пути потери устойчивости регулярных движений и возникновение хаоса и стохастичности	257

Глава 13. Примеры автоколебательных систем с сосредоточенными параметрами	259
13.1. Фрикционная автоколебательная система Кайдановского—Хайкина и маятник Фруда	263
13.2. Осциллятор Бонхоффера—Ван-дер-Поля	263
13.3. Простейшая модель гликолиза и сосредоточенный вариант «брюсселятора»	265
13.4. Сосредоточенная модель осциллятора Буравцева	267
13.5. Часы и маятник Неймарка. Энергетический критерий стохастизации автоколебаний	269
13.6. Автоколебательные модели взаимодействия видов, основанные на уравнениях Лотки—Вольтерра	273
13.7. Системы с инерционной нелинейностью	274
13.8. Системы с инерционным возбуждением	277
13.9. Системы Ресслера и Чуа	292
13.10. Трехмерная модель иммунной реакции организма и «орегонатор»	293
13.11. Простейшая модель экономического развития человеческого общества	297
13.12. Модели голосового источника	303
13.13. Сосредоточенная модель «поющего» пламени	313
Глава 14. Примеры автоколебательных систем с высокочастотными источниками энергии	317
14.1. Маятник Дубошинского, «гравитационная машина» и молоточек Андреева	317
14.2. Маятник Бетено, эффект Папалекси и устройство Рытова	322
14.3. Электромеханические вибраторы. Емкостные датчики малых смещений	326
Глава 15. Примеры автоколебательных систем с запаздыванием	331
15.1. Управляемые биологические системы	331
15.2. Генератор Ван-дер-Поля—Дуффинга с дополнительной запаздывающей обратной связью как модель доплеровского автодина	342
15.3. Кольцевой оптический резонатор с внешним полем (система Икеды)	345
Глава 16. Примеры распределенных автоколебательных систем с активными элементами на границах	347
16.1. Система Витта. Конкуренция и синхронизация мод	347
16.2. Явление Рийке	354
16.3. Распределенная модель «поющего» пламени	358
Глава 17. Примеры автоколебательных систем с распределенными активными элементами	360
17.1. Лазеры. Конкуренция, синхронизация и хаотизация мод. Оптические автосолитоны	360
17.2. Генераторы Ганна	373
17.3. Ионизационные волны (страты) в низкотемпературной плазме	380
17.4. Модель генерации звуков Короткова	389
17.5. Автоколебания ограниченной мембраны за счет возбуждения волн с отрицательной энергией	397

Глава 18. Периодические воздействия на автоколебательные системы.	
Синхронизация и хаотизация автоколебаний	400
18.1. Синхронизация периодических автоколебаний внешней гармонической силой в системе, описываемой уравнением Ван-дер-Поля—Дуффинга. Два механизма синхронизации	400
18.2. Синхронизация периодических колебаний в генераторе с инерционной нелинейностью и в более сложных системах	404
18.3. Синхронизация генератора Ван-дер-Поля с модулированной частотой	406
18.4. Асинхронное подавление и асинхронное возбуждение периодических автоколебаний	412
18.5. Хаотизация периодических автоколебаний при периодическом внешнем воздействии	413
18.6. Синхронизация хаотических автоколебаний периодическим внешним воздействием	415
Глава 19. Взаимодействие автоколебательных систем	417
19.1. Взаимная синхронизация двух генераторов периодических колебаний	417
19.2. Взаимная синхронизация трех и более связанных генераторов периодических колебаний	423
19.3. Хаотизация автоколебаний в системе связанных генераторов	425
19.4. Взаимодействие между генераторами периодических и хаотических колебаний	428
19.5. Взаимодействие генераторов хаотических колебаний. Общее понятие синхронизации	429
Глава 20. Примеры автоволи и диссипативных структур в возбудимых средах	433
20.1. Автоволны горения. Модель волны переброса	433
20.2. Автоволны в модели Фитц Хью—Нагумо	435
20.3. Автоволны в распределенном брасселяторе и некоторых других моделях биологических, химических и экологических систем	438
20.4. Автоволны, описываемые обобщенным уравнением Курамото—Сивашинского	442

Раздел IV

Автоколебания в жидкостях и газах и переходы к турбулентности	447
--	------------

Глава 21. Конвективные структуры и автоколебания в жидкостях и газах.	
Переходы к турбулентности в замкнутых течениях	447
21.1. Неустойчивость Релея—Тейлора и начальная стадия возникновения термоконвекции в плоском слое	447
21.2. Термоконвекция в тороидальной трубе. Уравнения Лоренца	454
21.3. Начальная стадия возникновения биоконвекции	455
21.4. Возникновение турбулентности в течении Куэтта между двумя коаксиальными вращающимися цилиндрами	459

Глава 22. Турбулентность в струйных и отрывных течениях	464
22.1. Эволюция представлений о турбулентности с точки зрения теории колебаний	464
22.2. Численный эксперимент Никитина и его трактовка с точки зрения шумоиндуцированного фазового перехода	466
22.3. Неустойчивость Кельвина—Гельмгольца	471
22.4. Гидродинамические и акустические волны в дозвуковых затопленных струях	472
22.5. Автоколебания в системах с обратной связью, содержащих струю в качестве активного элемента	495
22.6. Дорожка Кармана, эоловы тона и срывной флаттер	504
Приложения	514
Литература	520
Именной указатель	548