



СИНХРОНИЗАЦИЯ. ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ ЯВЛЕНИЕ

А. Пиковский, М. Розенблум, Ю. Куртс

Original english language edition
Published by Cambridge University Press
© All Rights Reserved, 2002
Перевод на русский язык,
оригинал-макет, оформление
© ЗАО РИЦ «Техносфера», 2003

Москва: Техносфера, 2003. 496с.
ISBN 5-94836-020-2

Явление синхронизации широко распространено в науке, природе, технике и обществе. Тенденция к синхронному поведению наблюдается в столь различных системах, как часы, стрекочущие кузнечики, водители ритма сердца, генерирующие потенциалы действия нейроны и аплодирующие зрители. Такие эффекты универсальны, их можно объяснить в рамках единого подхода, основанного на современных достижениях нелинейной динамики.

Приведены как классические результаты по синхронизации периодических автоколебаний, так и последние достижения в исследовании хаотических систем, больших ансамблей и колебательных сред. Монография адресована широкой аудитории - от студентов до квалифицированных исследователей в области физики, прикладной математики, инженерных и естественных наук.

Моему отцу Самуилу АП
Соне МР
Моему отцу Герберту ЮК

Предисловие к русскому изданию

Мы рады, что наша книга выходит в свет на родном для нас языке и становится доступной русскоязычному читателю. Мы взяли за перевод по совету ряда наших друзей и коллег, которые, ознакомившись с английским изданием, сочли, что книга была бы полезной для широкого круга читателей - студентов, аспирантов, научных работников разных специальностей - в странах СНГ. Мы благодарим Ю.А. Данилова и Л.Ф. Соловейчика, непосредственно подтолкнувших нас к работе над переводом. Мы хотели бы выразить свою особую признательность Е.М. Розенблуму и С.А. Розенблум за неоценимую помощь в наборе и корректуре русского текста.

А.С. Пиковский, М.Г. Розенблум

Предисловие к английскому изданию

Слово «синхронный» часто встречается как в научной, так и в обыденной речи. Происходя от греческих слов $\chi\rho\nu\nu\sigma$, (хронос - время) и $\sigma\acute{\upsilon}\nu$ (син - тот же самый, общий), в прямом переводе «синхронный» означает «разделяющий общее время», «происходящий в то же самое время». Этот термин, как и родственные слова «синхронизация» и «синхронизованный», относится ко множеству явлений, встречающихся почти во всех областях естественных наук, техники и социальной жизни, явлений, которые кажутся совершенно различными, но, тем не менее, подчиняются универсальным закономерностям.

Если в какой-либо научной базе данных ввести запрос на поиск статей, содержащих в заголовке слово с корнем «синхро», то мы получим список из сотен (если не тысяч) публикаций. Изначально эффект синхронизации был обнаружен и изучен в различных устройствах, от маятниковых часов до музыкальных инструментов, электронных генераторов, силовых электрических установок и лазеров; ему было найдено множество практических применений в инженерном деле. В наши дни «центр тяжести» исследований сместился в сторону изучения биологических систем, где синхронизация встречается на самом различном уровне. Синхронное изменение клеточных ядер, синхронная генерация потенциалов действия нейронами, подстройка сердечного ритма к дыханию и/или локомоторным ритмам, различные формы коллективного поведения насекомых, животных и даже человеческих сообществ - все это лишь некоторые примеры фундаментального явления природы, которое и является предметом данной книги.

В нашем окружении сплошь и рядом встречаются осциллирующие объекты. Системы радиосвязи и электрическое оборудование, скрипки в оркестре, светлячки, испускающие последовательности световых импульсов, стрекочущие сверчки, птицы, машущие крыльями, химические системы, демонстрирующие колебательное изменение концентрации реагентов, нервные центры, управляющие сокращением сердца человека, и само сердце, центр патологической активности, вызывающей непроизвольное дрожание конечностей вследствие болезни Паркинсона, - эти и многие другие системы имеют общее свойство: они генерируют ритмы. Обычно эти объекты не отделены от своего окружения, а, наоборот, взаимодействуют с другими объектами; иными словами, они являются открытыми системами. Действительно, биологические часы, управляющие ритмами суточной активности (циркадными ритмами), подвержены влиянию суточного и сезонного изменения освещенности и температуры, скрипач слышит своего коллегу по оркестру, на светлячка воздействует световое излучение всей популяции, различные центры ритмической активности мозга воздействуют друг на друга, и так далее. Такое взаимодействие может быть очень слабым, иногда едва заметным, но, тем не менее, оно часто приводит к качественному изменению состояния: объект подстраивает свой ритм, согласуя его с ритмами других объектов. В результате, скрипачи играют в унисон, насекомые в популяции генерируют световые или акустические импульсы с общей частотой, птицы в стае одновременно машут крыльями, сердце быстро галопирующей лошади сокращается один раз за каждый локомоторный цикл.

Такая подстройка ритмов за счет взаимодействия и является сущностью синхронизации, явления, которое систематически исследуется в этой книге.

Книга рассчитана на широкую аудиторию: физиков, химиков, биологов, инженеров, а также на других специалистов, занимающихся исследованиями на стыке различных областей¹; она рассчитана как на теоретиков, так и на

¹ Так как авторы - физики, то акцент неизбежно делается на физическом подходе к описанию естественных явлений.

экспериментаторов. Поэтому изложение экспериментальных фактов, основных принципов и математических методов в разных главах неоднородно, и иногда повторяется. Разнообразие предполагаемой аудитории отражено в структуре книги.

Первая часть книги, «Синхронизация без формул», рассчитана на читателя с минимальной математической подготовкой (знание математического анализа не требуется), по крайней мере, книга писалась с таким намерением. Хотя часть I практически не содержит уравнений, в ней описываются и объясняются на качественном уровне все основные идеи и эффекты². Здесь мы иллюстрируем синхронизацию экспериментами и наблюдениями из различных областей. Часть I может быть пропущена физиками-теоретиками, специалистами в нелинейной динамике, или же она может быть использована как источник примеров и приложений.

Части II и III охватывают тот же круг идей, но на уровне количественного описания; предполагается, что читатель этих частей знаком с основами нелинейной динамики. Мы надеемся, что основная часть материала будет понятна студентам старших курсов. В этих частях мы приводим обзор классических результатов по синхронизации периодических осцилляторов, как без учета, так и с учетом влияния шумов; рассматриваем явление синхронизации в ансамблях осцилляторов и в распределенных системах; представляем различные эффекты взаимодействия хаотических систем; приводим обширную библиографию.

Мы надеемся, что эта книга заполнит пробел в литературе. Действительно, хотя почти каждая книга по теории колебаний (или, в современных терминах, по нелинейной динамике) рассматривает синхронизацию в числе других нелинейных эффектов, только монографии И.И. Блехмана [1971; 1981], написанные в «дохаотическую» эру, специально посвящены этой теме. В них главным образом рассматриваются механические и электромеханические системы, но они также содержат подробный обзор теории, природных явлений и приложений в различных областях. При написании нашей книги мы пытались совместить описание классической теории с детальным обзором недавних результатов, делая упор на междисциплинарные приложения.

В процессе исследований по синхронизации мы с радостью сотрудничали и обсуждали результаты с В.С. Афраймовичем, В.С. Анищенко, В. Blasius, И.И. Блехманом, Н. Chate, U. Feudel, P. Glendinning, P. Grassberger, С. Grebogi, J. Hudson, С.П. Кузнецовым, П.С. Ланда, А. Lichtenberg, R. Livi, Ph. Marcq, Ю. Майстренко, Е. Mosekilde, F. Moss, А.Б. Нейманом, Г.В. Осиповым, Е.-Н. Park, U. Parlitz, К. Piragas, А. Politi, А. Поповичем, R. Roy, O. Rudzick, S. Ruffo, Н.Ф. Рульковым, С. Schafer, L. Schimansky-Geier, L. Stone, Н. Swinney, P. Tass, E. Toledo и А.А. Заикиным.

Мы высоко ценим комментарии А.А. Непомнящего, А.А. Пиковского, А. Politi и С. Ziehmann, которые частично прочли рукопись.

О. Футер, Н.Б. Игошева и R. Mrowka терпеливо отвечали на наши многочисленные вопросы, касающиеся медицинских и биологических проблем.

Мы хотели бы выразить свою особую благодарность Михаилу Александровичу Заксу, который поддерживал нас на всех стадиях реализации этого проекта.

Мы также благодарим Philips International B.V., Company Archives (Эйндховен, Нидерланды) за присланные фотографию и биографию Балтазара Ван дер Поля и А. Kurths за ее помощь в подготовке библиографии.

² Для упрощения изложения мы опускаем в первой части ссылки на оригинальные работы, где эти идеи были высказаны; ссылки могут быть найдены в библиографическом разделе Введения, а также в библиографических заметках к частям II и III.

В заключение мы хотим отметить доброжелательное отношение сотрудников Cambridge University Press. Мы в особенности благодарны S. Capelin за его поддержку и терпение и F. Charman за ее превосходную работу по улучшению рукописи.

Интернет-страничка книги. Мы просим всех, кто желает высказать свои комментарии по поводу книги, прислать электронную почту по адресам:

pikovsky@stat.physik.um-potsdam.de;

mros@agnld.uni-potsdam.de;

jkurths@agnld.uni-potsdam.de.

Все опечатки и ошибки будут отмечены на интернет-страничке (URL: <http://www.agnld.uni-potsdam.de/~syn-book/>).

Электронная почта издательства: knigi@technosphera.ru;

Телефон (095) 234-01-10

Содержание

Предисловие к русскому изданию

Предисловие к английскому изданию

Часть I. Синхронизация без формул

Глава 1. Введение

- 1.1. Синхронизация в исторической перспективе.
- 1.2. Синхронизация: краткое описание явления.
Что такое синхронизация? Что не является синхронизацией.
- 1.3. Синхронизация: обзор различных случаев.
Терминологические замечания.
- 1.4. Основная библиография.

Глава 2. Основные понятия: автоколебательная система и ее фаза

- 2.1. Автоколебательные системы: математические модели естественных осцилляторов.
Автоколебательные системы типичны в природе. Геометрический образ периодических автоколебаний: предельный цикл.
- 2.2. Фаза: определение и свойства.
Фаза и амплитуда квазилинейного осциллятора. Амплитуда устойчива, фаза свободна. Общий случай: предельный цикл произвольной формы.
- 2.3. Автоколебательная система: основные свойства.
Диссипация, устойчивость и нелинейность. Автономные системы и системы под действием силы: фаза вынужденных колебаний не свободна!
- 2.4. Автоколебательные системы: дополнительные примеры и обсуждение.
Типичная автоколебательная система с контуром обратной связи. Релаксационные автоколебательные системы

Глава 3. Синхронизация периодических автоколебаний внешней силой

- 3.1. Слабое воздействие на квазилинейные автоколебания.
Автономные автоколебания и сила во вращающейся системе координат. Захват фазы и частоты. Переход к синхронизации. Пример: захват частоты дыхания механической вентиляцией.
- 3.2. Синхронизация внешней силой: более общий подход.
Стробоскопический метод. Пример: периодическая стимуляция светлячка. Захват последовательностью импульсов. Синхронизация высшего порядка. Язык Арнольда. Пример: периодическая стимуляция пейсмекерных клеток. Захват фазы и частоты: общий подход. Пример: синхронизация лазера.
- 3.3. Особенности синхронизации релаксационных автоколебаний.
Сброс внешним импульсом. Пример: кардиостимулятор. Электрическая модель сердца по Ван дер Полю и Ван дер Марку. Вариация порога. Пример: электронный релаксационный

- автогенератор. Изменение собственной частоты. Модуляция и синхронизация. Пример: синхронизация песен сверчков.
- 3.4. Синхронизация в присутствии шума.
Диффузия фазы в автоколебаниях с шумом. Автоколебания с шумом и внешней силой. Проскоки фазы. Пример: захват дыхания при механической вентиляции. Пример: захват сердечного ритма слабым внешним стимулом.
 - 3.5. Различные примеры.
Циркадные ритмы. Менструальный цикл. Захват периодических колебаний уровня инсулина периодическими инъекциями глюкозы. Синхронизация плазмодия миксомицета *Physarum*.
 - 3.6. Явления, близкие к синхронизации.
Явления при большой внешней силе. Воздействие на возбудимые системы. Стохастический резонанс с точки зрения синхронизации. Захват нескольких осцилляторов общей силой.

Глава 4. Синхронизация двух и многих осцилляторов

- 4.1. Взаимная синхронизация автоколебательных систем.
Два взаимодействующих осциллятора. Пример: синхронизация триодных генераторов. Пример: частота дыхания и частота взмаха крыльев свободно лежащих уток. Пример: переход между состояниями с синфазными и противофазными движениями. Заключительные замечания и связанные с синхронизацией эффекты. Релаксационные осцилляторы. Пример: клетки истинного и латентного водителей ритма синоатриального узла. Синхронизация в присутствии шума. Пример: активность мозга и мышц при болезни Паркинсона. Синхронизация ротаторов. Пример: контакты Джозефсона. Несколько осцилляторов.
- 4.2. Цепочки, решетки и колебательные среды.
Синхронизация в цепочке. Пример: цепочка лазеров. Образование кластеров. Пример: электрическая активность кишечника млекопитающих. Кластеры и бенины в среде: подробное рассмотрение. Колебательная среда под периодическим воздействием. Пример: воздействие на реакцию Белоусова - Жаботинского.
- 4.3. Глобально связанные осцилляторы.
Самосинхронизация в ансамбле: переход Курамото. Пример: синхронизация менструальных циклов. Пример: синхронизация гликолитических колебаний в популяции дрожжевых клеток. Экспериментальное изучение ритмических аплодисментов.
- 4.4. Различные примеры.
Бег и дыхание у млекопитающих. Синхронизация двух осцилляторов «соль - вода». Захват колебаний тубулярного давления в нефронах. Клеточные популяции. Синхронизация колебаний систем хищник - жертва. Синхронизация в нейронных системах.

Глава 5. Синхронизация хаотических систем

- 5.1. Хаотические колебания.
Пример: модель Лоренца. Чувствительность к начальным условиям.
- 5.2. Фазовая синхронизация хаотических автоколебаний.
Фаза и средняя частота хаотических автоколебаний. Захват частоты внешней силой. Пример: хаотический разряд в газе.
- 5.3. Полная синхронизация хаотических систем.
Полная синхронизация идентичных систем. Пример: синхронизация двух лазеров. Синхронизация неидентичных систем. Полная синхронизация в общем контексте. Пример: синхронизация и кластеры в глобально связанных электрохимических осцилляторах. Синхронизация путем подавления хаоса.

Глава 6. Экспериментальное исследование синхронизации

- 6.1. Оценка фазы и частоты по сигналу.
Фаза импульсной последовательности. Пример: электрокардиограмма. Фаза узкополосного сигнала. Пример: дыхание. Несколько практических замечаний.
- 6.2. Анализ данных в «активном» и «пассивном» эксперименте.
«Активный» эксперимент. «Пассивный» эксперимент
- 6.3. Анализ взаимоотношения между фазами.
Непосредственный анализ разности фаз. Пример: регуляция позы человека. Высокий уровень шума. Стробоскопический метод. Фазовый стробоскоп в случае Пример: взаимодействие сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Фазовые соотношения при сильной модуляции. Пример: генерация потенциалов действия электрорецепторами веслоноса.
- 6.4. Заключение и библиографические заметки.
Несколько заметок о «пассивных» экспериментах. Количественное оценивание фазовых соотношений и его статистическая значимость. Некоторые полезные ссылки.

Часть II. Захват фазы и частоты

Глава 7. Синхронизация периодических автоколебаний периодическим внешним воздействием

7.1. Фазовая динамика.

Предельный цикл и фаза автоколебаний. Малые возмущения и изохроны. Пример: уравнение для комплексной амплитуды. Уравнение фазовой динамики. Пример: неавтономное уравнение для комплексной амплитуды. Медленная динамика фазы. Медленная динамика фазы: захват фазы и область синхронизации. Итоги рассмотрения фазовой динамики.

7.2. Слабо нелинейные автоколебания.

Амплитудное уравнение. Свойства синхронизации: изохронный случай. Свойства синхронизации в случае неизохронных автоколебаний.

7.3. Отображения окружности и кольца.

Отображение окружности: вывод и примеры. Свойства отображения окружности. Отображение кольца. Большая сила и переход к хаосу.

7.4. Синхронизация ротаторов и контактов Джозефсона.

Динамика ротаторов и контактов Джозефсона. Передемпфированный ротатор во внешнем поле.

7.5. Системы фазовой автоподстройки.

7.6. Библиографические заметки.

Глава 8. Взаимная синхронизация двух взаимодействующих периодических осцилляторов

8.1. Фазовая динамика.

Усредненные фазовые уравнения. Отображение окружности.

8.2. Слабонелинейные осцилляторы.

Общие уравнения. Вымирание (гашение) колебаний. Притягивающее и отталкивающее взаимодействие.

8.3. Релаксационные колебания

8.4. Библиографические заметки

Глава 9. Синхронизация в системах с шумом

9.1. Автоколебания в присутствии шума

9.2. Синхронизация в присутствии шума.

Качественная картина ланжевеновской динамики. Количественное описание в случае белого шума. Синхронизация квазигармонической флуктуирующей силой. Взаимная синхронизация автоколебаний с шумом.

9.3. Библиографические заметки

Глава 10. Фазовая синхронизация хаотических систем

10.1. Фаза хаотического осциллятора.

Понятие фазы. Фазовая динамика хаотических осцилляторов

10.2. Синхронизация хаотических осцилляторов.

Фазовая синхронизация внешней силой. Косвенное описание синхронизации. Синхронизация в терминах неустойчивых периодических орбит. Взаимная синхронизация двух связанных осцилляторов.

10.3. Библиографические заметки.

Глава 11. Синхронизация в осциллирующих средах

11.1. Цепочки осцилляторов

11.2. Непрерывное по пространству распределение фазы.

Плоские волны и мишени. Влияние шума: шероховатость против синхронизации.

11.3. Слабо нелинейная колебательная среда.

Комплексное уравнение Гинзбурга - Ландау. Внешнее воздействие на колебательную среду.

11.4. Библиографические заметки

Глава 12. Ансамбли глобально связанных осцилляторов

12.1. Переход Курамото.

12.2. Осцилляторы с шумом.

12.3. Обобщения.

Модели, основанные на фазовом приближении. Глобально связанные слабонелинейные осцилляторы. Связанные релаксационные осцилляторы. Связанные контакты Джозефсона. Эффекты конечности числа элементов ансамбля. Ансамбль хаотических осцилляторов.

12.4. Библиографические заметки

Часть III. Синхронизация хаотических систем

Глава 13. Полная синхронизация I: основные свойства

- 13.1. Простейшая модель: два связанных отображения
- 13.2. Устойчивость синхронного режима
- 13.3. Статистическая теория перехода к синхронизации.
Возмущение как случайное блуждание. Диффузия определяется статистикой локальных по времени ляпуновских показателей. Модуляционная перемежаемость: степенные распределения. Модуляционная перемежаемость: корреляционные свойства.
- 13.4. Переход к синхронизации: геометрическое рассмотрение.
Поперечные бифуркации периодических траекторий. Слабая и сильная синхронизация. Локальный и глобальный риддинг.
- 13.5. Библиографические заметки

Глава 14. Полная синхронизация II: обобщения и сложные системы

- 14.1. Идентичные отображения, связь общего вида.
Однонаправленная связь. Асимметричная локальная связь. Глобальная связь (через среднее поле).
- 14.2. Системы с непрерывным временем
- 14.3. Распределенные системы.
Пространственно однородный хаос. Поперечная синхронизация пространственно-временного хаоса. Синхронизация в связанных клеточных автоматах.
- 14.4. Синхронизация как симметричное состояние общего вида.
Копированные системы.
- 14.5. Библиографические заметки

Глава 15. Синхронизация сложной динамики внешним воздействием

- 15.1. Синхронизация периодической силой
- 15.2. Синхронизация шумовым воздействием.
Периодические колебания под действием шума. Синхронизация хаотических колебаний внешним шумом.
- 15.3. Синхронизация хаотических колебаний хаотической силой.
Полная синхронизация. Обобщенная синхронизация. Обобщенная синхронизация квазипериодической силой.
- 15.4. Библиографические заметки

Приложение 1. Открытие синхронизации Христианом Гюйгенсом

- П1.1. Письмо Христиана Гюйгенса его отцу, Константину Гюйгенсу
- П1.2. Морские часы (симпатия часов). Часть V

Приложение 2. Мгновенная фаза и частота сигнала

- П2.1. Аналитический сигнал и преобразование Гильберта
- П2.2. Примеры
- П2.3. Численные проблемы и практические рекомендации
- П2.4. Вычисление мгновенной частоты

Список литературы

Предметный указатель