

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Явление мультистабильности в сосредоточенных и распределённых
осцилляторных системах**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4032 группы
направления 03.03.03 Радиофизика
Института физики
Лёвина Антона Владимировича

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н., профессор _____ В. В. Астахов

Зав. кафедрой радиофизики
и нелинейной динамики,
д.ф.-м.н., доцент _____ Г.И. Стрелкова

Саратов 2023 г.

Содержание

Введение	3
1. Мультистабильность: широко распространенное явление в динамических системах	4
1.1. Мультистабильность в восприятии	4
1.2. Мультистабильность в биологических системах	4
1.3. Мультистабильность в гидродинамике	5
1.4. Мультистабильность в оптических системах	5
1.5. Мультистабильность в полупроводниковых материалах	6
1.6. Мультистабильность в химических реакциях	6
1.7. Мультистабильность в экосистемах	6
1.8. Мультистабильность в динамике нейронов	6
1.9. Мультистабильность в динамике климата	7
2 Возникновение мультистабильности и цели управления.	8
2.1. Механизмы мультистабильности и способы управления	8
2.2. Зачем нам нужно управлять мультистабильностью	9
Заключение	11
Список использованных источников	13

Введение

Целью работы является обзор научных результатов и данных по указанной теме на основании научных публикаций и научной литературы, опубликованной в последние годы в ведущих научных журналах. Стоит отметить вышедшую в 2022 году в издательстве Шпрингер монографию Александра Николаевича Писарчика и Александра Евгеньевича Храмова «Мультистабильность в физических и живых системах». Однако основным источником информации моей работы был выбран обзор Александра Николаевича Писарчика и Ульрике Фойдель «Управление мультистабильностью», опубликованный в 2014 году в известном журнале «Physics Reports» [1].

В диссипативных системах мультистабильность означает сосуществование нескольких возможных устойчивых состояний (аттракторов) для данного набора параметров. Конечное состояние, к которому будет сходиться система, в решающей степени зависит от начальных условий, т. е. установившаяся динамика, соответствующая одному из аттракторов, определяется начальными условиями. Набор начальных условий, которые порождают множество траекторий, сходящиеся к одному и тому же аттрактору, называется бассейном притяжения, и могут иметь довольно сложную, фрактальную структуру. Существует нетривиальная связь между сосуществующими асимптотическими состояниями и их сложно переплетающимися бассейнами притяжения, что делает мультистабильные системы чрезвычайно чувствительными к любым возмущениям [2].

Кроме того, мультистабильные системы предполагают большое разнообразие динамики в силу того, что каждый из сосуществующих аттракторов соответствует отдельному (отличному от других) режиму функционирования системы [3]. Управление мультистабильностью [1] является важной проблемой в нелинейных науках из-за высокой чувствительности мультистабильных систем к любым возмущениям. Способы управления должны быть надежными и устойчивыми к шумовым воздействиям, когда требуется установить определенный режим динамики системы.

1. Мультистабильность: широко распространенное явление в динамических системах.

Свойства бассейнов притяжения во многом определяются встроенными в аттракторы седловыми циклами и их многообразиями [4]. А нетривиальная связь между этими сосуществующими асимптотическими состояниями и их сложно переплетенными бассейнами притяжения делает мультистабильные системы как чрезвычайно чувствительными к любым возмущениям, так и критически зависимыми от начальных условий.

1.1. Мультистабильность в восприятии

Термин «мультистабильность» впервые был использован в применении к зрительному восприятию в 1971 г. [5]. В науке о зрении, мультистабильное восприятие характеризует колеблющееся восприятие [6], которое может быть вызвано определенными визуально неоднозначными паттернами, такими как куб Неккера и ваза Рубина, в соответствии с рисунком 1.

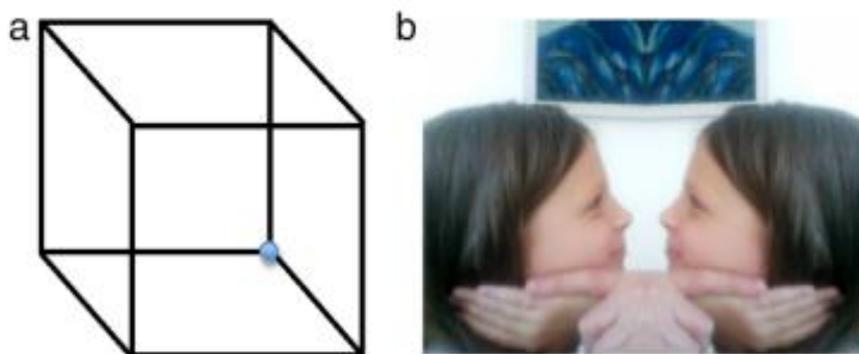


Рисунок 1 - Примеры бистабильного зрительного восприятия.

Это знаменитые оптические иллюзии, которые можно увидеть одним из двух способов. а) Куб Неккера. Изометрическая перспектива проволочного рисунка делает двусмысленным воспринимаемый план мяча, находящегося впереди. (б) Рубиновая ваза. Картину можно рассматривать как-либо два обличовочных профиля, либо в виде симметричной вазы в центре [7, 8].

1.2. Мультистабильность в биологических системах

Биологические механизмы и топологические структуры, приводящие к мультистабильности, широко изучались в генетике [9-14].

Мультистабильность играет важную роль в некоторых основных процессах жизни. Это может объяснить сохранение фенотипических различий в отсутствие генетических или экологических факторов различия.

1.3. Мультистабильность в гидродинамике

Шиану и др. в работе обнаружили сосуществование двух или трех периодических режимов в двумерном потоке, переходящем в квадратный цилиндр при малых числах Рейнольдса. Они показали, что, когда система демонстрирует сосуществование периода-1 и вихрей с периодом 3 за цилиндром пространственная симметрия все еще сохраняется, однако, когда система тристабильна, вихрь периода 3 теряет пространственную симметрию, но вихрь периода 1 сохраняет пространственную симметрию. Мультистабильность в турбулентном потоке была продемонстрирована Ravelet et al. При больших числах Рейнольдса, поскольку глобальная бифуркация между состояниями очень до критична, множественные турбулентные состояния, которые сохраняют память об истории системы сосуществуют.

1.4. Мультистабильность в оптических системах

Лишь в начале 80-х мультистабильность стала заметным явлением в лазерной физике. Явные экспериментальные доказательства мультистабильности в физических системах впервые были показаны модулированном CO₂-лазере. В этом случае сосуществование колебательных аттракторов было названо обобщенной мультистабильностью, чтобы отличить его от обычного сосуществования стационарных решений, например, оптическая бистабильность.

Особый вид мультистабильности, так называемая пространственная мультистабильность, также наблюдалась в лазере. Эта мультистабильность проявляется в поперечных пространственных структурах за счет взаимодействия резонаторных мод. Мультистабильность структур считается очень многообещающим явлением для обработки информации, ассоциативной памяти и распознавания образов.

1.5. Мультистабильность в полупроводниковых материалах

Известно, что полупроводниковые сверхрешетки порождают множество различных динамических режимов, связанных с отрицательной дифференциальной проводимостью.

При воздействии на такую сверхрешетку терагерцового излучения возникают новые области фотоиндуцированной мультистабильности, обусловленные взаимодействием нелинейных свойств полупроводниковой сверхрешетки, обусловленных кулоновскими взаимодействиями и фотонными каналами.

1.6. Мультистабильность в химических реакциях

Мультистабильность обнаруживается не только в связанных реакторных системах, но и в пространственно-распределенных системах типа «реакция-диффузия». Сосуществующие пространственно-неоднородные состояния были идентифицированы в гексагональных и квадратных структурах сверхрешеток Тьюринга в светочувствительной системе «реакция–диффузия». Эта мультистабильность может быть использована для создания нескольких смежных пространственных областей с различной геометрией и стационарными границами между ними.

1.7. Мультистабильность в экосистемах

Экологические системы представляют собой сети видов, организованные на разных трофических уровнях, где взаимодействие видов в основном определяется взаимодействием хищник-жертва и пищевой конкуренцией. Такие пищевые сети обычно обладают сложной структурой взаимодействия, которая дает множество состояний равновесия, связанных с наборами различных пропорций сосуществующих видов, т. е. разные составы видовых сообществ, соответствующие разным уровням биоразнообразия.

1.8. Мультистабильность в динамике нейронов

Мультистабильность была предложена в качестве основного механизма ассоциативного хранения памяти с адресацией по содержанию и распознаванию образов как в искусственных, так и в живых нейронных системах. Основываясь

на физиологии нейронных систем, для объяснения их мультистабильности были введены различные динамические понятия, такие как временная задержка, паттерны фазовой синхронизации и т. д. Были изучены рекуррентные нейронные петли с запаздыванием, которые можно рассматривать как возможный механизм, приводящий к мультистабильному поведению.

На уровне отдельного нейрона мультистабильность представляется как сосуществование основных режимов возбуждения, таких как молчание, спайки, регулярные и хаотические всплески (берсты). При воздействии шума нейроны могут переключаться между различными паттернами возбуждения, что можно интерпретировать как динамическую кратковременную память.

В нейронных сетях мультистабильность и особенно бистабильность играют важную роль в передаче сигналов клетками и во взаимодействиях нейронов.

1.9. Мультистабильность в динамике климата

Поскольку климат регулируется многочисленными природными параметрами и характеризуется различными переменными состояниями, многие исследования поддерживают идею мультистабильного характера динамики климата, подчеркивая, что изменение климата может проявляться как изменение предпочтения некоторых сосуществующих аттракторов или климатических режимов. Переходы между различными динамическими режимами и соответствующие им критические пороги параметров окружающей среды (иногда называемые переломными точками) вызывают все больший интерес в исследованиях климата. Сосуществующие аттракторы, в основном альтернативные состояния, связанные с бистабильностью, были получены в глубоководной конвекции изменении атмосферы, динамике ледяного щита и опустынивании Сахары.

2 Возникновение мультистабильности и цели управления.

Как было сказано выше, мультистабильность, действительно, является широко распространенным явлением. Соответственно, существует большое множество причин, приводящих к сосуществованию нескольких устойчивых состояний в сложной системе. К ним, в частности, можно отнести слабую диссипацию, гомоклинические касания, связь, запаздывающую обратную связь и случайные возмущения.

2.1. Механизмы мультистабильности и способы управления

Хотя механизмы возникновения мультистабильности могут быть самыми разными, общее поведение систем с сосуществующими аттракторами очень похоже.

При разработке стратегии управления необходимо гарантировать, что изменение параметра при управлении не приведет к радикальному изменению системы, а это означает, что во многих случаях возможны только небольшие управляющие воздействия. С другой стороны, чрезвычайно высокая чувствительность к возмущениям, возможно, ведущей к другому состоянию, требует особой осторожности при разработке адекватной техники управления.

К основным способам управления можно отнести:

1) **методы управления без обратной связи** как простейший подход, поскольку он не требует ни контура обратной связи, ни постоянного отслеживания фазово-пространственной траектории, как это делает управление с обратной связью. Кроме того, управление без обратной связи особенно привлекательно в системах, где управление с обратной связью невозможно, особенно в биологических и химических системах. Данный метод основан на подаче внешнего возмущения в виде короткого импульса, квазипериодического и гармонического воздействия;

2) **техника обратной связи;**

3) **стохастический контроль мультистабильности.**

Взаимодействие между стохастичностью и нелинейностью является актуальным вопросом при изучении различных динамических систем, в том

числе радиофизических, климатических, популяционных геофизических, эпидемиологических и оптических моделях, а также при анализе медицинских данных. Было показано, что шум иногда играет положительную роль в мультистабильных системах, например, индуцируя стохастический и когерентный резонанс.

2.2. Зачем нам нужно управлять мультистабильностью

Экспериментальные и реальные системы всегда подвержены различным видам шума. Это случайные возмущения, которые могут представлять собой внутренние флуктуации, либо навязаны извне в виде случайных сигналов. Из-за влияния шума мультистабильная система становится метастабильной, так как случайные возмущения выбрасывают систему из бассейна притяжения одного аттрактора и индуцируют переход в другое сосуществующее состояние.

Высокая чувствительность к возмущениям обогащает динамику системы и играет важную роль в постановке различных целей управления.

Во-первых, для некоторых приложений мультистабильность является нежелательным поведением системы.

Во-вторых, для системы, которая должна решать разные задачи, весьма выгодно, чтобы она обладала множеством сосуществующих состояний, предполагая, что каждое состояние соответствует определенной задаче.

Две разные цели, тесно связанные с проблемой переключения аттракторов, можно сформулировать следующим образом:

- 1) **выбор аттрактора**, т.е. того притягивающего множества, к которому должны сходиться траектории системы, и
 - 2) **избегание аттракторов**, т.е. исключение определенных нежелательных аттракторов из динамических режимов системы.
- Следует отметить, что несколько сосуществующих аттракторов могут возникать или исчезать одновременно в результате бифуркации множественного выбора.

Разработка и применение методов управления мультистабильностью далеко не завершены. Особенно, за последнее десятилетие число работ,

сообщающих о сосуществовании аттракторов, чрезвычайно возросло, так что можно ожидать дальнейшее быстрое развитие этой области в течение следующего десятилетия.

Заключение

За последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в управлении мультистабильными системами. Как указано выше, различные стратегии контроля были разработаны теоретически и реализованы экспериментально. Однако в области мультистабильности все еще остается много открытых проблем, которые необходимо понять в будущем. Здесь мы упомянем лишь некоторые из них.

Чрезвычайная мультистабильность:

Наконец, захватывающее явление чрезвычайной мультистабильности, недавно обнаруженное в связанных системах со специально разработанным соединением, все еще до конца не изучено. Бесконечное число аттракторов имело бы разнообразные применения, если бы можно было реализовать надлежащий контроль такого рода мультистабильности. Однако экспериментальная проверка этого типа мультистабильности до сих пор не была осуществлена из-за его высокой чувствительности к шуму. Это еще одна проблема для разработки стратегий управления, позволяющих обеспечить сосуществование очень большого числа аттракторов.

Климат:

Сосуществование различных стабильных состояний является темой, вызывающей растущий интерес в науках об окружающей среде и исследованиях климата, поскольку многие процессы в океане, атмосфере и экосистемах проявляют множественные состояния. Например, одним из возможных механизмов возникновения блуждающих волн в океане является взаимодействие детерминированных и случайных процессов в мультистабильной среде. Мы считаем, что глубокое изучение этого взаимодействия поднимет новые сложные вопросы для будущих теоретических и экспериментальных работ по управлению мультистабильностью в этих очень сложных системах.

Сложные сети:

Особое внимание следует уделить изучению и контролю мультистабильности в сложных сетях. Недавно были изучены не только

взаимодействия ближайших соседей, такие как диффузия или глобально связанные системы, но и общие сети, обладающие идентичными или почти идентичными узлами, на которых происходят некоторые нелинейные явления. Эти узлы соединены между собой, образуя сеть с некоторой заданной топологией или даже с корректирующей топологией. Представляющий особый интерес, таким образом существует связь между динамикой на узлах и топологией сети. Если предположить, что динамика на узлах является мультистабильной, то должна возникнуть сложная сетевая динамика.

Список использованных источников

- 1 Писарчик, А. Н. Управление мультистабильности / А. Н. Писарчик, Ульрике Фойдель. – М. : Отчёты по физике 540, 2014. – 52 с.
- 2 Маурер, Дж. Влияние числа Прандтля на возникновение турбулентности в жидкости He-4 / Дж. Маурер, А. Либчабер. – М. : Журнал физической литературы 41, Париж, 1980. - 4 с.
- 3 Джильо, М. Переход к хаотическому поведению посредством воспроизводимой последовательности бифуркаций с удвоением периода / М. Джильо, С. Мусацци, У. Перини. – М. : Письма с физическим обзором 47, 1981. - 4 с.
- 4 Эшенази, Э. Бассейны притяжения в управляемых динамических системах / Э. Эшенази, Х.Г. Солари, Р. Гилмор. – М. : Физический обзор А 39, 1989. – 19 с.
- 5 Аттнив, Ф. Мультистабильность в восприятии / Ф. Аттнив. – М. : Учёная Америка 225, 1971. - 9 с
- 6 Шварц, Дж.-Л. Мультистабильность в восприятии: сенсорная модальность / Дж.-Л. Шварц, Н. Гримо, Дж.-М. Хуппа, К.Дж.Б.К.Дж. Мур, Д. Прессницер. – М. : Философские труды Королевского общества Б 367, 2012. – 10 с.
- 7 ван И, Р. Добровольный контроль и динамика перцептивной бистабильности / Р. ван И, Л.С. ван Дам, Дж.Дж. Брауэр. – М. : Исследование видения 45, 2005. - 15 с.
- 8 Колер, А. Решая, что видеть: роль намерения и внимания в восприятии видимого движения / А. Колер, Л. Хаддад, У. Сингер, Л. Макли. – М. : Исследование видения 48, 2008. – 11 с.
- 9 Ульнер, Э. Мультистабильность и кластеризация в популяции синтетических генетических осцилляторов посредством фазово-отталкивающей межклеточной коммуникации / Э. Ульнер, А. Заикин, Е.И. Волков, Дж. Гарсия-Охальво. – М. : Письма с физическим обзором 99, 2007.

- 10 Косеска, А. Присущая мультистабильность массивам генетических генераторов, связанных с автоиндуктором / А. Косеска, Е. Волков, А. Заикин, Дж. Куртс. – М. : Физический обзор E 75, 2007.
- 11 Юань, З. Когерентность, коллективный ритм и распределение разности фаз в популяциях стохастических генетических осцилляторов с сотовой связью / З. Юань, Дж. Чжан, Т. Чжоу. – М. : Физический обзор E 78, 2008.
- 12 Ульнер, Э. Мультистабильность синтетических генетических сетей с репрессивной межклеточной коммуникацией / Э. Ульнер, А. Косеска, Дж. Куртс, Э. Волков, Х. Канц, Дж. Гарсия-Охалво. – М. : Физический обзор E 78, 2008.
- 13 Косеска, А. Топологические структуры усиливают присутствие динамических режимов в синтетических сетях / А. Косеска, Дж. Куртс. – М. : Хаос 20, 2010.
- 14 Потапов, И. Определение кворума, генерирующее мультистабильность и хаос в синтетическом генетическом генераторе / И. Потапов, Б. Журов, Е. Волков. – М. : Хаос 22, 2012.