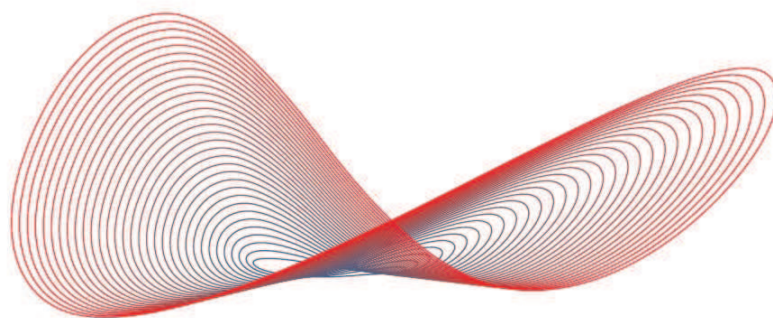
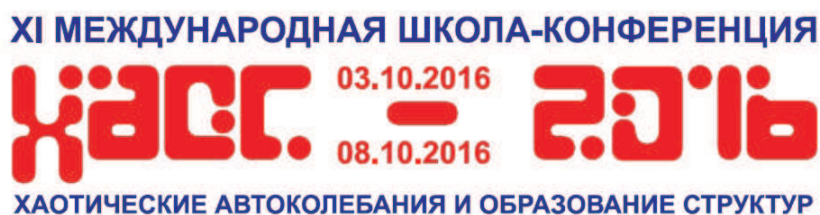


XI МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ
“ХАОТИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР”
11TH INTERNATIONAL SCHOOL ON “CHAOTIC OSCILLATIONS AND PATTERN
FORMATION”



МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ «АЛМАЗ»

3 – 8 октября 2016
САРАТОВ

УДК 517.9, 530.1

М34 Материалы XI Международной школы-конференции “Хаотические автоколебания и образование структур” (ХАОС-2016), 3–8 октября 2016, Саратов. Саратов: ООО “Издательский центр “Наука” ISBN 978-5-9999-2695-1

Редакционная коллегия:

Д.И. Трубецков, А.А. Короновский, Ю.И. Левин,
А.Е. Храмов

Ответственный за выпуск – доцент Е.Н. Егоров

Оригинал–макет подготовлен в пакете L^AT_EX

Е.Н. Егоров, А.О. Сельский

Организаторы:

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
имени В.А. Котельникова РАН

При финансовой поддержке:

Российский фонд фундаментальных исследований Саратовское отделение IEEE
ОАО “НПП “Алмаз”

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Трубецков Д.И., чл.-корр РАН, профессор, Саратовский госуниверситет, Саратов (председатель);

Анищенко В.С., д.ф.-м.н., профессор, Саратовский госуниверситет, Саратов, Россия;

Гуляев Ю.В., академик РАН, директор ИРЭ им. В.А. Котельникова, Москва, Россия;

Гурия Г.Т., д.ф.-м.н., профессор, Московский физико-технический институт, Гематологический научный центр Минздрава России, Москва, Россия;

Ebeling W., профессор, Гумбольтский университет, Берлин, Германия;

Дмитриев А.С., д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия;

Калинин Ю.А., д.т.н., проф., руководитель Отделения физики нелинейных систем НИИ ЕН СГУ, Саратов, Россия;

Короновский А.А., д.ф.-м.н., профессор, проректор по НИР Саратовского госуниверситета, Саратов, Россия;

Кузнецов С.П., д.ф.-м.н., профессор, Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия;

Ланда П.С., д.ф.-м.н., профессор, Московский государственный университет, Москва, Россия;

Литвак А.Г., академик, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия;

Мясин Е.А., к.т.н., Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, заведующий лабораторией, Фрязино, Россия;

Некоркин В.И., д.ф.-м.н., профессор, Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

Никитов С.А., чл.-корр. РАН, директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия;

Очкин В.Н., д.ф.-м.н., профессор, ФИАН, Москва, Россия;

Руденко О.В., академик РАН, проф., Московский государственный университет, Москва, Россия;

Сергеев А.М., чл.-корр. РАН, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия;

Филимонов Ю.А., к.ф.-м.н., директор Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия.

ПРОГРАММА
XI МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ
“ХАОТИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР”
ХАОС-2016
 (Саратов, пансионат “Волжские дали”, 3 – 8 октября 2016 года)

3 октября 2016 г., понедельник

09.00 – 13.00 **РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ**

15.30 – 16.00 **ОТКРЫТИЕ ШКОЛЫ**

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:

Фундаментальные проблемы нелинейной динамики

16.00 – 16.50 **Д.И. Трубецков** (СГУ, Саратов). Фрактальная геометрия в идеях, лицах и судьбах. Лекция 1.

17.00 – 17.50 **В.А. Царев** (СГТУ, Саратов). Фрактальная геометрия как основа для построения компактных многомодовых двухзачерных резонаторов для мощных многолучевых клистронов. 17

4 октября 2016 г., вторник

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:

Фундаментальные проблемы нелинейной динамики

09.00 – 09.50 **А.Л. Санин, А.А. Смирновский** (СПбПУ, Санкт-Петербург). 18
 Нелинейные осцилляторы Матве в формализме Шредингера-Ланжевена.

10.00 – 10.50 **М.В. Иванченко** (ННГУ, Н. Новгород) Вычислительная динамика генных сетей. 19

11.00 – 11.50 **Д.И. Трубецков** (СГУ, Саратов) Фрактальная геометрия в идеях, лицах и судьбах. Лекция 2.

12.00 – 12.50 **Е.Г. Трубецкова** (СГУ, Саратов) Фрактальное искусство идеях, лицах и судьбах.

СЕМИНАР:**Химерные состояния в ансамблях связанных осцилляторов****ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**

14.00 – 15.00 **В.С. Анищенко** (СГУ, Саратов). Механизмы образования и свойства химерных состояний в ансамблях не локально связанных хаотических осцилляторов.

15.15 – 17.00 УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

- 1 **Т.Е. Вадивасова**, И.А. Шепелев, А.С. Захарова (СГАУ, Самара) (СГУ, Саратов). Химерные режимы в кольце локально связанных осцилляторов. 20
- 2 **Н.И. Семенова**, А.С. Захарова, В.С. Анищенко, Э. Шелль (СГУ, Саратов). Химерные состояния в ансамбле возбудимых осцилляторов. 20
- 3 **В.В. Семенов**, А.С. Захарова, Ю.Л. Майстренко, Э. Шелль (СГУ, Саратов). Пространственно-временные структуры в динамике одиночной системы с запаздыванием. Переход регулярность-нерегулярность и индуцированные шумом эффекты. 21
- 4 **А.В. Слепнев**, А.В. Бух, Т.Е. Вадивасова (СГУ, Саратов). Особенности формирования химерных структур в ансамбле нелокально связанных генераторов Анищенко - Астахова. 22
- 5 **А.В. Шабунин** (СГУ, Саратов). Мультистабильность в ансамблях с далекодействующими связями. 23
- 6 **И.А. Шепелев**, А.В. Бух (СГУ, Саратов). Режимы химер в двумерном ансамбле кубических отображений с нелокальным взаимодействием. 24
- 7 **А.П. Четвериков**, М.Г. Веларде, В. Эбелинг (СГУ, Саратов). Взаимодействие квазиодномерных солитонов в треугольной молекулярной решетке и управляемый солитонный транспорт заряженных частиц. 24

17.15 – 19.00 УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**СЕКЦИЯ 1.****Нелинейная динамика информационных технологий, окружающей среды и общества**

- 1 **А.Н. Флейшман**, Т.В. Кораблина, Е.С. Смагина, С.А. Петровский, Д.Е. Иовин, А.А. Неретин (НИИ КПППЗ, Новокузнецк). Энтропия и DFA variability ритма сердца при дистантном прекондиционировании и ортостазе у здоровых молодых людей: методические и физиологические аспекты анализа. 25
- 2 **В.М. Еськов**, Ю.П. Зинченко, А.А. Хадарцев, О.Е. Филатова (СурГУ, Сургут). Закономерность статистической неустойчивости биосистем-complexity. 26
- 3 **Ю.В. Андреев** (МФТИ, Долгопрудный). Моделирование ассоциативной памяти с помощью хаотических отображений. 28
- 4 **Д.Г. Захаров** (ИПФ РАН, Н. Новгород). Смена класса возбудимости дофаминергических нейронов под действием синаптических токов. 28

-
- | | | |
|---|--|----|
| 5 | М.А. Мищенко (ННГУ, Н. Новгород). Модель движения взгляда при свободном обзоре изображений. | 29 |
| 6 | А.А. Курилович (МФТИ, Долгопрудный). Анализ отделяющихся водоемов Белого моря с позиции теории бифуркаций. | 30 |
| 7 | К.С. Непейна (ИДГ, Москва). Оценка динамических параметров сейсмических сигналов на записях малоапертурных групп. | 31 |
| 8 | А.А. Скакун , Д.М. Волобуев (ГАО РАН, Санкт-Петербург). Определение направления причинно-следственной связи в динамических системах: приложение к палеоклимату. | 32 |

17.15 – 19.00 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

СЕКЦИЯ 2.

Синхронизация

- | | | |
|---|---|----|
| 1 | К.Н. Алешин , В.В. Матросов, К.Г. Мишагин (ННГУ, Н. Новгород). Синхронизация спинового наноосциллятора внешним источником спиновых волн. | 33 |
| 2 | С.В. Астахов, А.П. Гулай , В.В. Астахов (СГТУ, Саратов). Синхронизация и мультистабильность в системе двух осцилляторов ван дер Поля с запаздывающим взаимодействием. | 34 |
| 3 | В.В. Зайцев , И.В. Сулов (СамГУ, Самара). Синхронизация кольцевого осциллятора ван дер Поля. | 35 |
| 4 | А.В. Григорьев , А.О. Мантуров (СГУ, Саратов). Синхронная динамика копирования ансамбля фрагментов ДНК. | 36 |
| 5 | М.В. Сысоева , М.К. Smyk, G. van Luijtelaaar, И.В. Сысоев (СГТУ, Саратов). Переключения между режимами поведения животных - генетических моделей абсансной эпилепсии. | 37 |
| 6 | И.В. Сысоев , В.И. Пономаренко (СГУ, Саратов). Метод восстановления ансамблей нейроподобных осцилляторов с запаздываниями в связях по временным рядам. | 38 |
| 7 | М.В. Корнилов , И.В. Сысоев (СГУ, Саратов). Влияние фильтрации общей низкочастотной помехи на определение направленной связи методом нелинейной причинности по Грейнджеру. | 39 |

20.00 – 20.50 **В.Д. Шалфеев** (ННГУ, Н. Новгород) История развития синхронизации в Нижегородском университете.

 5 октября 2016 г., среда

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:

Нелинейная динамика электронно-волновых, магнитоэлектронных и твердотельных систем СВЧ электроники и радиофизики, а также устройств оптического диапазона

- | | | |
|---------------|--|----|
| 09.00 – 09.50 | Н.С. Гинзбург (ИПФ РАН, Н. Новгород). Солитоны в электронно-волновых системах. | |
| 10.00 – 10.50 | Ю.В. Новожилова , Г.Г. Денисов, М.Ю. Глявин, В.Л. Бакунин, А.П. Фокин, М.М. Мельникова, Н.М. Рыскин (ИПФ РАН, Н. Новгород; СГУ, Саратов). Стабилизация частоты гиротрона под воздействием внешнего монохроматического сигнала или отраженной волны. | 40 |
| 11.00 – 11.50 | Н.Г. Макаренко (ГАО РАН, Санкт-Петербург) Топология случайных полей и изображений. | 41 |
| 12.00 – 12.50 | С.В. Гонченко (ННГУ, Н. Новгород). Pseudohyperbolic attractors. | 41 |

17.00 – 19.00 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

СЕКЦИЯ 3а.

Нелинейная динамика электронно-волновых, магнитоэлектронных и твердотельных систем СВЧ электроники и радиофизики, а также устройств оптического диапазона

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | С.В. Гришин , Т.М. Медведева, Д.В. Романенко, И.В. Сысоев, Е.П. Селезнев, С.А. Никитов (СГУ, Саратов). Генерация хаотических солитоноподобных импульсов в активном кольцевом резонаторе с магнитным квазикристаллом. | 42 |
| 2 | О.В. Матвеев , М.А. Морозова (СГУ, Саратов). Нелинейное переключение в структуре связанных магнитных кристаллов. | 43 |
| 3 | Е.С. Павлов , А.В. Садовников, Ю.А. Филимонов (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Нелинейные спиновые волны в магнитных микроструктурах. | 44 |
| 4 | М.Н. Вилков , Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, И.В. Зотова, А.С. Сергеев (ИПФ РАН, Н. Новгород). Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке gyro-LBV, работающих в режимах усиления и нелинейного подавления. | 46 |
| 5 | В.В. Зверев , Б.Н. Филиппов, М.Н. Дубовик (УрФУ, Екатеринбург). Динамические перестройки топологической структуры намагниченности в движущихся границах магнитных доменов (численное моделирование). | 46 |
| 6 | С.П. Козлов , Е.А. Мясин (ФИРЭ РАН, Фрязино). Об особенностях хаотического поведения ЛПД при внешнем гармоническом воздействии. | 47 |
| 7 | А.С. Гонченко (ННГУ, Н. Новгород). Примеры сценариев возникновения хаоса в трехмерных неориентируемых отображениях. | 48 |

17.00 – 19.00 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

СЕКЦИЯ 36.

Нелинейная динамика электронно-волновых, магнитоэлектронных и твердотельных систем СВЧ электроники и радиофизики, а также устройств оптического диапазона

- 1 **Р.М. Розенталь**, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев (ИПФ РАН, Н. Новгород). Генерация широкополосного хаотического излучения миллиметрового диапазона в гироусилителях с запаздывающей обратной связью. 49
- 2 **Д.В. Романенко**, Т.М. Медведева, В.Н. Скороходов, И.В. Сысоев, Б.С. Дмитриев, С.В. Гришин (СГУ, Саратов). Электронное управление хаотическим сигналом в параметрическом спин-волновом генераторе хаоса на основе клистрона-усилителя. 50
- 3 Б.С. Дмитриев, **С.А. Садовников**, В.Н. Скороходов (СГУ, Саратов). Исследование свойств кольцевого широкополосного автогенератора хаоса микроволнового диапазона. 51
- 4 **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов, А.В. Кожевников, А.И. Стогний (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Параметрические процессы в пленках железо-иттриевого граната на подложках кремния. 52
- 5 **А.В. Титов** (СГУ, Саратов). Применение волнового метода Солнцева в нелинейной теории ЛБВ.
- 6 **Н.С. Фролов**, А.Е. Храмов, А.А. Короновский (СГУ, СГТУ, Саратов). Условия развития диокотронной неустойчивости в сжатом состоянии релятивистского электронного пучка. 53
- 7 **М. Fuks**, E. Schamiloglu, Н. Ковалев (University of New Mexico, Albuquerque, USA; ОФПиЭБМ, ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия). Развитие релятивистских магнетронов. 54
- 8 **А.С. Дмитриев**, Е.В. Ефремова, М.Ю. Герасимов, В.В. Исков (ИРЭ РАН, МФТИ, Москва). Радиоосвещение и источники для него на основе миниатюрных СВЧ генераторов динамического хаоса. 56

6 октября 2016 г., четверг

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:

**Распределенные системы и ансамбли связанных элементов
со сложной динамикой**

- | | | |
|---------------|--|----|
| 09.00 – 09.50 | В.И. Некоркин (ИПФ РАН, Н. Новгород). Динамические сети в исследовании активности нейронных систем. | |
| 10.00 – 10.50 | Г.В. Осипов (ННГУ, Н. Новгород) Возбуждение пространственно-временных структур в упругих электрически активных сократимых волокнах. | |
| 11.00 – 11.50 | А.Е. Храмов (СГТУ, Саратов) Predicting the Unpredictable: New Possibilities for Absence Seizure Control. | 57 |
| 12.00 – 12.50 | А.С. Дмитриев (ИРЭ РАН, Москва). Беспроводные сверхширокополосные активные сети на основе хаотических радиоимпульсов. | 58 |

14.30 – 16.30 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

СЕКЦИЯ 4а.

**Распределенные системы и ансамбли связанных элементов
со сложной динамикой**

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | К.Н. Алешин , В.В. Матросов (ННГУ, Н. Новгород). Динамика ансамблей фазовых систем синхронизации с однонаправленными связями. | 58 |
| 2 | А.И. Калякулина , Е.В. Панкратова (ННГУ, Н. Новгород). Развитие хаоса и подавление клеточной активности в сети динамически связанных нейроподобных элементов. | 59 |
| 3 | Д.В. Кирсанов , В.О. Недайвозов, В.В. Макаров, А.Е. Храмов (СГТУ, Саратов). Анализ эволюции структуры конкурирующих слоев многослойной адаптивной сети осцилляторов. | 60 |
| 4 | М.Б. Кузнецов , А.А. Полежаев (ФИ РАН, Москва). Формирование структур в предбифуркационной области параметров в случае субкритической бифуркации Тьюринга. | 61 |
| 5 | Д.Д. Кульминский , В.И. Пономаренко, А.С. Караваев, В.С. Хорев, М.Д. Прохоров (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Коллективная динамика идентичных бистабильных автогенераторов с запаздывающей обратной связью, связанных через общее поле. | 62 |

14.30 – 16.30 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

СЕКЦИЯ 4б.

**Распределенные системы и ансамбли связанных элементов
со сложной динамикой**

-
- | | | |
|---|---|----|
| 1 | А.Б. Адилова , С.А. Герасимова, Н.М. Рыскин (СГУ, Саратов). Бифуркационный анализ взаимной синхронизации двух осцилляторов, связанных с задержкой. | 64 |
| 2 | П.В. Купцов (СГТУ, Саратов). Унификация процедуры вычисления матриц Якоби систем с высокой размерностью фазового пространства на основе сетевого формализма. | 63 |
| 3 | С.С. Волощук (СГУ, Саратов). Некоторые результаты нелинейной нестационарной теории двухлучевой лампы бегущей волны и электронноволновой лампы. | 45 |
| 4 | В.О. Недайвозов , Д.В. Кирсанов, В.В. Макаров, А.Е. Храмов (СГТУ, Саратов). Исследование синхронизации в сети осцилляторов Курамото с использованием технологии параллельных вычислений Nvidia CUDA. | 65 |
| 5 | И.А. Романец , Ф.Ю. Копылов, Г.Т. Гурия (ГНЦ РАМН, Москва). Использование топологических методов в задаче мониторинга критических изменений кардиодинамики человека. | 66 |
| 6 | И.И. Юсипов , М.В. Иванченко (ННГУ, Н. Новгород). Нелинейные характеристики в линейных моделях взаимодействующих квантовых частиц. | 67 |

17.00 – 19.00 **Стендовые доклады**

- | | | |
|----|---|----|
| 1 | О.Г. Антоновская (ННГАСУ, Н. Новгород). Хаотизация динамических режимов в задаче принудительной синхронизации как следствие применения асимптотических методов при построении точечного отображения. | 68 |
| 2 | О.Г. Антоновская , В.И. Горюнов (ННГАСУ, Н. Новгород). Метод точечных отображений в динамике системы синхронизации с комбинированной широтно-импульсной модуляцией управляющего сигнала. | 69 |
| 3 | А.А. Бадарин , С.А. Куркин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов (СГУ, Саратов). Исследование процессов взаимодействия релятивистских электронных пучков в многолучевом виркаторе с использованием CST Particle Studio. | 70 |
| 4 | М.И. Балакин , С.В. Астахов, А.А. Дворак, А.А. Кочанов, В.В. Астахов (СГТУ, Саратов). Структура пространства параметров модели оптоэлектронного осциллятора. | 71 |
| 5 | Ю.В. Башкатова , Д.Ю. Филатова, В.В. Григоренко, И.В. Ключ (СурГУ, Сургут). Стохастическая неустойчивость параметров кардиоинтервалов. | 72 |
| 6 | С.Т. Белякин , С.П. Кузнецов (МГУ, Москва). Управление аттрактора Плыкина методом Пирагаса. | 73 |
| 7 | Д.К. Берестин , Ю.В. Вохмина, А.А. Алиев, И.Г. Курманов (СурГУ, Сургут). Компартиментно-кластерное моделирование хаотической динамики параметров тремора. | 74 |
| 8 | В.Г. Богаевская (ЯГУ, Ярославль). Компьютерный анализ D-разбиения. | 75 |
| 9 | Н.В. Болдырева , В.В. Матросов (ННГУ, Н. Новгород). Моделирование динамики кальция в цепочке астроцитов. | 76 |
| 10 | М.И. Болотов , Г.В. Осипов (ННГУ, Н. Новгород). Коллективная динамика ротаторов, связанных общим полем. | 77 |

- 11 **Д.И. Большаков**, М.А. Мищенко (ННГУ, Н. Новгород). Аппаратная модель нейрона с импульсной и пачечной динамикой. 78
- 12 **О.С. Вершинина**, М.В. Иванченко, С.В. Денисов (ННГУ, Н. Новгород). Локализация в периодически модулируемых решетках с гладким беспорядком. 79
- 13 **Г.А. Габриелян**, А.Р. Сафин, М.И. Бичурин, Р.В. Петров, А.С. Татаренко (НИУ МЭИ, Москва). Нейроморфные сети на основе взаимосвязанных спиновых наноосцилляторов. 80
- 14 **Н.С. Гинзбург**, Е.Р. Кочаровская (ИПФ РАН, Н. Новгород). Квазилинейная теория терагерцовых ЛСЭ, основанных на вынужденном рассеянии некогерентной волны накачки сильноточным релятивистским электронным пучком. 81
- 15 **А.А. Грачев**, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, Ю.П. Шараевский (СГУ, Саратов). Генерация темных и светлых солитонов в решетке латерально связанных магнитных микроволноводов. 81
- 16 **А.А. Грищенко**, Г.Д. Кузнецова, И.В. Сысоев, К.М. Ван Рейн (СГУ, Саратов). Уменьшение нелинейной корреляции между каналами внутричерепных ЭЭГ крыс перед началом пик-волновых разрядов. 82
- 17 **А.А. Дворак**, С.В. Астахов, В.В. Астахов (СГТУ, Саратов). Механизм формирования мультистабильности в кольцевом генераторе из однонаправленно связанных осцилляторов Тоды. 83
- 18 **В.М. Дорошенко**, С.П. Кузнецов (СГУ, Саратов). Генератор грубого хаоса на основе эффекта гибели колебаний. 84
- 19 **В.М. Еськов**, Т.В. Гавриленко, В.В. Еськов, Ю.В. Вохмина (СурГУ, Сургут). Граница применимости теоремы Такенса в моделировании complexity. 86
- 20 **С.А. Захаров**, А.П. Кузнецов, Н.В. Станкевич (СГТУ, Саратов). Взаимная синхронизация квазипериодических колебаний. 87
- 21 Е.Ж. Байкенов¹, И.М. Изможеров¹, **В.В. Зверев¹**, Б.Н. Филиппов^{1,2} 88
(¹УрФУ; ²ИФМ УрО РАН, Екатеринбург). Влияние тепловых флуктуаций на динамику топологических солитонов в ферромагнитных пленках.
- 22 **И.М. Изможеров¹**, Е.Ж. Байкенов¹, В.В. Зверев¹, Б.Н. Филиппов^{1,2} 89
(¹УрФУ; ²ИФМ УрО РАН, Екатеринбург). Динамика топологических солитонов в постоянном внешнем магнитном поле в ферромагнитных образцах.
- 23 **О.Б. Исаева**, М.А. Обычев, Д.В. Савин (СГУ, Саратов). Модель неявного отображения, демонстрирующая переход от диссипативной комплексной аналитической динамики к консервативной. 89
- 24 **О.С. Каткова**, А.Р. Сафин (НИУ МЭИ, Москва). Источник микроволновых колебаний на основе гетеропереходов ферромагнетик-сверхпроводник. 90
- 25 **А.Д. Колоскова**, О.И. Москаленко (СГУ, Саратов). Оценка степени перемежающейся фазовой синхронизации в реальной нейрофизиологической системе. 91
- 26 **П.В. Краузин**, М.Т. Краузина (ПГНИУ, Пермь). Вейвлет-анализ температурных колебаний магнитной жидкости в условиях тепловой конвекции. 92
- 27 **В.П. Круглов**, С.П. Кузнецов, Л.М. Хаджиева (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Соленоид Смейла - Вильямса в системе двух связанных осцилляторов с гомоклинической "восьмеркой". 93

-
- | | | |
|----|---|-----|
| 28 | С.Н. Крылов , Д.А. Смирнов, Б.П. Безручко (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Диагностика направления связи между осцилляторами на основе оценок причинности по Грейнджеру по временным рядам при наличии скрытых переменных. | 94 |
| 29 | А.А. Мартышкин , А.В. Садовников, Д.В. Романенко (СГУ, Саратов). Динамика спиновых волн в L-образном магнитном микроволноводе. | 95 |
| 30 | Т.М. Медведева , М.В. Сысоева, И.В. Сысоев (СГУ, Саратов). Моделирование пик-волновых разрядов с помощью сети нейронных осцилляторов. | 96 |
| 31 | С.А. Одинцов , А.В. Садовников, А.Ю. Шараевская, Е.Н. Бегинин, Ю.П. Шараевская (СГУ, Саратов). Динамика спиновых волн в системе вертикально связанных магнетонно-кристаллических решеток. | 97 |
| 32 | А.Г. Петрик , А.Е. Дубинов, С.А. Куркин, Н.С. Фролов (СГТУ, Саратов). Пучково-плазменная неустойчивость в заряженной электронной плазме в отсутствие ионов. | 98 |
| 33 | В.П. Пономаренко (ННГУ, Н. Новгород). Сложные колебания в системах с частотным и фазовым управлением. | 99 |
| 34 | А.В. Савин , Д.В. Савин, А.П. Кузнецов (СГУ, Саратов). Нетривиальные аттракторы в слабодиссипативном отображении Икеды с квазипериодическим воздействием. | 100 |
| 35 | О.Б. Исаева, С.П. Кузнецов, Д.В. Савин , Е.П. Селезнев (СГУ, Саратов). О синхронизации генераторов гиперболического хаоса и широкополосной коммуникации на ее основе. | 101 |
| 36 | А.О. Сельский (ННГУ, Н. Новгород). Метод обучения в модели нейронных сетей с гетероклиническим контуром. | 102 |
| 37 | А.О. Сельский (СГУ, Саратов). Транспорт заряда в полупроводниковых сверхрешетках в присутствии возмущения концентрации легирующей примеси. | 103 |
| 38 | Л.В. Савкин (ПАО "Радиофизика ИРЭ РАН, Москва). Разработка методов хаотической модуляции, основанных на "лабиринтном" хаосе Томаса. | 105 |
| 39 | Л.В. Савкин (ПАО "Радиофизика ИРЭ РАН, Москва). Об одном классе циркулянтных систем и вопросы прецизионности циркулянтных генераторов хаоса. | 106 |
| 40 | А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, Ю.В. Седова (СФ ИРЭ РАН, Саратов). О маятниковой модели с бесконечным числом состояний равновесия и квазипериодической динамикой. | 107 |
| 41 | А.П. Кузнецов, Ю.В. Седова (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Динамика простейшей дискретной модели с трехчастотной квазипериодичностью и квазипериодическими бифуркациями. | 108 |
| 42 | Е.В. Сидак , Д.А. Смирнов, Б.П. Безручко (СГУ, Саратов). Оценка связей между осцилляторами по коротким временным рядам на основе моделирования фазовой динамики. | 109 |
| 43 | Е.В. Фельк , С.П. Кузнецов, А.В. Савин (СГУ, Саратов). Диффузия в конфигурационном пространстве системы двух связанных ротаторов. | 110 |
| 44 | Д.Ю. Филатова , В.В. Еськов, Т.В. Стрельцова, Н.Ш. Алиев (СурГУ, Сургут). Границы стохастического и хаотического подходов в оценке параметров движений. | 111 |

-
- 45 **А.А. Харченко**, А.Е. Храмов, В.В. Грубов, Е.Ю. Ситникова (СГУ, Саратов). Оценка размеров низкочастотных предшественников различных типов ритмической активности в нейронном ансамбле крыс линии WAG/Rij. 112
- 46 **В.С. Хорев**, А.С. Караваев, В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров (СГУ, Саратов). Исследование конфиденциальности хаотической системы передачи информации на генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки. 113
- 47 **А.Б. Хутиева**, И.Е. Ревин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин (СГУ, Саратов). Дифракция магнитостатической волны на обрыве планарного ЖИГ волновода при различных углах намагничивания. 114
- 48 **А.Ж. Чекмарева**, А.П. Кузнецов, А.В. Савин (СГУ, Саратов). Образование аттракторов в системе фазовых уравнений с симметрией при ее нарушении. 115
- 49 **А.Р. Шакиров**, А.А. Кренц, Р.А. Чертовских, Д.А. Анчиков (СамНИУ, Самара). Возникновение многочастотных режимов в динамике широкоапертурного лазера. 116
- 50 С.Е. Курушина, **Е.А. Шаповалова**, Ю.А. Шаповалова (СамНИУ, Самара). Переход "порядок-беспорядок" в пространственно распределенном стохастическом брасселяторе. 117
- 51 **А.Ю. Шараевская**, Е.Н. Бегинин (СГУ, Саратов). Дефектные моды в связанных магнитных кристаллах. 117
- 52 О.В. Дрогайцева, **А.О. Мантуров** (СГТУ, Саратов). SPICE-модели нейронов, допускающие построение сетей с полносвязной топологией. 118
- 53 **А.В. Костюк**, Е.Н. Бегинин, А.В. Садовников (СГУ, Саратов). Дисперсионные характеристики медленных электромагнитных волн в структуре феррит-полупроводниковая решетка. 120
- 54 **А.В. Андреев**, О.И. Москаленко, А.А. Короновский, А.Е. Храмов (СГУ, Саратов). Гиперхаотическая динамика и управление ею в цепочках и решетках ридберговских атомов. 121
- 55 **А.Г. Коротков**, А.О. Казаков, Г.В. Осипов (ННГУ, Н. Новгород). Последовательная активность в ансамбле из элементов Фитцхью-Нагумо. 122
- 56 **М.О. Журавлев**, А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов (СГТУ, Саратов). Исследование характеристик индуцированной шумом перемежаемости в мультистабильных системах на примере осциллятора Дуффинга. 122
- 57 **М.О. Журавлев**, А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов (СГТУ, Саратов). Исследование синхронизации, возникающей при взаимодействии симметричных структур в гипоталамусе грызунов, находящихся под действием общей анестезии. 123
- 58 **Т.А. Леванова**, А.Г. Коротков, А.О. Казаков, Г.В. Осипов (ННГУ, Н. Новгород). Динамика ансамбля химически и электрически связанных осцилляторов Ван дер Поля. 123
- 59 **В.Ю. Мусатов**, С.В. Пчелинцева, А.Е. Руннова, В.С. Дыкин (СГТУ, Саратов). Исследование возможностей методов на базе искусственных нейронных сетей и метода главных компонент для классификации состояний мозга по данным ЭЭГ. 125

-
- | | | |
|----|---|-----|
| 60 | А.Е. Руннова , М.О. Журавлев (СГТУ, Саратов). Методы нелинейной физики на основе непрерывного вейвлет-преобразования в задачах разработки нейроинтерфейсов и устройств "мозг-компьютер". | 127 |
| 61 | В.В. Грубов , С.В. Пчелинцева (СГТУ, Саратов). Адаптивная фильтрация внешних помех и шумов в многоканальных ЭЭГ человека на базе преобразования Гильберта-Хуанга. | 128 |
| 62 | М.О. Журавлев , А.Е. Руннова, Е.Ю. Ситникова, А.Е. Храмов (СГТУ, Саратов). Метод линейной фильтрации физиологических сигналов в ЭЭГ данных человека, регистрируемых при сложной когнитивной динамики различных типов. | 130 |
| 63 | А.Н. Литвиненко , Р. Химин, В. Тиберкевич, А.Н. Славин, С.В. Гришин (СГУ, Саратов, Россия; Оклендский университет, Мичиган, Рочестер, США). Управление хаотической динамикой магнитоакустического генератора за счет упругих деформаций. | 131 |
| 64 | С.В. Гришин (СГУ, Саратов). Анизотропное распространение медленных и быстрых волн намагниченности в микроволновом и терагерцовом диапазонах частот. | 132 |
-

20.00

Вечер памяти Ю.А. Данилова.

 7 октября 2016 г., пятница

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:
Фундаментальные проблемы нелинейной динамики (нелинейные колебания и волны, хаос и образование структур)

- | | | |
|---------------|--|-----|
| 09.00 – 09.50 | В.В. Астахов (СГТУ, Саратов). Бифуркационные механизмы формирования мультистабильности в многомодовых генераторах. | |
| 10.00 – 10.50 | С.П. Кузнецов (СФ ИРЭ РАН, Саратов; УдГУ, Ижевск). От динамики Аносова геодезического потока на поверхности отрицательной кривизны к электронному генератору грубого хаоса. | |
| 11.00 – 11.50 | Ю.А. Филимонов , С.Л. Высоцкий, Г.М. Дудко, А.В. Кожевников, Е.С. Павлов, В.К. Сахаров, Ю.В. Хивинцев, А.В. Садовников, С.А. Никитов (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Нелинейные магнитные колебания и волны в магнитных микро- и наноструктурах. | 133 |

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**Нелинейная динамика информационных технологий,
окружающей среды и общества**14.30 – 15.20 **А.В. Титов** (СГУ, Саратов). Двухпучковая неустойчивость.15.30 – 16.20 **Г.Т. Гурия** (ГНЦ РАМН, Москва). Образование структур в
сердечно-сосудистой системе человека.16.30 – 18.45 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ****СЕКЦИЯ 6а.****Фундаментальные проблемы нелинейной науки**

- 1 **Е.А. Гринес**, Г.В. Осипов (ННГУ, Н. Новгород). Построение простейших 133
примеров трчхмерных потоков с двумя гетероклиническими циклами.
- 2 **А.Ю. Жалнин**, С.П. Кузнецов (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Странные нехао- 134
тические автоколебания в системе трчх механических ротаторов.
- 3 **В.В. Зайцев**, А.Н. Шилин (СамГУ, Самара). Томсоновские АКС в нелиней- 135
ной динамике с дискретным временем.
- 4 **И.С. Кащенко** (ЯГУ, Ярославль). Локальная динамика системы с двумя 136
большими пропорциональными запаздываниями.
- 5 **В.В. Клиньшов** (ИПФ РАН, Н. Новгород). Мультистабильные биения в 137
автоколебательных системах с импульсной запаздывающей обратной связью.
- 6 **О.В. Масленников**, В.И. Некоркин (ИПФ РАН, Н. Новгород). Аттракторы 138
релаксационных отображений с хаотической динамикой на быстром времен-
ном масштабе.
- 7 **Д.С. Рящиков**, Н.Е. Молевич, Д.И. Завершинский (СамНИУ, Самара). 139
Эволюция шума в плазменных средах в постоянном магнитном поле.
- 8 **А.О. Казаков** (НИУ ВШЭ, Н. Новгород). Странные аттракторы в динамике 140
твёрдого тела.

16.30 – 18.45 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ****СЕКЦИЯ 6б.****Фундаментальные проблемы нелинейной науки**

- 1 **В.М. Аникин**, С.С. Аркадакский, С.Н. Купцов, А.С. Ремизов (СГУ, Са- 141
ратов). Аналитическое решение спектральной задачи для оператора Перро-
наЦФробениуса кусочно-линейных хаотических отображений с произволь-
ным наклоном полных ветвей без “щелей”
- 2 **О.В. Астахов**, С.В. Астахов, Е.П. Селезнев, В.В. Астахов (СГУ, Саратов). 141
Затягивание частоты и возникновение хаоса в генераторе Ван дер Поля с
дополнительным контуром.
- 3 **В.А. Гайко** (ОИПИ, Минск, Беларусь). О глобальном бифуркационном ана- 142
лизе полиномиальных динамических систем низкой размерности.

-
- | | | |
|---|---|-----|
| 4 | С.Д. Глызин , А.Ю. Колесов, Н.Х. Розов (ЯГУ, Ярославль). Бифуркация голубого неба и неклассические релаксационные колебания в моделировании кардиоритмов. | 143 |
| 5 | С.Д. Глызин , Е.А. Марушкина (ЯГУ, Ярославль). Запаздывающее взаимодействие пары сингулярно возмущенных осцилляторов. | 144 |
| 6 | Д.В. Горбунов , Т.В. Стрельцова, А.А. Пахомов, И.Н. Самсонов (СурГУ, Сургут). Теорема Гленсдорфа-Пригожина в описании треморограмм при физических возмущениях. | 145 |
| 7 | Г.М. Чечин , Д.А. Сизинцев, О.А. Усольцев (ЮФУ, Ростов-на-Дону). Нелинейные атомные колебания и фазовые переходы в растянутых углеродных цепочках. | 146 |
| 8 | С.А. Щербинин , Г.М. Чечин, Д.С. Рябов (ЮФУ, Ростов-на-Дону). Буши нелинейных нормальных мод в монослойном графене. | 147 |
-

8 октября 2016 г., суббота

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:

Нелинейная динамика электронно-волновых, магнитоэлектронных и твердотельных систем СВЧ электроники и радиофизики, а также устройств оптического диапазона

- | | | |
|---------------|---|-----|
| 09.00 – 09.50 | Ю.П. Шараевский , Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, С.А. Никитов, А.В. Садовников, Д.В. Романенко (СГУ, Саратов). Нелинейные волновые процессы в магнитных микроструктурах и функциональные элементы магноники. | 148 |
|---------------|---|-----|

Фрактальная геометрия как основа для построения компактных многомодовых двухзачерных резонаторов для мощных многоручевых клистронов

Царев В.А.

СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов

Элементы плоской фрактальной геометрии, основы которой были заложены Мандельбротом [1], широко используются в настоящее время во фрактальной электродинамике [2] для создания компактных широкополосных антенн [3] и двухполосных фильтровых систем [4,5]. Однако при создании двухмодовых резонансных систем СВЧ приборов клистронного типа (усилителей, генераторов или умножителей частоты), элементы фрактальной геометрии ранее практически не использовались [6]. Целью работы являлось исследование возможности независимого управления спектром частот основного и высших видов колебаний в двухзачерных квазифрактальных резонаторах (ДКФР) многоручевых клистронов длинноволнового и средневолнового диапазонов частот для реализации высокоэффективного режима взаимодействия с электронным потоком на кратных резонансных частотах. Основными признаками предложенных квазифрактальных резонансных систем являются:

1. наличие, независимо существующих в одном объеме резонатора, резонансных систем, одновременно возбуждаемых, на основном (ТЕМ- противофазном) виде колебаний, частота которого определяется и размерами внутренних резонансных проводников древовидной формы, и на высших частотах, определяемых формой и размерами корпуса резонатора;
2. выбор в качестве исходных элементов при формировании звездообразной "кроны" (путем симметричного размножения "веток") многогранников;
3. выбор N дискретных пролетных труб в качестве "листьев" число которых определяет угол наклона между "ветками" и равно числу углов условного правильного многогранника, установленного в плоскости "кроны" по центру ствола;
4. наличие электронной нагрузки со стороны многоручевого электронного потока, шунтирующей резонатор на рабочих частотах.

В результате 3-D численного моделирования новых типов ДКФР установлена возможность существенного улучшения комплекса электрических и массогабаритных параметров мощных многоручевых клистронов дециметрового диапазона длин волн с резонансной системой, выполненной на основе таких резонаторов, по сравнению с известными конструкциями приборов, выполненных на основе одномодовых коаксиальных однозачерных резонаторов. Найдены оптимальные режимы работы таких клистронов и определены условия, при которых отсутствует самовозбуждение приборов с новой резонаторной системой.

1. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы: [пер. с англ.] / Б. Мандельброт. - М.: Институт компьютерных исследований, 2002. - 656 с.
2. Jaggard, D.L. Recent Advances in Electromagnetic Theory. On Fractal Electrodynamics Ch. / D.L. Jaggard. - N.Y.: Springer - Verlag, 1990. - 183-224 P.

3. Потапов, А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации / А.А. Потапов. - М.: Логос, 2002. - 664 с.
4. Ye C.S., Su Y.K., Weng M.H., Wu H.W. *Microwave Opt. Tech. Letters* **51** 5 (2009) 1358-1361
5. Jarry, P. Design and Realizations of Miniaturized Fractal Microwave and RF Filters / P. Jarry, J. Beneat. - Hoboken: J. Wiley & Sons: IEEE Press, 2009. - 194 p
6. Царев, В.А. Электровакуумные СВЧ-приборы клистронного типа с многомодовыми резонаторами / В.А. Царев // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2012: материалы 10-й юбилейной междунар. науч.-техн. конф., г. Саратов, 19-20 сент. 2012 г. / СГТУ. - Саратов, 2012. - С. 104-113.

Нелинейные осцилляторы Матье в формализме Шредингера-Ланжевена

Санин А.Л., Смирновский А.А.

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург

В настоящее время квантовые осцилляторы Дуффинга с вынужденной силой или Матье-Дуффинга с параметрической силой являются объектами разнообразных исследований, как аналитических и численных, так и экспериментальных. В развитие этой проблематики в рамках настоящей работы проведены исследования квантового осциллятора Матье с потенциалом четвертой степени, трением и гауссовым белым шумом. Рассматриваемый потенциал определяет стационарную и параметрическую кубические силы. Для изучения динамических свойств осциллятора в работе используется формализм Шредингера-Ланжевена; проводится численное интегрирование уравнения Шредингера-Ланжевена-Костина при заданных начальном и граничных условиях на волновую функцию. Выполнены расчеты временных реализаций средней координаты и ее частотных спектров, произведений стандартных отклонений координаты и скорости, фазовых траекторий. В классическом пределе рассматриваемый осциллятор описывается стандартными уравнениями Ланжевена.

Если параметрическая, диссипативная и ланжевенская силы отсутствуют, мы имеем осциллятор с кубической силой, спектр энергий для которого является неэквидистантным; частоты осциллятора совпадают с частотами переходов между соседними уровнями. В режиме слабого возбуждающего импульса число спектральных компонент мало; с увеличением амплитуды импульса число спектральных компонент возрастает, а сами компоненты смещаются по спектру в сторону более высоких частот. При включении параметрической силы, но без трения и шума, характер временных реализаций для средней координаты усложняется, появляются дополнительные спектральные компоненты на комбинационных частотах, обусловленные состояниями Флоке; число этих дополнительных компонент зависит от амплитуды параметрической силы. При ее увеличении происходит перераспределение энергии по спектру частот для средней координаты. Если амплитуда параметрической силы превышает некоторое критическое значение, структура частотных спектров претерпевает новые изменения: возникают частоты, соответствующие удвоениям и утроениям периода параметрической силы. Анализ фазовых траекторий на плоскости “средняя координата — средняя скорость” позволяют утверждать, что колебания являются

квазипериодическими. Во всех режимах введение трения приводит к затуханию колебаний. Квантовый осциллятор Матье с трением, рассматриваемый в данной работе, является обобщением классического из [1].

Влияние гауссова белого шума на квантовый осциллятор Матье исследовалось для двух режимов колебаний: без трения и с умеренным значением коэффициента трения. В первом случае, при некоторой интенсивности шума происходит существенное усиление спектральной компоненты на учетверенной частоте параметрической силы вместе с соседними компонентами на комбинационных частотах. С ростом шума наиболее эффективные спектральные компоненты смещаются в сторону высоких частот. Совместное действие трения и шума ослабевает колебания осциллятора.

1. Bartuccelli M.V., Beretti A., Deane J.H.B., Gentile G., Gourley S.A. Nonlinear analysis. V9, N5, 2014, p.1966-1988.

Вычислительная динамика генных сетей

Иванченко М.В.

Нижегородский государственный университет, Нижний Новгород

Обработка информации и когнитивные процессы происходят в разнообразных природных и искусственных системах. Вычислительные устройства и их элементы реализованы на кремниевых чипах, в то время как биологический “компьютер” – мозг, состоит из живых клеток и молекул. В то же время становится все более ясным, что сложные процессы обработки информации не ограничиваются нейронными системами. Среди наиболее ярких примеров следует отметить систему приобретенного иммунитета и культуры искусственно модифицированных бактерий. Более того, вычислительные процессы происходят и на внутриклеточном уровне регуляторных и сигнальных путей. По-видимому, за сложной функциональностью живых систем стоят уникальные вычислительные возможности ансамблей “элементарных” биологических цепей.

В лекции будут рассмотрены принципы, лежащие в основе динамики генных сетей, концепция биомолекулярных вычислений, а также будет дан обзор последних достижений в этой области. В частности, будет продемонстрировано, что, используя простейшие синтетические генные сети, можно построить распределенную систему, реализующую принципы машинного обучения и способную решать задачи классификации для весьма общего класса входных химических сигналов.

1. Kanakov O., Kotelnikov R., Alsaedi A., Tsimring L., Huerta R., Zaikin A., Ivanchenko M. *PLoS ONE* **10** (2015) e0125144.
2. Didovyk A., Kanakov O.I., Ivanchenko M.V., Hasty J., Huerta R., and Tsimring L. *ACS Synth. Biol.* **4** (2015) 72.

Химерные режимы в кольце локально связанных осцилляторов

Вадивасова Т.Е., Шепелев И.А., Захарова А.С.

СарГУ, Саратов; Technical University, Berlin

Важной проблемой в изучении химерных режимов является установление роли различных типов связи в реализации сложных пространственных структур. До недавнего времени считалось, что химерные структуры возникают только в ансамблях с нелокальным взаимодействием элементов. Однако недавно появились работы, указывающие на то, что химеры могут существовать и при локальной связи [1, 2, 3]. В настоящей работе предложена модель осцилляторного ансамбля с локальным взаимодействием, в которой реализуются химерные структуры. При создании модели использовалась аналогия между кольцом осцилляторов с однонаправленным взаимодействием и единичным осциллятором с цепочкой запаздывающей обратной связи, для которого установлено существование виртуальных химер [4,5]. Модель представляет собой кольцо линейных диссипативных осцилляторов, связанных однонаправленной нелинейной локальной связью. Рассматривается также влияние диффузионной компоненты взаимодействия.

Численное исследование предложенной модели ансамбля с локальным взаимодействием выявило существование химерных структур, вращающихся по кольцу с постоянной скоростью. Такие структуры наблюдаются в широкой области изменения параметров, как в случае только однонаправленной нелинейной связи, так и при добавлении диффузионной компоненты связи. Для строго однонаправленного взаимодействия построена диаграмма режимов на плоскости параметров, контролирующих силу связи и диссипацию в осцилляторах, показано явление мультистабильности, исследована эволюция и разрушение химер.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект N16-12-10175) и программы SFB 910

1. Zakharova A., Kapeller M., Scöll E. *Phys. Rev. Lett.*, **112** (2014) 154101.
2. Laing C.R. *Phys. Rev. E*. **92** (2015) 050904.
3. Clerc M.G., et. al. *Phys. Rev. E*. **93** (2016) 052204.
4. Larger L., Penkovsky B., Maistrenko Y. *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 054103.
5. Larger L., Penkovsky B., Maistrenko Y. *Nature Comm.* **6** (2015) 7752. *Nature Comm.* 2015. Vol.6. 7752(1-7).

Химерные состояния в ансамбле возбудимых осцилляторов

Семенова Н.И., Захарова А.С., Анищенко В.С., Шелль Э.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

Институт теоретической физики, Берлинский технический университет, Берлин

Химерные состояния – это эффект, который, как правило, наблюдается в сетях нелокально связанных хаотических осцилляторов. Он заключается в сосуществовании в ансамбле кластеров с синхронной и асинхронной динамикой [1,2]. Не так давно химерные состояния были найдены в кольце нелокально связанных осцилляторов ФитцХью-Нагумо

в колебательном режиме [3]. Однако в возбужденном режиме этот эффект так и не был обнаружен [3], что до сих пор остается открытым вопросом. По этой причине появился вопрос о возможности появления химерных состояний в кольце нелокально связанных систем ФитцХью-Нагумо в режиме когерентного резонанса. В данной работе рассматривается кольцо из N нелокально связанных осцилляторов (подобная система уже рассматривалась в работе [3]) в присутствии белого Гауссова шума:

$$\begin{aligned}\varepsilon \frac{du_i}{dt} &= u_i - \frac{u_i^3}{3} - v_i + \frac{\sigma}{2R} \sum_{j=i-R}^{i+R} [b_{uu}(u_j - u_i) + b_{uv}(v_j - v_i)], \\ \frac{dv_i}{dt} &= u_i + a + \frac{\sigma}{2R} \sum_{j=i-R}^{i+R} [b_{vu}(u_j - u_i) + b_{vv}(v_j - v_i)] + \sqrt{2D}\xi_i(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где $\varepsilon > 0$ и $a = 1.001$ – параметры отдельно взятых осцилляторов ФитцХью-Нагумо в возбужденном режиме, σ – сила связи, R – число ближайших соседей для i -го осциллятора. Форма связи задается при помощи матрицы вращения [3] $b_{uu} = b_{vv} = \cos \phi$, $b_{uv} = -b_{vu} = \sin \phi$ при $\phi = \pi/2 - 0.1$. $\xi_i(t)$ – белый Гауссовый шум, а D – интенсивность шума.

Было получено, что для некоторых значений интенсивности шума наблюдается формирование новых структур, состоящих из пространственно-временных выбросов, локализованных в пространстве. Эти структуры совмещают в себе как особенности химерных состояний, так и когерентного резонанса. По этой причине они были названы *coherence resonance chimera* [4]. Эти структуры характеризуются сосуществованием двух пространственно разделенных областей. Осцилляторы из обеих областей совершают периодические скачки (спайки), однако осцилляторы из одной части в течение одного скачка движутся синхронно друг относительно друга, а из другой – асинхронно. Особенность данного режима и отличие от обычных химерных состояний заключается в изменении положения асинхронной части. С каждым новым периодом колебаний ее положение меняется между двумя областями кольца.

Данная работа была поддержана DFG в рамках SFB 910 и РФФИ (с 14-52-12002).

1. Kuramoto Y., Battogtokh D., *Nonlin. Phen. in Complex Sys.* **5** (2002) 380.
2. Abrams D.M., Strogatz S.H., *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 174102.
3. Omelchenko I., Omel'chenko O., Hövel P., Schöll E., *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 224101.
4. Semenova N., Zakharova A., Anishchenko V., Schöll E., *Phys. Rev. Lett.* **117** (2016) 014102.

Пространственно-временные структуры в динамике одиночной системы с запаздыванием. Переход регулярность-нерегулярность и индуцированные шумом эффекты

Семенов В.В., Захарова А.С., Майстренко Ю.Л., Шчлль Е.

СарГУ, Саратов, ТУ, Берлин

Известно, что многие эффекты, типичные для ансамблей связанных осцилляторов и пространственно-распределенных систем, могут быть выявлены во временной динамике одиночных систем с запаздыванием [1-4]. В представленной работе различные

пространственно-временные эффекты, включая уединенные состояния (solitary states) и химерные состояния (chimera states) показаны на примере динамики одиночного осциллятора с запаздыванием. Показан переход от полностью регулярной динамики к полностью некогерентному поведению через множественное появление уединенных состояний. Продemonстрирована возможность управления динамикой системы с помощью внешнего периодического воздействия. Установлена возможность получения химерных состояний с управляемыми характеристиками при помощи внешнего периодического воздействия. На примере индуцированных шумом химерных состояний показана конструктивная роль шума: шумовая модуляция амплитуды внешнего воздействия при оптимальной интенсивности шума приводит к индуцированным шумом химерным состояниям в случае, когда химерные состояния в детерминированной системе не наблюдаются. Формирование индуцированных шумом химерных состояний сопровождается эффектом стохастического резонанса, а именно, с ростом шума соотношение сигнал-шум на частоте внешнего воздействия сначала растет, а затем, достигнув максимума, уменьшается.

Работа поддержана грантом РФФИ (с 14-52-12002) и Министерством образования и науки РФ в рамках гос. задания (код проекта 1008).

1. Arecchi F.T., Giacomelli G., Lapucci A., Meucci R. *Phys. Rev. A* **45** (1992) R4225
2. Giacomelli G., Politi A. *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 2686
3. Giacomelli G., Marino F., Zaks M.A., Yanchuk S. *Europhys. Lett.* **99** (2012) 58005
4. Larger L., Penkovsky B., Maistrenko Y. *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 054103

Особенности формирования химерных структур в ансамбле нелокально связанных генераторов Анищенко – Астахова

Слепнев А.В., Бух А.В., Вадивасова Т.Е.

СарГУ, Саратов

Исследуется модель ансамбля нелокально связанных генераторов Анищенко – Астахова. Уравнения, описывающие данную модель могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= mx_i + y_i - x_i z_i + \frac{\sigma}{2P} \sum_{j=i-P}^{i+P} (x_j - x_i), \\ \dot{y}_i &= -x_i + \frac{\sigma}{2P} \sum_{j=i-P}^{i+P} (y_j - y_i), \\ \dot{z}_i &= -gz_i + \frac{g}{2} x_i (x_i + |x_i|),\end{aligned}\tag{1}$$

где m и g — управляющие параметры элементов ансамбля, σ — сила связи, P — радиус связи (число других элементов, с которыми связан выбранный элемент). Отдельный элемент сам по себе демонстрирует переход к хаосу через каскад бифуркаций удвоения

периода. Значения управляющих параметров системы (1) $m = 1.49$ и $g = 0.2$ выбраны таким образом, чтобы отдельный элемент в отсутствие связи находился в режиме развитого хаоса.

В работе анализируется поведение системы (1) при изменении параметров связи σ и P . Демонстрируется явление мультистабильности, заключающееся в сосуществовании стоячих и бегущих волн, а также некоторых других режимов при одних и тех же значениях управляющих параметров. Исследуются различные типы химерных состояний, возникающие на основе как стоячих, так и бегущих волн.

А.В.С. выражает благодарность за финансовую поддержку Российскому научному фонду (проект 16-12-10175), Т.Е.В. выражает благодарность за финансовую поддержку РФФИ (проект 14-52-12002).

Phase multistability in an ensemble of periodic oscillators with long-distance couplings

Шабунин А.В.

СарГУ, Саратов

We consider multistability in a ring of phase oscillators with non-local couplings, whose strength depends on distance between oscillators:

$$\dot{\varphi}_i = \sum_{d=1}^L \gamma(d) [\sin(\varphi_{i+d} - \theta_i) + \sin(\varphi_{i-d} - \varphi_i)] \quad (1)$$

where L is the radius of the couplings.

The system (1) demonstrates developed phase multistability in the form of a set of running waves. Stability properties of the regimes with different wavelengths, as well as their basins of attractions are the subject of the study.

The work extends classical research published in paper [1], where stability conditions for running waves in chain of phase oscillators, whose strength of interaction monotonically decreases with the distance, were obtained analytically. Here we investigate how the Ermentrout criterion works in cases which are beyond the limitations used in [1].

The work has been supported by the Russian Ministry of Education and Science (Project No. 1008)

1. Ren L., Ermentrout G.B. *Physica D* **143** (2000) p. 56.

Режимы химер в двумерном ансамбле кубических отображений с нелокальным взаимодействием

Шепелев А.А., Бух А.В.

СарГУ, Саратов

Исследуются сложные пространственно-временные структуры, известные как химерные состояния, исследуются в двумерном ансамбле кубических отображений. Связь между элементами нелокальная, т.е. каждый элемент связан со всеми соседями в пределах радиуса R . Граничные условия периодические в обоих направлениях. Одно из важных свойств кубического отображения — это бистабильное поведение. Отображение демонстрирует как бистабильность с периодическим или хаотическим аттрактором в двух "ямках так и объединенный хаос, что зависит от значений параметров системы. Параметры выбраны для режима объединенного хаоса вблизи порогового значения его существования. В этом случае ансамбль демонстрирует множество различных режимов с изменением силы связи. Наблюдаются некогерентный хаос, полная синхронизация, частичная синхронизация в одноямянном режиме или переключениями между двумя "ямками". Среди возможных режимов наблюдается структуры со сосуществующими кластерами с когерентной и некогерентной динамикой элементов [1-5].

Наше исследование посвящено исследованию химерных состояний в двумерном ансамбле. Были найдены различные виды химер. Например, как уже известные виды химер, такие как амплитудная или фазовая химера [4,5], наблюдающиеся в одной или двух "ямках так и новый тип химерных структур, обусловленный бистабильностью системы. Такие химеры, которые были названы "двумяными" включают кластеры элементов с нерегулярным расположением в двух "ямках". Была построена диаграмма режимов.

Исследование поддержано РФФИ (научный проект ϵ 14-52-12002) и Российским Научным Фондом (грант ϵ 16-12-10175)

1. Y. Kuramoto, D. Battogtokh. *Nonlinear Phenom. Complex Syst.* **4** (2002) 380-385
2. M.J Panaggio, D.M. Abrams. *Nonlinearity* **28** (2015) R67
3. I. Omelchenko, Y. Maistrenko, P. Hövel, E. Schöll. *Phys. Ref. Lett.* **106** (2011) 234102
4. A.Zakharova, M. Kapeller, E. Schöll. *Phys. Ref. Lett.* **112** (2014) 154101
5. S.A. Bogomolov, G.I. Strelkova, E. Schöll, V.S. Anischenko. *Tech. Phys. Lett.* **42(7)** (2016) 763-766

Взаимодействие квазиодномерных солитонов в треугольной молекулярной решетке и управляемый солитонный транспорт заряженных частиц

Четвериков А.П.¹, Веларде М.Г.², Эбелинг В.³

1) Саратовский национальный исследовательский государственный университет, Саратов; 2) Университет Комплютенсе, Мадрид; 3) Университет им. Гумбольдта, Берлин

В двумерных решетках молекулярных частиц, связанных нелинейными потенциальными силами, возможно возбуждение квази-одномерных локализованных волн, обладающих

свойствами солитонов. Они возникают только при достаточно высокой энергии начального возмущения, распространяются со сверхзвуковой скоростью, при встречном движении в одной цепочке двумерной решетки проходят сквозь друг друга, практически не деформируясь, имеют малые потери энергии на возбуждение осцилляций в смежных цепочках решетках, формируют движущиеся потенциальные ямы для заряженных частиц. Последнее означает, они в состоянии захватывать помещенные в решетку (внешние) электроны, обеспечивая тем самым транспорт электронов в выделенной цепочке решетки без воздействия внешнего электрического поля. Если в решетке возбуждается другой солитон, движущийся в другой цепочке, ориентированной вдоль другой кристаллографической оси решетки, то солитоны при встрече разрушаются либо оба, либо только один из них. В последнем случае электрон может оставаться либо на первом (несущем) солитоне, либо перепрыгивать на второй (управляющий) солитон, позволяя тем самым контролировать транспорт электрона.

В настоящей работе описанное явление управляемого солитонного транспорта заряженных частиц исследуется методами численного моделирования применительно к равновесной решетке с треугольной симметрией, в которой частицы связаны потенциальными силами Морзе. Исследование проводится с использованием модели сильной связи, в рамках которой динамика решетки описывается классическими уравнениями движения для точечных частиц, а движение электрона – уравнением Шредингера для дискретной волновой функции электрона.

Показано, что квазиодномерные солитоны оставляют за собой локализованную область слабой дезорганизации решетки, которая исчезает лишь через некоторое время. В результате, если управляющий солитон пересекает траекторию солитона-носителя позади него, то это практически не сказывается на движении первого солитона. Однако если управляющий солитон пересекает траекторию носителя впереди и достаточно близко от него, то происходит разрушение первого солитона, а электрон может перескочить на управляющий солитон, который доставит его в другую точку решетки, отличную от той, куда он был бы доставлен без влияния управляющего солитона. Таким образом, регулируя точку возбуждения управляющего солитона, время его возбуждения, его энергию, можно доставить электрон в нужную область решетки.

Работа частично поддержана Российским Научным Фондом (грант 16-12-10175).

Энтропия и DFA variability ритма сердца при дистантном прекондиционировании и ортостазе у здоровых молодых людей: методические и физиологические аспекты анализа

Флейшман А.Н.¹, Кораблина Т.В.², Смагина Е.С.², Петровский С.А.¹, Иовин Д.Е.², Неретин А.А.^{1,2}

¹ НИИ КППЗ, ² Сибирский государственный индустриальный университет Новокузнецк, Россия

Проведены исследования сравнительной физиологической оценки нелинейных методов анализа ВРС: аппроксимированной, образцовой (sample), многомасштабной энтропий (ApEn, SpEn, MsEn) и детрентного флуктуационного анализа (DFA) при дистантном ишемическом прекондиционировании и ортостазе. Цель: повышение информативности иссле-

дования и раскрытие механизмов нефармакологических методов защиты сердца и сосудов мозга от повреждений и стрессов на основе нелинейных методов анализа ВРС. Основные задачи работы включали: 1) Модельные исследования связей амплитудных и структурных особенностей ВРС с показателями энтропии и DFA. 2) Сравнительные исследования свойств ApEn, SpEn, MsEn. 3) Исследования особенностей изменений энтропийных показателей и DFA вариабельности ритма сердца (ВРС) в условиях дистантного ишемического прекондиционирования и ортостаза. В модельных исследованиях искусственно генерируемых волновых сигналов, найдено, что изменения амплитуды и мощности колебательных процессов не связаны с показателями энтропии. Результаты модельных исследований экстраполировались на реальные данные ВРС и пульса. При сравнительных исследованиях ApEn, SpEn, MsEn определены оптимальные настроечные параметры методов анализа: показатель длины сравниваемых последовательностей исследуемых временных рядов, допустимые отклонения порогов фильтрации шумов для ApEn, SpEn, MsEn, масштабирующий коэффициент для MsEn, а также достоинства и недостатки различных показателей энтропии ВРС. Физиологические приложения разработанных методов были проведены у 34 испытуемых в динамике нагрузочных тестов, и при дистантном ишемическом прекондиционировании. Оценивалось влияние прекондиционирования на ортостатическую нагрузку. Показатели функционального состояния были представлены десятью показателями спектров ВРС, ЧСС, АД и нелинейной динамики (ApEn, SpEn, MsEn, DFA). Достоверность полученных результатов оценивалась в сравнении с динамикой показателей ВРС при проведении ложного прекондиционирования. В динамике нагрузочных тестов при ВРС, а также при ортостазе реактивные изменения структуры кардиодинамики наилучшим образом отражались в показателях sample и многомасштабной энтропии и в меньшей степени аппроксимированной энтропии. Причем, изменения показателей энтропии и DFA имели противоположную направленность при ортостазе. Установлено, что ApEn, Sample и многомасштабная энтропия ВРС обладает свойствами подавления случайных воздействий и шумов. Эти свойства проявились в повышении прогностических критериев изменений нейровегетативного профиля, то есть в случаях изолированного снижения HF и LF и учащения ЧСС, которые ранее рассматривались как противоречивые критерии энергодефицитных состояний. Выраженное снижение энтропии повышало достоверность отрицательного прогноза состояния пациентов. Мномасштабная энтропия может быть использована в случаях невозможности использования традиционного спектрального анализа при предсердной мерцательной аритмии и становится важным прогностическим критерием ишемических инсультов при этой патологии. Повышение информативности исследований ВРС при клинко-физиологических исследованиях на основе дополнительных нелинейных показателей (энтропия и DFA) требуют их внедрения в ежедневную врачебную практику.

Закономерность статистической неустойчивости биосистем-complexity

Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Хадарцев А.А., Филатова О.Е.

БУ ВО «Сургутский государственный университет», Сургут

Последние годы целый ряд физиков поднимают проблему статистической неустойчивости многих физических систем и процессов [1]. Однако, почти 70 лет назад в биомеханике и

психологии Н.А. Бернштейн высказал гипотезу о "повторении без повторений" в организации различных движений. Сегодня эта гипотеза приобрела вид закономерностей, которые в психологии получили название эффекта Еськова-Зинченко, а в биологии и медицине привела к пересмотру и новой трактовке понятия гомеостаза и эволюции [2,3]. Это приводит нас к глобальному пересмотру фундаментальных постулатов всего естествознания, в основе которого лежит твердое убеждение о том, что детерминистские модели (функциональный анализ) и стохастические модели (стохастика в целом) могут описывать реальные медико-биологические процессы и явления. В действительности это все является гигантской иллюзией естествознания, а детерминистские и стохастические модели биосистем имеют ретроспективный (исторический) характер для многих процессов, проходящих со сложными биосистемами (complexity). В рамках новой третьей парадигмы естествознания и новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) доказывается, что невозможно произвольно два раза подряд повторить выборки многих медико-биологических процессов и явлений для биосистем, которые находятся в неизменном (гомеостатическом) состоянии. Т.о. если на интервале времени t_j мы получаем функцию распределения $f(x_i)$ для выборки x_i , то в следующем интервале времени Δt_{j+1} мы будем иметь неравенство $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$. Это касается как начального состояния $x(t_0)$ вектора состояния системы $x(t)$, так и конечного состояния $x(t_k)$ для любого x_i .

В экспериментах и наблюдениях мы фиксируем хаотический калейдоскоп параметров (выборок) x_i для многих динамических процессов x_i , которые описывают гомеостаз (якобы стационарное) состояние $x(t)$. В гомеостазе любая биосистема, как система третьего типа (СТТ) по W. Weaver, демонстрирует неустойчивость статистических функций распределения $f(x)$. Любая выборка x_i имеет исторический характер и тогда выборки кардиоинтервалов, треморо-, теппинг-, электроэнцефало-, электронейро- и электромиограмм, биохимических параметров крови и многих др. параметров гомеостаза имеют разовый (уникальный) характер. В этом случае мы вводим понятие неопределенности 1-го и 2-го типов, вводим аналог принципа неопределенности Гейзенберга во все науки о живых системах. Даем количественное описание гипотезы Бернштейна в виде эффекта Еськова-Зинченко с помощью матриц парных сравнений выборок x_i . Дается и новая трактовка понятия эволюции биосистем как движение квазиаттракторов СТТ в фазовых пространствах состояния. В рамках ТХС разработаны модели работы нейросетей мозга в режиме многократных ревербераций, при которых начальные значения весов признаков W_{i0} выбираются из интервала (a, b) равномерного распределения.

1. Горбань И.И. *Журнал технической физики* **3** (2014)
2. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия* **5** (2015)
3. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия* **2** (2015)

Моделирование ассоциативной памяти с помощью хаотических отображений

Андреев Ю.В.

МФТИ, Саратов

Рассматривается модель ассоциативной памяти, основанная на методе записи информации в нелинейных динамических системах, в том числе системах с хаотической динамикой [1-3]. В этом методе информационным образам ставятся в соответствие регулярные и хаотические динамические аттракторы кусочно-линейных отображений. Фрагментам образа соответствуют точки соответствующего цикла в фазовом пространстве отображения. Так как носителями образов являются динамические аттракторы, метод обладает свойством ассоциативности: по фрагменту записанного образа, которому соответствует фрагмент фазовой траектории, путем итерирования динамической системы может быть восстановлен весь цикл и, соответственно, весь образ.

Обсуждается метод синтеза N -мерных кусочно-линейных отображений Π носителей информации; оценивается возможное количество информационных образов, которые можно записать в одной динамической системе; возможность управления динамикой отображений с записанной информацией.

Моделируются функции обработки информации (ассоциативная память, классификация и т.п.). Обсуждается модель ассоциативной памяти на связанных отображениях с записанной информацией.

1. Дмитриев А.С. *Радиотехника и электроника* (1991) Т.36. N 1. С.101–108.
2. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., and Starkov S.O. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* (1997) V.44. N 1. P.21–28.
3. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S. *Symmetry: Culture and Science* (2012) V.23. N3-4. P.377–402.

Смена класса возбудимости дофаминергических нейронов под действием синаптических токов

Захаров Д.Г.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

Дофаминергические нейроны вентральной области покрышки (ventral tegmental area, VTA) относятся к такому типу нейронов, изучение активности которых интересно и с точки зрения биологии и медицины, и с точки зрения нелинейной динамики. В первом случае, интерес вызван тем, что эти нейроны являются ключом к понимаю функционирования системы мотивации в мозге. В частности, они играют первостепенную роль в процессах обучения и возникновении вредных привычек (алкоголизма, наркомании, курении и т.д.). Концентрация выделяемого ими во время генерации спайков дофамина в полосатом теле (striatum) кодирует уровень (положительного или отрицательного) подкрепления того или иного действия и напрямую определяет выбор моторных программ в ответ на внешние стимулы.

С точки зрения нелинейной динамики, эти нейроны обладают уникальными свойствами [1,2]: они демонстрируют дифференциацию отклика на типичные возбуждающие стимулы (инъекцию тока в сом, синаптические AMPA и NMDA токи) и могут менять класс возбудимости под действием внутренних ионных и внешних синаптических токов. Классы возбудимости (генерации спайков) нейронов были введены Ходжкиным [3] еще в 1948 году для классификации нейронов по их частотным откликам на инъекцию внешнего тока. В этой классификации содержится три класса нейронов: нейроны первого класса имеют гладкую зависимость частоты генерации от величины инжектируемого тока, нейроны второго класса – только в некотором диапазоне частот, нейроны третьего класса вообще не способны периодически генерировать последовательности потенциалов действия под действием внешнего тока любой величины.

С точки зрения нелинейной динамики, модели нейронов разных классов претерпевают различные бифуркации при переходе от устойчивого состояния равновесия, отвечающего покою, к устойчивому предельному циклу, соответствующему режиму активности нейрона. Очевидно, что к первому классу относятся нейроны с бифуркациями петли сепаратрисы седло-узла или петли сепаратрисы седла, а ко второму классу – с бифуркациями Андронова-Хопфа. У нейронов третьего класса устойчивое состояние равновесия существует при всех значениях внешнего воздействия. В данной работе рассмотрен механизм изменения класса возбудимости и, соответственно, бифуркационного сценария в феноменологической [1] и биофизической [2] моделях дофаминергических нейронов, генерирующих периодические последовательности спайков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант €14-02-00916-а).

1. Захаров Д.Г., Кузнецов А.С. *Письма в ЖЭТФ* **102**(2015)211-215
2. Morozova E., Myroshnychenko M., Zakharov D., di Volo M., Lapish C., Gutkin B., Kuznetsov A. *Journal of Neurophysiology* (2016) DOI: 10.1152/jn.00232.2016
3. Hodgkin A. L. *Journal of Physiology* **107** (1948) 165

Модель движения взгляда при свободном обзоре изображений

Мищенко М.А.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н.Новгород

Восприятие зрительной информации человеком Ц- сложный феномен, в котором принимают участие различные отделы мозга. При этом изображение воспринимается не целиком, а эпизодически, разбиением наблюдаемой картины на области интереса. То, какой участок изображения подвергается анализу в настоящее время определяется, в первую очередь, направлением взгляда. При этом за направление взгляда могут отвечать как воля человека, так и параметры самого изображения. Для изучения принципов анализа изображений человеком активно применяются экспериментальные подходы, основанные на отслеживании направления взгляда Ц- окулографии (keye-trackingъ). Из литературы известны два механизма внимания. Низкоуровневый, «bottom-up», ответственный за неосознанное привлечение внимания, обусловленное визуальной привлекательностью частей изображения. За привлекательность отвечают низкоуровневые характеристики изображения – цвет, освещенность, текстура, движение [1–3]. Другой механизм высокоуровне-

вый, «top-down», связанный с целью наблюдателя, мотивацией, настроением и его предыдущими знаниями и опытом. Другими словами – с высшими когнитивными способностями [4,5].

В данной работе предложена феноменологическая модель движения взгляда при анализе изображения, не учитывающая высшие когнитивные функции и волю наблюдателя, для изучения влияния параметров изображений на зрительное восприятие. То есть модель описывает неосознанное движение взгляда.

В качестве основной характеристики изображения рассматривалась интенсивность пикселей. Исследовалось влияние размера поля зрения на движение взгляда и скорость саккад – скачкообразных перемещений взгляда. Кроме того, в рассмотрение был введен параметр, показывающий рассеяние внимания при длительном просмотре одной области изображения, что обусловлено экспериментальными данными [6].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта $\epsilon 16 - 31 - 60080$ мол_a_дк.

1. Parkhurst D., Law K., Niebur E. *Vision Res.* **42(1)** (2002) 107–123.
2. Tatler B.W., Baddeley R.J., Gilchrist I.D. *Vision Res.* **45(5)** (2005) 643Ц-659.
3. Le Meur O., Le Callet P., Barba D. *Vision Res.* **47(19)** (2007) 2483Ц-2498.
4. Le Meur O., Liu Z. *Vision Res.* **116(1)** (2015) 152Ц-164.
5. Yarbus, A. Eye movements and vision. Plenum Press, New York, 1967.
6. Martinez-Conde S., Macknik S.L., Hubel D.H. *Nat. Rev. Neurosci.* **5(3)** (2004) 229Ц240.

Анализ эволюции отделяющихся водоемов Белого моря с позиции теории бифуркаций

Курилович А.А.

МФТИ, Долгопрудный

Моделирование сложных биологических и экологических систем представляет собой нетривиальную задачу. Так, например, моделирование динамики Черного моря при воздействии на него различных факторов сопровождается трудностями, возникающими, в частности, вследствие масштабности моделируемого объекта. При исследовании задач о динамике крупномасштабных объектов часто используются подходы, заключающиеся в нахождении модельной системы меньших размеров [1]. Известно, что Черное море является меромиктическим водоемом больших размеров [2]. Меромиктические водоемы - стратифицированные водоемы с резкими переходами между слоями, в которых отсутствует вертикальное перемешивание. Всего слоя три Ц верхний пресноводный, средний морской и придонный сероводородный анаэробный слой. Такие водоемы распространены по всему миру. Большое их скопление наблюдается на побережье Белого моря. В этой связи моделирование динамики меромиктических озер может быть полезным для моделирования динамики Черного моря. Рождение и последующее развитие озер в регионе Белого моря связано со сложными структурными изменениями в их биологическом и физико-химическом составе [3]. Так, в связи с поднятием Балтийской платформы (4 мм/год) небольшие морские лагуны постепенно отделяются от моря, образуя частично опресненные водоемы. На финальной стадии отделения образуется стратифицированное озеро. В нем формируются

три биоценоза Ц морской, пресноводный и придонный анаэробный. В августе 2016 года докладчик в ходе биологической практики Московского физико-технического института принимал участие в изучении свойств одного из таких водоемов Ц озера кВонючееень (координаты 66.289, 33.334).

Первая часть доклада будет посвящена особенностям проведения беломорской биологической практики, организованной для студентов технических специальностей, и перечислению круга биологических и экологических задач. Во второй части доклада будут рассмотрены бифуркационные явления, свойственные естественной эволюции отделяющихся озер. Переход из исходного однородного состояния (морская лагуна) в устойчивое упорядоченное (меромиктический водоем) можно смотреть как на неравновесный фазовый переход [5]. При достижении критического уровня поднятия геологической платформы, выступающего в качестве управляющего параметра, система озер изменяет свою связность. Вследствие приливно-отливных явлений между Белым морем и каждым из отделяющихся озер сохраняется некоторый водообмен, интенсивность которого падает со временем. По мнению автора, сложная пространственно-временная динамика биогеоценоза Белого моря может послужить объектом для приложения богатого набора методов нелинейной динамики. Актуальной задачей является рассмотрение солёности воды как функции от интенсивности водообмена (k) и глубины слоя (h), анализируемой с позиции теории катастроф.

1. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. Ц М.: Гидрометеиздат, 1978. Ц 250 с.
2. Сазонов А.А., Фатхи М.О., Меромиктические водоемы и история их изучения. 2015 // История естествознания и техники: Материалы годичной научной конференции. Т. 2. М.: 2015. С. 316-319.
3. Пантюлин А.Н., Краснова Е.Д. Отделяющиеся водоемы Белого моря: новый объект для междисциплинарных исследований // Геология морей и океанов: Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М.: 2011. С. 241-245.
4. Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 328 с.

Оценка динамических параметров сейсмических сигналов на записях малоапертурных групп

Непеина К.С.

ИДГ РАН, Москва

Для осуществления сейсмологического мониторинга в Центральном регионе РФ в 2004 г. была установлена постоянно действующая малоапертурная сейсмическая группа (МСГ) кМихневоь [1, 2]. Ежегодно МСГ регистрирует большое число (более 1000 событий) различной природы (естественной и техногенной). Конфигурация МСГ кМихневоь представляет собой три концентрические окружности с максимальным диаметром 1,2 км. Вследствие такого размера разрешающей способности антенны недостаточно для однозначной идентификации источников регистрируемых колебаний.

Метод согласованного фильтра с привлечением шаблонных волновых форм, тщательно

выбранными из десятилетнего архива цифровых записей МСА УМихневоУ, позволяет создать кросскорреляционные алгоритмы, обладающие высокой точностью относительной локации и идентификации событий в случае одинаковых условий возбуждения колебаний [3]. Однако зачастую близкие в пространстве источники не создают одинакового волнового фронта. Более того, необходимо учитывать когерентность получаемых сейсмограмм с 12 сейсмометров, которая определяет подобие по энергии. В таком случае (или при сбое аппаратуры) с большой долей вероятности усредненный коэффициент корреляции между шаблонным и изучаемым объектами будет несколько занижен. Поэтому решено ввести анализ данных с помощью структурной функции. Статистический анализ нестационарных процессов предполагает оперирование более сложными понятиями, чем в случае со стационарными процессами. Это обусловлено нелокализуемостью нестационарных процессов по частоте, т.е. наличием корреляции между разночастотными гармоническими компонентами [4]. Особенно эффективным является использование структурных анализаторов для выявления в шумовом сигнале кратковременных периодических последовательностей, которые не могут быть отфильтрованы узкополосными фильтрами, обладающими значительной временной инерционностью [5]. Положительным свойством структурных функций является свойство инвариантности относительно некоторых форм нестационарности [6].

1. Sanina I.A. et al. The Mikhnevo small aperture array enhances the resolution property of seismological observations on the East European Platform, *J. Seismology* (2011). **Vol. 15, 3** doi: 10.1007/s10950-010-9211-x, pp. 545-556.
2. Thomason K. et al. Small-Aperture Seismo-Acoustic Arrays: Design, Implementation, and Utilization. *Bull. Seismol. Soc. Am.* (2004) **Vol. 94, No. 1**, pp. 220-236.
3. Kitov I.O. et al. The method using a matched filter on a small aperture seismic antenna УМихневоУ. *Seismic instruments* (2014) **Т. 50. No. 3** pp. 5-18.
4. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. **Ч. 1.** Случайные процессы. – М.: Наука, 1976. – 496 с.
5. Сергеев Г.А., Романенко А.Ф. Структурный анализ нестационарных случайных процессов. Нелин и оптим. сист. – М.: Наука, 1971. – 440 с.
6. Прохоров С.А., Графкин В.В. Структурно-спектральный анализ случайных процессов. – Самара: СНЦ РАН, 2010. – 128 с.

Определение направления причинно-следственной связи в динамических системах: приложение к палеоклимату.

Скакун А.А.^{1,2}, Волобуев Д.М.¹

¹ГАО РАН, Санкт-Петербург, ²ФГБУ ААНИИ, Санкт-Петербург

Палеоклиматические ряды, полученные из антарктических ледяных кернов, содержат информацию о глобальных изменениях климата в прошлом, в частности о вариациях температуры и содержания парниковых газов. Эти временные ряды отслеживают эволюцию климата во времени и являются основой для предсказания его будущих изменений. Выявление связи между различными климатическими рядами при предположении об их хаотическом происхождении позволит сделать вывод о вкладе каждого климатического параметра в глобальные изменения, а также о влиянии этих параметров друг на друга.

Для нахождения направления связи между временными рядами использовался метод условных дисперсий (Cenys et al., 1991), позволяющий оценить направление и силу связи между временными рядами. Метод был апробирован нами на модельных хаотических системах (например, двух связанных системах Лоренца). Кроме того, мы провели сравнение этого метода с методом Convergent Cross Mapping (Sugihara et al., 2012). В результате применения метода условных дисперсий к палеоклиматическим временным рядам было получено, что инсоляция управляет земными климатическими переменными, такими как температура и содержание парниковых газов, в то время как они синхронизированы между собой.

1. Cenys A., Lasienė G., Pyragas K. "Estimation of interrelation between chaotic observables" *Physica D*, 52 (1991), pp. 332-337
2. Sugihara G., May R., Ye H., Hsieh C., Deyle E., Fogarty M., Munch S. "Detecting causality in complex ecosystems" *Science*, 26 oct 2012, pp. 496-500

Синхронизация спинового наноосциллятора внешним источником спиновых волн

Алешин К.Н., Матросов В.В., Мишагин К.Г.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

Спинтрансферный наноосциллятор (СТНО) представляет собой многослойную структуру, состоящую из ферромагнитных и немагнитных чередующихся проводящих электрический ток слоев. Управление намагниченностью одного из слоев (свободного слоя) с помощью эффекта спиновой поляризации электрического тока [1] позволяет привести такую многослойную структуру в режим генерации СВЧ излучения в диапазоне 1 – 100 ГГц и выше. В случае, если подвод электрического тока происходит через точечный контакт, то планарный размер такой структуры составляет десятки нанометров, что делает спиновый наногенератор привлекательным инструментом для осуществления тактирования устройств наноэлектроники. Однако малая мощность генерации и высокий уровень фазовых шумов не позволяют в полной мере пользоваться преимуществами СТНО. Для разрешения выделенных проблем требуется синхронизация нескольких СТНО для подавления шумов и когерентного сложения мощностей излучения.

Один из механизмов связи для управления СТНО это воздействие посредством спиновых волн в свободном слое, т.е. непосредственное управление намагниченностью в области точечного контакта. Возможность синхронизации экспериментально доказана [2] и, кроме того, подобный механизм связи удобен для размещения нескольких СТНО на одном многослойном образце.

В этой работе изучена модель СТНО, управляемого внешним источником спиновых волн [3]. Получено разбиение плоскости параметров (γ, δ) на области, отвечающие топологически различным режимам. Здесь γ – относительная частотная расстройка между внешним сигналом и СТНО, а δ – величина внешнего воздействия. Найдены условия синхронизации СТНО внешним сигналом и изучены сценарии потери синхронизации. Получены амплитудные характеристики колебаний наногенератора в зависимости от параметров γ и δ , обнаружен эффект подавления основной моды колебаний СТНО при возрастании величины внешнего воздействия.

Работа поддержана грантом между МОН РФ и ННГУ (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003).

1. Slonczewski J. C. Current-driven excitation of magnetic multilayers //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1996. – Т. 159. – с. 1. – С. L1-L7.
2. Silva T. J., Rippard W. H. Developments in nano-oscillators based upon spin-transfer point-contact devices //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2008. – Т. 320. – N. 7. – С. 1260-1271.
3. Ciubotaru F. Spin-wave excitation by nano-sized antennas : дис. – Dissertation, Technische Universitat Kaiserslautern, 2012.

Синхронизация и мультистабильность в системе двух осцилляторов ван дер Поля с запаздывающим взаимодействием

Астахов С.В., Гулай А.П. и В.В. Астахов

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Синхронизация квазигармонических автоколебательных систем представляет собой весьма важное и на сегодняшний день хорошо изученное явление [1-4]. При этом хорошо известно, что внесение запаздывания по времени в математическую модель (например, в канал связи между взаимодействующими осцилляторами) ведет к возникновению мультистабильности (см., например, [5]). Как правило, в основе сценария формирования мультистабильности в таких системах лежат седло-узловые бифуркации.

В рамках данной работы мы показываем, что при наличии запаздывания во взаимодействии двух квазигармонических осцилляторов может быть реализован другой сценарий формирования мультистабильности, связанный с бифуркациями Андронова-Хопфа и Неймарка-Сакера. В качестве парциального осциллятора мы используем одну из наиболее простых и известных моделей автоколебательных систем — осциллятор Ван дер Поля:

$$\ddot{x}_1 - (\varepsilon - x_1^2)\dot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 = \gamma(\dot{x}_2(t - \tau) - \dot{x}_1(t)),$$

$$\ddot{x}_2 - (\varepsilon - x_2^2)\dot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 = \gamma(\dot{x}_1(t - \tau) - \dot{x}_2(t)).$$

Здесь $x_{1,2}$ — динамические переменные, ε , $\omega_{1,2}$ — управляющие параметры осцилляторов, γ — коэффициент связи, τ — время запаздывания.

В результате бифуркационного анализа нами установлено, что с увеличением τ внутри языка синхронизации формируется область бистабильности, границей которой является линия бифуркации Неймарка-Сакера. Для значений параметров из этой области в фазовом пространстве сосуществуют два устойчивых предельных цикла. При этом, вдоль границы данной области также формируется область бистабильности «цикл — тор». Используя амплитудно-фазовое приближение, мы показываем, что внешняя граница второй области бистабильности образована линией седло-узловой бифуркации двумерных торов.

1. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971.
2. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Science. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

3. Balanov A., Janson N., Postnov D., Sosnovtseva O. Synchronization: From Simple to Complex. Berlin: Springer, 2008.
4. Anishchenko V.S., Astakhov V.V., Neiman A.B., Vadivasova T.E., Schimansky-Geier L. Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems. Tutorial and Modern Development. Berlin: Springer, 2007.
5. Yeung M.K.S., Strogatz S.H. Time Delay in the Kuramoto Model of Coupled Oscillators // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 82. P. 648.

Синхронизация кольцевого осциллятора Ван дер Поля

Зайцев В.В., Стулов И.В.

Самарский университет, Самара

Кольцевые радиочастотные генераторы (КГ) на практике обладают рядом достоинств, в частности, имеют повышенную долговременную стабильность частоты [1]. При этом, как показано в [2] и [3], КГ при определенных условиях демонстрируют более сложную динамику, чем автогенераторы, выполненные по традиционным схемам. В настоящем сообщении представлены результаты исследований процессов синхронизации кольцевой автоколебательной системы с резонансными ячейками гармоническим сигналом.

Математическая модель исследуемого КГ из K идентичных резонансных каскадов усиления с собственными частотами ω_0 , добротностями Q и параметрами связи γ состоит из системы K дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dx_1}{dt} + \omega_0^2 x_1 &= \omega_0 \gamma (1 - x_K^2) \frac{dx_K}{dt} + \omega_0^2 E \cos(\omega t), \\ \frac{d^2 x_k}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dx_k}{dt} + \omega_0^2 x_k &= \omega_0 \gamma (1 - x_{k-1}^2) \frac{dx_{k-1}}{dt}, \quad k = 2, \dots, K. \end{aligned} \quad (1)$$

Синхросигнал $E(t)$ вводится в один из каскадов (он считается первым).

Основное внимание уделено синхронизации двухкаскадного КГ. Для моделирования процессов захвата частоты предложено использовать систему укороченных уравнений с дискретным временем для комплексных амплитуд $A_i[n]$ колебаний в ячейках генератора:

$$\begin{aligned} A_1[n] &= A_1[n-1] - \pi \frac{\Omega_0}{Q} (1 + j\nu) A_1[n-1] + \\ &\quad + \frac{\gamma}{2} \left(1 - \frac{1}{4} |A_2[n-1]|^2 \right) A_2[n-1] - j \frac{1}{2} E, \\ A_2[n] &= A_2[n-1] - \pi \frac{\Omega_0}{Q} (1 + j\nu) A_2[n-1] + \\ &\quad + \frac{\gamma}{2} \left(1 - \frac{1}{4} |A_1[n-1]|^2 \right) A_1[n-1], \end{aligned} \quad (2)$$

где ν – приведенная расстройка частот, $\Omega_0 = \omega_0 \Delta / 2\pi$, Δ – интервал дискретизации. Для анализа частотных характеристик синхронных колебаний в системе уравнений (2) следует положить $A_1[n] = A_{10} = \text{const}$, $A_2[n] = A_{20} = \text{const}$.

В числе особенностей АЧХ синхронных колебаний следует отметить определенную степень инверсии $|A_{20}(\nu)|$ по отношению к $|A_{10}(\nu)|$, а также появление зон биений внутри полос удержания.

1. Зайцев В.В. *Известия вузов. Радиофизика*, **24** (1981), ϵ 2, 207.
2. Зайцев В.В., Линдт С.В., Стулов И.В. *Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия*, 2013, ϵ 6 (107), 141.
3. Зайцев В.В., Крыгина Е.Н., Линдт С.В. *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та.*, 2014, ϵ 4, 144310.

Синхронная динамика копирования ансамбля фрагментов ДНК

Григорьев А.В., Мантуров А.О.

СГУ имени Н.Г. Чернышевского, Саратов

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Процесс копирования фрагмента ДНК является ключевым в передаче генетической информации живых организмов - этот процесс непосредственно обеспечивает удваивание исходного генетического материала [1]. В то же время, в ходе массового копирования множества фрагментов ДНК, например, в ходе цепной реакции полимеризации ДНК, конечная скорость роста фрагментов ДНК и стохастичность поступления нуклеотидов из объема рабочего раствора к сайту копирования ДНК-полимеразы [2] не могут обеспечить одновременное завершение роста всех фрагментов ДНК-амплификата. Поэтому, можно сделать предположение о наличии некоторого механизма, уравнивающего времена элонгации отдельных фрагментов, и как следствие - обеспечивающего для них достаточную синхронность завершения фазы копирования. Изучению данного механизма и посвящена настоящая работа.

Было предположено, что синхронизация кинетики сборки фрагментов ДНК возможна в случае наличия какой-либо специфической связи между отдельно взятыми фрагментами, и такая связь должна обеспечивать крегулировку скорости (или, возможно - вероятности) присоединения нуклеотидов к 3'-концу растущей цепи.

Для изучения кинетики сборки одноцепочечного фрагмента ДНК была построена численная модель процесса копирования. Модель представляла собой клеточный автомат с окрестностью Марголуса [3]. В качестве механизма регуляции скорости присоединения нуклеотидов было использовано предположение о существенной зависимости скорости движения полимеразы по собираемому фрагменту, от показателя pH рабочего раствора. Таким образом, предположено, что протоны H^+ могут выступать в качестве ингибитора или катализатора, модулируя скорость копирования нити ДНК.

В результате численного моделирования была продемонстрирована возможность самоподдерживающейся синхронизации движения ДНК-полимераз в массиве копируемых фрагментов ДНК. Такая синхронизация обуславливается естественной причиной - образованием протонного фона в рабочем растворе, она обеспечивает относительно единовременное завершение стадии копирования в массовых реакциях полимеризации ДНК, и может найти применение при электрокинетической детекции результатов таких реакций.

1. Brooker R.J. Genetics: Analysis and Principles. 4th Edition. McGraw-Hill, 2012.
2. Bai L., Shundrovsky A., Wang M.D. *J.M.B.* **344** (2004) 335-349
3. Марголус Н., Тоффли Т. Машины клеточных автоматов: Пер. с англ. М.: Мир, 1991.

Переключения между режимами поведения животных — генетических моделей абсансной эпилепсии

Сысоева М.В.¹, Smyk M.K.², van Luijtelaar G.³, Сысоев И.В.⁴

¹ *Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия*

² *Uniwersytet Jagiellonski w Krakowie, Polen*

³ *Radboud University Nijmegen, the Netherlands*

⁴ *Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия*

Биологические ритмы, в том числе, последовательности переключений между режимами поведения у человека и животных, изучает хронобиология. Хронобиология — область науки, которая исследует периодические феномены, протекающие у живых организмов во времени, и их адаптацию к солнечным, лунным и другим ритмам. К настоящему времени выявлено влияние годового (количество приступов эпилепсии в период с марта по август в два раза превышает их число в октябре-феврале) и лунного (экстремумы числа припадков приходятся на 1-3 сутки после новолуния и полнолуния) циклов на частоту эпилептических состояний. Однако наиболее важный ритм в хронобиологии Ч суточный, примерно 24-часовой цикл физиологических процессов у растений и животных. Особенности циркадного ритма у больных абсансной эпилепсией пока исследованы недостаточно. Цель данной работы: выявить закономерности в поведении лабораторных животных, моделей абсансной эпилепсии.

В работе использовались 12 восьмимесячных самцов крыс генетической линии WAG/Rij Ч генетических моделей абсансной эпилепсии. Запись осуществлялась в течение 24 часов (12/12 цикл день/ночь, светлая фаза с 5 до 17 часов). В мозг крыс вживлялись 7 электродов, расположенных билатерально в коре. На ЭЭГ выделяли 6 типов деятельности: активное бодрствование (AW), пассивное бодрствование (PW), поверхностный медленный сон (SWS L), глубокий медленный сон (SWS D), быстрый сон (REM) и пик-волновые (абсансные) разряды (SWD). Вся запись делилась на 2-секундные неперекрывающиеся интервалы, каждому из которых автоматически присваивалось одно из этих шести состояний. В результате получались дискретные последовательности несоизмеримых значений, соответствующих этим состояниям.

Результатом работы можно считать следующие выводы. Активное бодрствование является хорошо предсказуемым событием, предсказуемость которого уменьшается днчм по сравнению с ночью, что, видимо, объясняется тем, что число эпизодов активного бодрствования, как и суммарное время, которое оно занимает, ночью больше, чем днчм. В то же время предсказуемость пассивного бодрствования не отличается значимо днчм и ночью, хотя днчм длительность эпизодов больше. Предсказуемость быстрого сна несущественно уменьшается днчм и остается на очень высоком уровне. Предсказуемость глубокого сна существенно падает ночью, что хорошо коррелирует с падением как общей длительности

так и числа эпизодов, в то же время предсказуемость поверхностного почти не меняется несмотря на почти аналогичное падение длительности и числа эпизодов. Предсказуемость пик-волновых разрядов низкая и практически не изменяется в зависимости от времени суток, хотя их число и длительность резко падает днчм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 16-34-00203 и Стипендии Президента для поддержки молодых ученых СП-1510.2015.4.

Метод восстановления ансамблей нейроподобных осцилляторов с запаздываниями в связях по временным рядам

Сысоев И.В.¹, Пономаренко В.И.^{2,1}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

В работе [1] была предложена система из D идентичных нейроподобных связанных колебательных систем, демонстрирующих в пределе при $D \rightarrow \infty$ хаотическое поведение за счет нелинейности функций связи. Систему можно представить в немного более общем случае, рассмотрев дополнительно запаздывания в связях τ_i :

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= -x_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^D k_{i,j} h(x_j(t - \tau_{i,j})) \\ h(x) &= \text{th}(gx) \end{aligned} \quad (1)$$

где i — номер текущего осциллятора, j — воздействующего, $k_{i,j}$ — коэффициенты связи. Наличие задержек в связи приближает систему (1) к моделям реальных взаимодействий нейронов мозга.

В данной работе предложен метод восстановления архитектуры связей для системы (1). Показано, что метод даст возможность восстановить как все коэффициенты связи, так и времена запаздывания в связях. Метод основан на той же идее, что и подход, предложенный в [2]: при известных временах запаздывания члены модели, ответственные за связь, рассматриваются как базисные функции и сами коэффициенты связи восстанавливаются как коэффициенты при них методом наименьших квадратов.

Для восстановления времени запаздывания использована модификация метода градиентного спуска, адаптированная к дискретному случаю. Это необходимо, поскольку одновременно для каждого из D осцилляторов восстанавливаются $D - 1$ времени запаздывания, следовательно, простой перебор, использованный в [2], уже неприменим.

Принципиально важным для работоспособности метода является наличие запаздывания, поскольку за счет этого отдельные компоненты целевой функции оказываются независимы. Это позволяет, в частности, проводить реконструкцию даже при очень малом объеме экспериментальных данных, например, восстановить ансамбль из 16 осцилляторов с 240 неизвестными коэффициентами связи и 240 неизвестными временами запаздывания по векторному ряду длиной в 512 значений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 16-34-00203, 16-02-00091 и Стипендии Президента для поддержки молодых ученых СП-1510.2015.4.

1. H. Sompolinsky, A. Crisanti, H.E. Sommers. Chaos in Random Neural Networks // Phys. Rev. Lett., 1988, V 61, Iss. 3, pp. 259–262.
2. И.В. Сысоев, В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров. Идентификация структуры взаимодействий и собственных параметров элементов в сетях, состоящих из систем с задержкой // Письма в ЖТФ, 2016, том 42, N 1, С. 95–102.

Влияние фильтрации общей низкочастотной помехи на определение направленной связи методом нелинейной причинности по Грейнджеру

Корнилов М.В., Сысоев И.В.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

Поиск наличия и направления связи между системами на основе анализа их временных рядов — актуальная задача во многих областях науки: в эконометрике, климатологии, нейронауке, радиофизике. На практике, зачастую, анализ связанности осложнен наличием внешних помех, измерительных шумов и т.п. В данной работе исследовалась работоспособность активно применяющегося для решения подобного рода задач метода причинности по Грейнджеру [1] в случае, когда тестируемые на наличие однонаправленной связи системы с ярко выраженными временными масштабами обладают общей низкочастотной помехой. Изучалось влияние фильтрации общей низкочастотной помехи на выводы данного метода о наличии однонаправленной связи.

В численном эксперименте в качестве тестовых объектов использовались связанные однонаправленной связью системы Рцслера и уравнения генераторов с 1.5 степенями свободы. Общей низкочастотной помехой являлись временные ряды уравнения генератора Кияшно-Пиковского-Рабиновича. Параметры динамических систем подбирались таким образом, чтобы получить хаотические режимы. Коэффициент внешнего воздействия общей низкочастотной помехи θ изменялся от 0 до значения, при котором дисперсия низкочастотной помехи составляла 15% от дисперсии системы, находящейся под воздействием.

В качестве прогностической модели метода причинности по Грейнджеру использовались отображения последования с полиномиальной нелинейностью. Параметры модели выбирались в соответствии с предложенными в работе [2] критериями.

В результате численного эксперимента было показано:

- фильтрация тестируемых на связанность временных рядов позволяет показателю улучшения прогноза не зависеть от величины θ ;
- метод причинности по Грейнджеру оказывается работоспособен для выявления однонаправленной связи при малых значениях θ ;
- в ряде случаев наблюдается увеличение значения первого критерия с ростом θ , однако в целом метод утрачивает специфичность;
- зависимость критериев от θ не зависит от частоты общей внешней помехи.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант $\epsilon 14-12-00291$.

1. Granger C.W.J. Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods // *Econometrica*. 1969. Vol. 37. N 3. P. 424-438.
2. М.В. Корнилов, И.В. Сысоев, Б.П. Безручко. Оптимальный подбор параметров прогностических моделей в методе нелинейной причинности по Грейнджеру в приложении к сигналам, характеризуемым хорошо выраженными временными масштабами // *Нелинейная динамика*. 2014. Т. 10. N 3 С. 279-295.

Стабилизация частоты гиротрона под воздействием внешнего монохроматического сигнала или отраженной волны

Новожилова Ю.В.¹, Денисов Г.Г.¹, Глявин М.Ю.¹, Бакунин В.Л.¹,
Фокин А.П.¹, Мельникова М.М.², Рыскин Н.М.²

¹*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

²*Саратовский государственный университет, Саратов*

Проблема стабилизации частоты излучения мощного гиротрона волной, поступающей из выходного тракта (внешним сигналом или отраженной волной), стала недавно особенно актуальной актуальными сравнительно недавно, после разработки в ИПФ нового типа квазиоптических преобразователей, трансформирующих внешний сигнал в рабочую моду [1].

Задача о захвате частоты и фазы излучения многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом исследуется на примере гиротрона с частотой 170 ГГц и мегаваттным уровнем мощности. Путем численного моделирования построены области одномодовой одночастотной генерации на частоте внешнего сигнала (зоны захвата). Показано, что с ростом числа взаимодействующих мод зоны захвата сужаются, если моды лежат в полосе циклотронного резонанса. С ростом мощности внешнего сигнала ширина зон захвата сначала растет, затем уменьшается из-за нелинейности взаимодействия электронов с полями мод. В частности, при возрастании мощности внешнего сигнала и соответствующем увеличении амплитуды рабочей моды эта мода может распадаться на две паразитные боковые моды, симметрично отстоящие по частоте (4-фотонный распад [2,3]). Показано, что в режиме захвата частоты многомодового гиротрона значения КПД могут быть существенно выше и достигаться при меньших токах по сравнению с автономным режимом.

Частота автогенератора может быть стабилизирована слабым отражением от удаленной нагрузки, как нерезонансной, так и резонансной. Для модели гиротрона с фиксированной продольной структурой поля показано аналитически и подтверждено численным моделированием, что частота генерации стабилизируется внутри узкой полосы, равной для нерезонансного отражателя расстоянию между модами длинной линии, а для резонансного — полосе внешнего резонатора. При этом автономная частота может варьироваться в гораздо более широком интервале. При отражении от нерезонансной нагрузки оптимальная фаза отраженной волны вырабатывается автоматически, для резонансной нагрузки фаза отраженной волны должна подбираться специально. Стабилизация частоты генератора отражением от внешнего высокочастотного резонатора известна как в СВЧ электронике, так и в оптике, однако для гиротронов подобные схемы ранее не обсуждались.

Стабилизация частоты гиротрона важна для диагностики плазмы, спектроскопии высокого разрешения и в перспективе для создания комплекса когерентно излучающих гиротронов в больших установках УТС. Работа поддержана Российским научным фондом (грант ϵ 14-29-00192).

1. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. *Appl. Phys. Lett.* **106** (2015) 263501.
2. Нусинович Г.С. Запевалов В.Е. *Радиотехника и электроника* (1985) 563-570.
3. Перегородова Е.Н., Усачева С.А., Рыскин Н.М. *Нелинейная динамика* **8** (2012) 913.

Pseudohyperbolic attractors

Gonchenko S.

Nizhny Novgorod State University, Russia

We present some elements of modern theory of strange attractors. We divide all attractors into two classes: quasiattractors and wild (pseudo)hyperbolic attractors. In particular, pseudohyperbolic attractors (or, another term, volume hyperbolic attractors) include hyperbolic and Lorenz attractors but can contain homoclinic tangencies and, hence, Newhouse wild hyperbolic sets. However, bifurcations of these homoclinic tangencies do not lead to the birth of periodic sinks (quasiattractors, conversely, allow the birth of periodic sinks, by definition). The theory of wild pseudohyperbolic attractors was laid by Turaev and Shilnikov [1,2] and we discuss some elements of this theory and give several examples of such attractors for three-dimensional Hénon-like maps, for more details see e.g. [3].

[1] D.V.Turaev and L.P.Shilnikov, An example of a wild strange attractor.- Sb. Math., 1998., v.189, No.2, 137–160.

[2] D.V. Turaev, L.P. Shilnikov, Pseudohyperbolicity and the problem on periodic perturbations of Lorenz-like attractors.-Russian Dokl. Math., 2008, v.467, 23–27.

[3] A. Gonchenko, S. Gonchenko, Variety of strange pseudohyperbolic attractors in three-dimensional generalized Hénon maps.- to appear in Physica D (or arXiv:1510.02252v2 [math.DS] for this version).

Топология случайных полей и изображений

Макаренко Н.Г.

ГАО РАН, Санкт-Петербург

Численное моделирование в разных областях физики приводит к деликатным вопросам взаимоотношений вычисленного образа и его желаемого, но недостижимого, аналитического прообраза. В каком смысле, например, численное интегрирование модели Лоренца или Реслера аппроксимирует свойства хаотической динамики? В каком смысле результат конечной последовательности итераций IFS (сжимающих отображений), которое мы видим на экране РС с конечным разрешением, похож на фрактал? Можно ли, используя

случайную конечную выборку точек, отличить сферу от тора? Как восстановить топологию динамической системы из временных рядов? Как “услышать” графодинамику наблюдаемых паттернов случайных полей? Ответы на эти вопросы дает TDA- Topological Data Analysis. Он является одним из основных разделов Вычислительной Топологии - новой, активно развивающейся области дискретной математики.

Эта лекция является кратким введением в методы и задачи TDA. Его базовые конструкции принадлежат алгебраической топологии и теории Морса, но реализуются с помощью компьютерных алгоритмов. Эвристика TDA состоит в мультимасштабном описании облака точек, полученных в эксперименте, посредством фильтрации $\mathbb{C}$ используя вложенные друг в друга симплициальные комплексы. Так называют объекты, состоящие из простейших элементов - вершин, ребер, граней, и т.д. Две отдельные точки образуют две компоненты связности. Соединение их ребром, убивает одну из компонент, т.к. ребро стягивается в точку. В общем случае, для фильтрации используют покрытие точек шарами, с переменным радиусом. Для малых радиусов мы имеем исходное облако точек. При увеличении радиусов, два пересекающихся шара кодируются ребром, а три - гранью. Конечный результат при большом радиусе $\mathbb{C}$ одна компонента связности, т.е. общая грань. При фильтрации могут возникать и дыры, т.е. циклы ограничивающие пустоты. Они закрасиваются при увеличении радиуса. На фильтрации можно определить полезные для анализа алгебраические структуры - группы цепей, циклов и границ. Количество компонент и дыр в симплексе, для каждого радиуса измеряется инвариантами $\mathbb{C}$ числами Бетти. Время жизни компоненты (или дыры) измеряется отрезком (баркодом), началом которого служит радиус шара, соответствующий рождению компоненты (дыры), а концом - радиус, когда она гибнет, т.е. сливается с уже существующим элементом комплекса. Время жизни свойства называют персистентностью. Это важное понятие, позволяющее оценить топологическую “устойчивость” свойства. Фильтрация имеет важное преимущество перед прочими методами - полезная информация извлекается здесь непосредственно из данных и выражается инвариантными величинами. В лекции приводятся некоторые примеры применения TDA для диагностики цифровых изображений в медицине и космическом мониторинге, для анализа корреляций, и редактирования случайных полей в астрофизике.

1. Ghrist R. Elementary Applied Topology. Createspace, 2014.
2. Edelsbrunner H., Harer J. Computational topology: an introduction. American Mathematical Soc., 2010.

Генерация хаотических солитоноподобных импульсов в активном кольцевом резонаторе с магннным квазикристаллом

Гришин С.В., Медведева Т.М., Романенко Д.В., Сысоев И.В., Селезнев Е.П., Никитов С.А.

СарГУ, Саратов

Недавние эксперименты с активным кольцевым резонатором, содержащим в цепи обратной связи магннный квазикристалл (МКК), продемонстрировали возможность генерации диссипативных параметрических структур, длительность которых намного превышает время обхода сигнала по кольцу [1, 2]. Так, в [2] было показано, что такие структуры

формируются за счет конкуренции между временной дисперсией, обусловленной резонансными свойствами МКК, и кубической нелинейностью, возникающей в кольце за счет параметрической связи между амплитудами спиновых волн. Помимо этого, параметрическая неустойчивость спиновых волн может также приводить к развитию в автоколебательной системе с однородной ферромагнитной пленкой временного хаоса и к формированию хаотических временных структур [3]. Отличительной особенностью МКК со структурой типа Фибоначчи является его пространственная неоднородность, которая может стать причиной пространственной локализации генерируемых временных структур. В такой квазипериодической структуре амплитуда импульсов изменяется в пространстве по алгоритму Фибоначчи, что может привести к появлению в системе пространственного хаоса.

В работе сообщается о генерации диссипативных параметрических солитонов как на частотах поверхностной магнитостатической волны, так и параметрически возбуждаемых спиновых волн. Солитоны в обоих случаях имеют пространственно-временную локализацию и демонстрируют пространственно-временную хаотическую динамику. Для создания таких структур используется частотно-временная селекция кольцевых мод, а сами структуры исследуются как в радиофизическом эксперименте, так и с помощью спектроскопии Мандельштама - Бриллюэна. На основе разработанной параметрической модели получено комплексное уравнение Гинзбурга-Ландау (КУГЛ) 3-ей степени, коэффициенты которого зависят от пространственной координаты. Показано, что одно из численных решений КУГЛ соответствует временному солитону, длительность которого намного превышает время обхода сигнала по кольцу. Проведенные оценки значений старшего показателя Ляпунова по экспериментальным временным рядам подтверждают хаотическую природу генерируемых диссипативных параметрических структур.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (задание 6 2014/203), РФФИ (грант 6 14-07-00273) и стипендии Президента РФ (СП-2823.2016.5)

1. Grishin S.V., Beginin E.N., Sharaevskii Yu.P. and Nikitov S.A. *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 022408.
2. Grishin S.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P., and Nikitov S.A. *J. Appl. Phys.* **115** (2014) 053908.
3. Гришин С.В., Голова Т.М., Морозова М.А., Романенко Д.В., Селезнчев Е.П., Сысоев И.В., Шараевский Ю.П. *ЖЭТФ* **148** (2015) 714.

Нелинейное переключение в структуре связанных магнанных кристаллов

Матвеев О.В., Морозова М.А.

СарГУ, Саратов

При распространении магнитостатических волн в структуре связанных МК имеют место две основные особенности. Одна из них связана со сдвигом брэгговских запрещенных зон, параметры которых и положение в спектре зависят от периода структуры [1]. Другой эффект, характерный для связанных структур, заключается в подавлении линейной перекачки волны (длина перекачки при этом зависит от расстояния между слоями) при

увеличении амплитуды [2]. Таким образом, в структуре будет наблюдаться двойное нелинейное переключение [3], причем соответствующие пороги переключения сильно зависят от геометрии структуры. Актуальной задачей является исследование поведения магнито-статических волн при различной геометрии.

На основе подхода, основанного на методе связанных волн, построена нелинейная модель, описывающая распространение магнито-статических волн в структуре связанных МК. Модель представляет собой систему нелинейных уравнений Шредингера, описывающих поведение амплитуд огибающих для прямых и встречных волн в рассматриваемых связанных структурах с учетом линейной и нелинейной связи между ними. Линейная связь определяется геометрией структуры: связь между прямыми и встречными волнами определяется периодом и толщиной структуры, связь между прямыми волнами определяется расстоянием между магнитными кристаллами.

Таким образом, в структуре связанных МК имеет место эффект двойного нелинейного переключения (существует две точки нелинейного переключения - значения входной амплитуды, в которых меняется характер распространения сигнала). Данная особенность даст возможность использовать связанные МК для осуществления ряда операций по функциональной обработке нелинейных СВЧ сигналов. Например, линия передачи на основе связанных МК может функционировать как нелинейный направленный ответвитель, в котором в зависимости от входной мощности импульс выйдет через один из четырех портов связанной структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты $\epsilon\epsilon$ 14-07-00273, 16-29-03120-офи м)

1. Agrawal G.P. Applications of nonlinear optics. Acad. Press, San Diego, 2001
2. Бегинин Е.А., Морозова М.А., Шараевский Ю.П. *ФТТ* **52** (2010) 76
3. Morozova M.A., Matveev O.V. *Phys. Wave Phenom.* **22** (2015) 114

Нелинейные спиновые волны в магнитных микроструктурах

Павлов Е.С, Садовников А.В., Филимонов Ю.А.

СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, СарГУ, Саратов

В работе с помощью методов СВЧ спектроскопии и Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния света (BLS) исследовано влияние трехмаглонной (3М) ($\omega_{k_p} = \omega_{k_1} + \omega_{k_2}$; $k_p = k_1 + k_2$) и четырехмаглонной (4М) ($2\omega_{k_p} = \omega_{k_1} + \omega_{k_2}$; $2k_p = k_1 + k_2$) параметрических неустойчивостей на формирование дефектных мод (ДМ) в спектре поверхностных магнито-статических спиновых волн (ПМСВ) при распространении в одно- (1D) и двумерных (2D) брэгговских резонаторах на основе пленок ЖИГ. Резонаторные (дефектные) моды (ДМ) возбуждаются в виде пика пропускания внутри брэгговской полосы непропускания ПМСВ [1,2]. Обнаружено, что в условиях 3М процессов распада ПМСВ, коэффициенты передачи S_{21} и отражения S_{11} на частотах возбуждения ДМ бистабильность в виде петли гистерезиса в зависимости от направления изменения мощности входного сигнала накачки P_{in} (надкритичности $C = 10 \lg(P_{in}/P_{in}^{th})$). Пороговые мощности P_{in}^{th} развития 3М процессов и формирования бистабильности оказываются ниже порогов наблюдения параметрических процессов для спиновых волн в МК на других частотах, что отражает

эффект усиления поля спиновой волны на частоте ДМ. С ростом надкритичности $C > 5$ дБ, ДМ разрушается, а при дальнейшем увеличении P_{in} происходит разрушение полос непропускания [3]. В условиях 4М процессов рассеяния ПМСВ с ростом уровня надкритичности накачки $C > 10$ дБ наблюдается сдвиг частоты ДМ в сторону длинноволновой границы спектра спиновых волн ($k \rightarrow 0$), что объясняется механизмами нелинейного сдвига дисперсии ПМСВ с ростом амплитуды спиновых волн $|\tilde{m}_{kp}|^2$ [4].

С помощью метода BLS при возбуждении 2D брэгговского резонатора непрерывным сигналом накачки на частоте возбуждения ДМ и малых уровнях $C \approx 1..3$ дБ показано, что распределение интенсивности сигнала рассеянного света $I(x, y) \propto |\tilde{m}(x, y)|^2$ соответствует высшим резонаторным модам ПМСВ и имеет вид стоячей волны с максимумом амплитуды в центральной части дефекта. Зависимость $I(P_{in})$ в диапазоне $C \approx 2..12$ дБ имеет вид петли гистерезиса как на частоте возбуждения ДМ $\omega_R = \omega_p$, так и на частоте вырожденно-го 3М распада $\Omega_s = \omega_R/2$. При возбуждении резонатора СВЧ импульсами длительностью $\tau_i \approx 400$ нс с периодом $T_i \approx 1.5$ мкс при $C < 15$ дБ наблюдается эффект "скола" вершины импульса, а при уровнях $C > 15$ дБ возникает эхо Ц импульс, длительностью порядка и его амплитуда увеличивается с ростом $C \approx 20$ дБ, аналогично случаю регулярных пленок ЖИГ. Спектр выходного сигнала содержит шумовой спектр $\delta\Omega_k$, отвечающий рождению кинетической неустойчивости в системе параметрических спиновых волн [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты $\epsilon \epsilon$ 16-02-01073, 14-07-00896).

1. Filimonov Yu.A. et al. *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 242408
2. Никитов С.А. и др. *УФН* **185** (2015) 1099
3. Высоцкий и др. *Изв. ВУЗов ПНД* **20** (2012) 3
4. Suhl H *J.Phys.Chem.Sol* **4** (1957) 209
5. Дудко Г.М., Казаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. *Тезисы докл. конф. Спинволновая электроника СВЧ, Краснодар* (1987) 121-122

Некоторые результаты нелинейной нестационарной теории двухлучевой лампы бегущей волны и электронноволновой лампы

Волощук С.С.

СарГУ, Саратов

Многолучевые системы благодаря отсутствию замедляющих структур в пространстве дрейфа очень привлекательны для конструирования терагерцовых приборов. Однако, для таких приборов необходимо наличие входных и выходных систем, которые могут быть представлены отрезком спирали и фактически являться многолучевой ЛБВ или ЛОВ. В докладе приведено построение нелинейной нестационарной модели двухлучевой ЛБВ, проведено ее сравнение для случая двух попутных потоков с существующими моделями. Приведены результаты моделирования при параметрах, соответствующих области неустойчивости и области интерференции электронноволновой лампы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты Nr16-02- 00238a и Nr16-32- 00468 мол_a).

Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке giro-ЛБВ, работающих в режимах усиления и нелинейного подавления

Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Зотова И.В., Сергеев А.С.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

В физике лазеров получил широкое применение механизм генерации ультракоротких импульсов (УКИ), основанный на эффекте пассивной синхронизации мод. Указанный эффект реализуется при установке в резонатор лазера нелинейного элемента (амплитудного фильтра), поглощающего излучение малой амплитуды и прозрачного для излучения большой интенсивности. В результате возникает синхронизация мод резонатора, при которой излучение лазера представляет собой периодическую последовательность ультракоротких импульсов высокой мощности.

Как показано в [1], указанный метод генерации УКИ может быть перенесен в СВЧ электронику. Оказалось, что пиковая мощность генерируемых импульсов может превосходить мощность стационарной генерации, а в ряде случаев и мощность запитывающего электронного потока [2].

Для практической реализации импульсного генератора планируется использовать в качестве усилителя и поглотителя две винтовых giro-ЛБВ (Рис. 1). Одна ЛБВ работает в режиме широкополосного электронного усилителя, другая Π в режиме нелинейного поглощения. Оценки показывают, в генераторе на основе двух винтовых giro-ЛБВ 8 мм диапазона (ускоряющее напряжение 68 кВ, ток пучка 10 А и ускоряющее напряжение 54 кВ, ток пучка 6 А соответственно) могут быть получены импульсы с длительностью по полувывсоте 0.2 нс, пиковой мощностью 400 кВт и частотой следования 140 МГц (Рис 2).

Работа поддержана грантом РФФИ-16-32-00816 мол_а.

1. Н. С. Гинзбург, Г. Г. Денисов, М. Н. Вилков *Письма в ЖТФ*, 2015, **41**(17), 44-51
2. N. S. Ginzburg, G. G. Denisov, M. N. Vilkov *PHYSICS OF PLASMAS*, 2016, **23**, 050702

Динамические перестройки топологической структуры намагниченности в движущихся границах магнитных доменов (численное моделирование)

Зверев В.В.¹, Филиппов Б.Н.^{1,2}, Дубовик М.Н.^{1,2}

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

Ферромагнитная пленка с движущейся доменной границей (ДГ) является интересным примером открытой системы потокового типа [1, 2]. Рост размеров домена, намагниченного вдоль внешнего поля $\mathbf{H}_0$, за счет домена с противоположной ориентацией намагниченности обеспечивает постоянный приток энергии, которая далее теряется магнитной подсистемой благодаря диссипации. Если величина $\mathbf{H}_0$ превышает критическое значение H_c , на фоне поступательного движения ДГ возникают периодические колебаний. Этот

режим движения в большинстве случаев оказывается неустойчивым: в пределах ДГ возникают сложные пространственно-временные магнитные структуры, состоящие из топологических солитонов. Типичны структуры, состоящие из вихревой и антивихревой нитей. В них пары нитей разного типа сходятся в общих точках в теле пленки или выходят на ее границы в виде поверхностных вихрей (v) и антивихрей (av). В процессе движения стадии “медленного” изменения намагниченности сменяются “быстрыми” актами топологических перестроек, которые связаны с изменением конфигурации намагниченности как на границах, так и в теле пленки, и строго подчиняются законам сохранения двух *топологических инвариантов* - *числа вращений* (для поверхностных v, av) и *гомотопического числа*. В частности, наблюдаются нижеперечисленные топологические перестройки (прямые и обратные): (i) аннигиляция (рождение) пары $v - av$, сопровождающаяся рождением (уничтожением) *сингулярной (блоховской) точки* $sp_{\pm}$, уходящей в тело пленки: $v_{\wedge} + av_{\vee} \Leftrightarrow sp_{+}$, $v_{\vee} + av_{\wedge} \Leftrightarrow sp_{-}$; (ii) одновременная аннигиляция (рождение) трех объектов: $v_{\wedge} + av_{\vee} + sp_{-} \Leftrightarrow \emptyset$, $v_{\vee} + av_{\wedge} + sp_{+} \Leftrightarrow \emptyset$ (индексы $\wedge/\vee$ означают, что намагниченность в коре v, av сонаправлена/противонаправлена внешней нормали к границе пленки; $\emptyset$ - результат полной аннигиляции); (iii) рождение (уничтожение) sp с переориентацией кора v или av : $v_{\wedge} + sp_{-} \Leftrightarrow v_{\vee}$, $v_{\vee} + sp_{+} \Leftrightarrow v_{\wedge}$, $av_{\wedge} + sp_{+} \Leftrightarrow av_{\vee}$, $av_{\vee} + sp_{-} \Leftrightarrow av_{\wedge}$; (iv) аннигиляция (рождение) v, av с сонаправленными намагниченностями в корах (без участия sp): $v_{\vee} + av_{\vee} \Leftrightarrow \emptyset$, $v_{\wedge} + av_{\wedge} \Leftrightarrow \emptyset$; (v) аннигиляция или рождение в теле пленки пары sp разного типа: $sp_{\pm} + sp_{\mp} \Leftrightarrow \emptyset$.

Нерегулярная динамика ДГ подобна столкновительной динамике в газах; роль столкновений играют “быстрые” акты топологических перестроек. В работе рассмотрены различные динамические сценарии на основе решения уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта с учетом обменной, магнитостатической и зеемановской энергий и наличия анизотропии. Использовались пакет `mtmx3` [3] и программы визуализации, основанные на расчете значений топологических зарядов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ на основе госзадания, проект € 2705.

1. Зверев В.В., Филиппов Б.Н. *ФТТ* **58** (2016) 473-484
2. Дубовик М.Н., Зверев В.В., Филиппов Б.Н. *ЖЭТФ* **150** (2016) 122-134
3. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. *AIP Advances* **4** (2014) 107133

Об особенностях хаотического поведения ЛПД при внешнем гармоническом воздействии

Козлов С.П., Мясин Е.А.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино

В работах [1] и [2] была предложена модель однопролчтного кремниевого лавинно-пролчтного диода (ЛПД) как колебательной системы с возможным хаотическим поведением. В работе [2] описывалась хаотичность в ЛПД при воздействии внешнего гармонического сигнала, частота которого совпадает с пролчтной частотой. Сообщалось, что по мере увеличения амплитуды сигнала в ЛПД возникает последовательность бифуркаций удвоения периода, за которой следует зона хаотических колебаний. К сожалению, там указаны

не все параметры ЛПД, применявшиеся при расчетах, в частности площадь перехода, не приведены характерные реализации колебаний и их спектры. Поэтому эта модель была применена при значениях параметров, свойственных реальным ЛПД миллиметрового диапазона. Но затрагивались и другие участки пространства параметров модели, оказавшиеся интересными с точки зрения хаотического поведения.

В спектрах были обнаружены компоненты, соответствующие гармоникам собственных колебаний системы, частота первой из которых отличается от частоты внешнего сигнала и зависит от совокупного набора параметров. При малых (меньше амплитуды первой гармоники) амплитудах внешнего сигнала это проявляется как биения, причем период биений зависит и от амплитуды внешнего сигнала. Подбором параметров можно уменьшить разницу этих частот, и тогда по мере увеличения амплитуды внешнего сигнала обнаруживается достаточно сложная эволюция поведения моделируемой системы.

При относительно большой площади перехода (оценивавшейся исходя из значения чмкости перехода) по мере увеличения амплитуды сигнала спектр процесса выглядел как результат амплитудной модуляции гармоник собственных колебаний, с постепенным увеличением числа компонент, расширением их результирующего спектра, увеличением глубины модуляции. При дальнейшем увеличении амплитуды внешнего сигнала все это опять уменьшается, вплоть до вырождения.

При выборе меньшей площади перехода разность частот оказывалась слишком большой, но это можно было компенсировать уменьшением чмкостей или уменьшением времени пролета. При малой разности частот по мере увеличения амплитуды внешнего сигнала вслед за биениями с разностью частот и постепенным уменьшением глубины модуляции обнаруживаются бифуркации удвоения периода и переходы в режим хаотических колебаний. Но полного соответствия с [2] не установлено.

Следует отметить, что амплитуда модулирующих колебаний примерно на 3 порядка меньше амплитуды сигнала. Это относится и к хаотической модуляции. Тем не менее, это явление может вносить существенный дополнительный вклад в шумы усилителей на ЛПД. Также обнаружено, что существуют зоны значений амплитуд сигнала, где любая модуляция отсутствует.

1. Андреев Ю.В., Мясин Е.А. *РЭ* т. 34 (1989) с. 2358
2. Андреев Ю.В., Беляев Р.В., Залогин Н.Н. *РЭ* т. 30 (1985) с. 7 с. 1436

Примеры сценариев возникновения хаоса в трехмерных неориентируемых отображениях

Гонченко А.С.; email: agonchenko@mail.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород

Для однопараметрических семейств трехмерных неориентируемых отображений изучаются сценарии возникновения странных гомоклинических (содержащих только одну неподвижную точку) аттракторов. Описаны 4 различных вида таких сценариев, приводящих к возникновению дискретных гомоклинических неориентируемых аттракторов: соответственно лоренцевского и восьмерочного типов (содержащих неподвижную точку типа

седло), а также двух типов спиральных аттракторов (содержащих неподвижную точку типа седло-фокус). Даны примеры реализации этих сценариев в случае трехмерных неориентируемых обобщенных отображений Эно.

Генерация широкополосного хаотического излучения миллиметрового диапазона в gyroусилителях с запаздывающей обратной связью

Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

Одним из важнейших достоинств gyroусилителей является то, что естественным диапазоном их работы является миллиметровый, а в перспективе - субмиллиметровый диапазон. Наряду со многими другими приложениями привлекательно использование таких усилителей для генерации шумоподобных сигналов, что может быть достигнуто при введении внешней запаздывающей обратной связи и реализации режима динамического хаоса. В данной работе проведено исследование двух типов подобных генераторов, в одном из которых в качестве активного элемента используется винтовая gyro-ЛБВ, а в другом Ц гироклистрон. Анализ проведен на основе нестационарных моделей с нефиксированной структурой ВЧ поля [1,2], позволяющих описывать многочастотное взаимодействие с учетом реальной дисперсии электродинамической системы, конечности полосы усиления, эффектов нелинейного насыщения усиления и т.д.

Показано, что для реализации режима развитого динамического хаоса на основе винтовой gyro-ЛБВ оптимален выбор расстройки циклотронного резонанса, соответствующей максимальной крутизне спада амплитудной характеристики усилителя после насыщения. Сделаны оценки параметров хаотического генератора с использованием параметров экспериментально реализованной в ИПФ РАН gyro-ЛБВ диапазона 35 ГГц [3], согласно которым возможна генерация многочастотного излучения с шириной спектра 3-4 ГГц со средней мощностью до 70 кВт при КПД порядка 10%.

Для генератора на основе гироклистрона показана необходимость снижения добротности выходного резонатора за счет использования открытых резонаторов с добротностью, близкой к минимальной дифракционной. Согласно оценкам, на основе экспериментально реализованного в ИПФ РАН гироклистрона диапазона 95 ГГц [4] может быть реализован источник хаотического излучения с шириной спектра 1-1.5 ГГц со средней мощностью до 50 кВт при КПД порядка 6%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант ϵ 16-02-00745.

1. N.S. Ginzburg et al. *Phys. Plasmas* **22** (2015) 113111.
2. N.S. Ginzburg, R.M. Rozental, A.S. Sergeev, I.V. Zotova. *Phys. Plasmas* **23** (2016) 113111.
3. S.V. Samsonov et al. *IEEE Trans. Electron Dev.* **61** (2014) 4264.
4. Засышкин Е.В., Гачев И.Г. Антаков И.И. *Изв. ВУЗов. Радиофизика* **55** (2012) 341.

Электронное управление хаотическим сигналом в параметрическом спин-волновом генераторе хаоса на основе клистрона-усилителя

Романенко Д.В., Медведева Т.М., Скороходов В.Н., Сысоев И.В., Дмитриев Б.С., Гришин С.В.

СарГУ, Саратов

В последние годы интерес исследователей в области динамического хаоса направлен на получение структурно устойчивого или "грубого" хаоса, который имеет потенциальную возможность использования в системах связи и коммуникации [1]. Одной из отличительных особенностей такого хаоса является относительное постоянство старшего показателя Ляпунова при изменении параметров динамической системы в небольшой области их значений. Одним из кандидатов на роль источника "грубого" хаоса является кольцевой спин-волновой генератор, работающий на эффекте трехволнового параметрического распада магнитостатических волн на коротковолновые спиновые волны. Использование в цепи внешней положительной обратной связи резонансного элемента в виде объемного резонатора [2] приводит к автономной генерации последовательностей солитоноподобных радиоимпульсов с хаотическим изменением фазы от импульса к импульсу. Такие импульсные последовательности не разрушаются, а старший показатель Ляпунова остается практически постоянным при изменении коэффициента усиления кольца в относительно широких пределах.

В качестве резонансного элемента в цепи обратной связи спин-волнового генератора хаоса может использоваться клистрон-усилитель, работающий в малосигнальном режиме [3]. В этом случае появляется возможность осуществления электронного управления импульсными последовательностями за счет изменения тока пучка и ускоряющего напряжения клистрона. В настоящем докладе приводятся результаты экспериментального исследования режимов генерации хаотических последовательностей радиоимпульсов при изменении тока пучка и ускоряющего напряжения клистрона. На основе экспериментальных временных рядов проведена оценка старшего показателя Ляпунова и получена его зависимость от обоих управляющих параметров клистрона-усилителя. Полученные результаты указывают на устойчивость генерируемых хаотических импульсных последовательностей к изменению параметров клистрона, а также на наличие резонансной зависимости у старшего показателя Ляпунова при изменении ускоряющего напряжения клистрона-усилителя.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (задание ̢ 2014/203) и РФФИ (грант ̢ 14-02-00329)

1. Кузнецов С.П. *УФН* **181** (2011) 121.
2. Гришин С.В., Голова Т.М., Морозова М.А., Романенко Д.В., Селезнџв Е.П., Сысоев И.В., Шараевский Ю.П. *ЖЭТФ* **148** (2015) 714.
3. Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Шараевский Ю.П. *Письма в ЖТФ* **36** (2010) 62.

Исследование свойств кольцевого широкополосного автогенератора хаоса микроволнового диапазона

Дмитриев Б.С., Садовников С.А., Скороходов В.Н.

СарГУ, Саратов

Генераторы хаотических колебаний на основе классических электровакуумных приборов СВЧ (ЛБВ и многорезонаторные клистроны), включенные как активные элементы в кольцевые радиофизические системы с запаздывающей обратной связью, представляют практический интерес для различных применений. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования сверхширокополосного генератора хаоса микроволнового диапазона на основе промышленной ЛБВ десятисантиметрового диапазона. В кольцо обратной связи автогенератора наряду с ЛБВ включены: переменный поляризационный аттенюатор для изменения глубины обратной связи, анализатор спектра и осциллограф реального времени Agilent для наблюдения временной реализации и гистограмм распределения вероятностей хаотического сигнала. Управляющими параметрами в таком автогенераторе являются параметры электронного потока и затухание в цепи обратной связи. Устойчивый широкополосный хаотический сигнал наблюдался в широком диапазоне частот 0.5 Ц 8 ГГц с интегральной мощностью 3 Вт.

Известно, что в ЛБВ благодаря нелинейным процессам группировки электронов возникают высшие гармоники сигнала. Такие гармоники просто наблюдать в автогенераторе с помощью широкополосного анализатора спектра. Подбором режимов удавалось наблюдать до четырех гармоник. Можно ответить, что в применяемой кольцевой схеме реализуется простой метод измерения соотношения мощностей основной и высших гармоник, что в обычных условиях требует довольно сложных метрических исследований. Полученные соотношения между гармониками хорошо соответствуют известным результатам.

Для целей практического применения широкополосных хаотических сигналов в информационных системах, как известно, необходимо получить поток хаотических радиоимпульсов с управляемыми параметрами [1]. Для реализации такой задачи был предложен метод внешнего управления широкополосным хаотическим сигналом, известный в литературе как синхронизация путем подавления хаоса внешним гармоническим сигналом с определенными параметрами. Ранее этот эффект экспериментально был изучен только для узкополосных автогенераторов. Для подавления сверхширокополосных сигналов этот эффект реализован впервые, на данный способ генерации хаотических радиоимпульсов получен патент РФ [2]. Наибольший интерес представляла задача получения коротких импульсов, были получены импульсы длительностью 1 мксек с регулируемой скважностью. Детальное изучение сигнала внутри такого импульса доказало его хаотический характер.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты €14-02-00329 и €14-02-00577) и государственного задания Минобрнауки РФ (задание € 2014/203).

1. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. Генерация хаоса. // М.: Техносфера, 2012. 424 с.
2. Патент на полезную модель N162361 к СВЧ генератор мощных сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов

Параметрические процессы в пленках железо-иттриевого граната на подложках кремния

¹Сахаров В.К., ¹Хивинцев Ю.В., ¹Высоцкий С.Л., ¹Филимонов Ю.А.,
¹Кожевников А.В., ²Стогний А.И.

¹СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, РФ; ²ГНПО «Научно-практический центр НАНБ по материаловедению», Минск, Беларусь.

Интерес к изучению структур на основе плчнок железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложках полупроводников обусловлен поиском путей интеграции на одном чипе устройств традиционной и спин-зависимой электроники, а также магноники.

В данной работе в двуслойной плчнке ЖИГ, выращенной на подложке кремния, были исследованы особенности распространения поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ), обусловленные параметрическими процессами, вкладом нелинейности в дисперсию, а также термическим нагревом СВЧ-мощностью.

Увеличение мощности входного СВЧ-сигнала P приводило к сдвигу зоны прохождения ПМСВ, образованию аномального участка роста амплитуды коэффициента прохождения (S_{21} -параметра) на его зависимостях от P (область I на рис.1), вызванные уменьшением намагниченности.

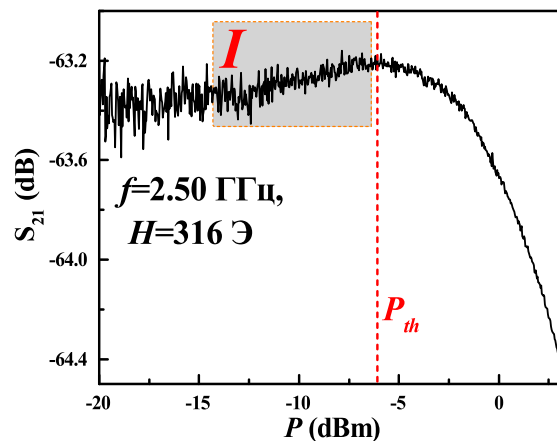


Рис. 1: Коэффициент прохождения в зависимости от входной мощности на частоте 2.5 ГГц, $H \approx 316$ Э.

Согласно модели двуслойной плчнки были рассчитаны значения дна спектра обратных объемных магнитостатических волн $\gamma H + F_{ex}$ (γ - магнитомеханическое отношение, H - внешнее магнитное поле, F_{ex} - обменный сдвиг), дающие возможность оценить граничную частоту процессов первого порядка $f_{th}^{3m} = 2(\gamma H + F_{ex})$ [1]. Для исследуемого образца трчхмагннные процессы ($f > f_{th}^{3m}$) оказываются разрешенными законами сохранения при $H < \sim 450$ Э, выше которых остаются только процессы второго порядка.

Из экспериментальных значений пороговых мощностей P_{th} и групповой скорости ПМСВ v_{gr} по выражениям из [2] была рассчитана динамическая составляющая намагниченности m , угол прецессии намагниченности φ_{th} , которые для процессов первого порядка составили $m \approx 10$ Гс, $\varphi_{th} \approx 5^\circ$, а для процессов второго порядка $m \approx 18$ Гс, $\varphi_{th} \approx 8^\circ$. Из полученных оценок данных величин были определены значения диссипативного параметра ΔH , составившие ~ 40 Э как для трчхмагннных, так и для четырчхмагннных процес-

сов, что согласуется с экспериментально измеренной шириной линии ферромагнитного резонанса образца при нормальном намагничивании. Полученные значения φ_{th} позволили также оценить нелинейный сдвиг дисперсии ПМСВ, который имел величину до 10 МГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ ϵ 16-57-00135, 16-07-01092, 16-02-01073, 16-37-60052, 14-07-00896, 16-29-14058.

1. Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Никитов С.А. *ФТТ* **30**,3 (1988) 827.
2. Казаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. *ФТТ* **39**,2 (1997) 330.

Условия развития диокотронной неустойчивости в сжатом состоянии релятивистского электронного пучка

Фролов Н.С., Храмов А.Е., Короновский А.А.

СарГУ, СГТУ, Саратов

В настоящее время протяженные релятивистские электронные пучки (РЭП) являются объектами пристального изучения специалистов, работающих в области физики плазмы и вакуумной СВЧ электроники. Интерес к исследованию таких электронных систем в режиме потери устойчивости продиктован тем, что протяженные РЭП находят широкое применение в ряде практических задач от генерации широкополосного и сверхмощного СВЧ и ТГц излучения до работы в ускорителях частиц, в том числе для ускорения ионов [1].

В литературе известны и детально описаны волновые процессы развития пучковых неустойчивостей, а также причин, приводящих к неустойчивому поведению пучка [2,3]. В основном рассматриваются случаи, когда электронный пучок распространяется в пространстве дрейфа в докритическом режиме. Также, популярность приобретают исследования, направленные на выявление особенностей возникновения и сосуществования различных типов пучковых неустойчивостей [4]. В рамках настоящей работы было проведено детальное численное моделирование процессов формирования “сжатого состояния пучка” с помощью PIC-кода в среде компьютерного моделирования CST Particle Studio. В ходе работы особое внимание было уделено процессам развития диокотронной неустойчивости в сжатом состоянии РЭП.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (ϵ 16-32-60107).

1. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves, CRC Press, Taylor and Francis, 2015
2. Miller R.B. An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams, Plenum Press, New York, 1982
3. Ender A.Y. et al. *Physics of Plasmas* **18** (2011) 033502
4. Kurkin S.A. et al. *Physics of Plasmas* **22** (2015) 122110

Развитие релятивистских магнетронов

Fuks M., Schamiloglu E., Ковалев Н.

University of New Mexico, USA; ИПФ РАН, Нижний Новгород

1986 г. - G.Bekefi - 1-й релятивистский магнетрон [1] был с традиционной конструкцией - с выводом излучения через узкую щель из одного из резонаторов анодного блока. Такой магнетрон может работать только на невырожденных модах (или 2 мода). Любая другая мода расщепляется на моды с синусоидальным и косинусоидальным распределениями поля таким образом, что их пучность и узел поля фиксируются около резонатора с выводом излучения. Мода с такой пучностью поля слабо связана с выводом, поэтому Q-фактор такой моды выше, ВЧ поле нарастает быстрее, и магнетрон будет работать именно на этой моде. В случае перескока на вырожденную моду магнетрон будет работать практически без вывода излучения, грея свои электроды до их разрушения. К тому же такой магнетрон имеет низкий порог ВЧ пробоя.

1987 г. - Н. Ковалев, М. Фукс - релятивистский магнетрон с дифракционным выводом (МДВ) [2], т.е. магнетрон с выводом излучения вдоль оси через коническую антенну, резонаторы анодного блока в которой продолжены с уменьшающейся глубиной до сечения с радиусом, превышающем критическое значение для частоты излучаемой волны. В таком осесимметричном магнетроне любая мода может быть рабочей, Порог ВЧ пробоя в МДВ много выше порога в магнетроне с традиционной конструкцией. Кроме того, в МДВ реализуется распределение с одной вариацией ВЧ поля вдоль оси [3], которое имеет максимальный Q-фактор среди других продольных мод.

1988 г. - Н. Ковалев, М. Фукс - дифракционный вывод (ДВ) как преобразователь мод [4]. Когда МДВ с идентичными резонаторами работает на моде, для преобразования этой волны в волну с более простой структурой поля в ДВ продолжают только те резонаторы, в которых поляризация поля соответствует поляризации поля желаемой волны [5]. Например, для преобразования рабочей моды в 6-ти резонаторном магнетроне в ТЕ01-волну следует продолжить в ДВ каждый второй резонатор В том же магнетроне для излучения ТЕ11-моды следует продлить в ДВ два диаметрально противоположных резонатора либо четыре резонатора за исключением вышеуказанных 2-х резонаторов.

2005 г. - M. Fuks & E. Schamiloglu - прозрачный катод [6], т.е. катод, состоящий из отдельных эмиттеров, периодически расположенных вокруг оси магнетрона. Для азимутального ВЧ поля, определяющего скорость передачи энергии электронов ВЧ полю при заданном магнитном поле, такой катод прозрачен в отличие от сплошного металлического катода, на котором $\omega = 0$. Это азимутальное поле на электронном потоке, дрейфующем вокруг сплошного катода, мало. Поэтому радиальный дрейф электронов к аноду, определяющим скорость нарастания ВЧ поля, намного медленнее, чем фронт прикладываемого напряжения (как правило, для релятивистских ВЧ источников, питаемых сильноточными ускорителями, фронт напряжения примерно равен 10 нс. Для магнетронов с прозрачным катодом мощность излучения достигает максимальной величины примерно за время, равное длительности фронта напряжения).

2010 г. - M. Fuks & E. Schamiloglu - оптимизация ДВ [7] в виде конической антенны, в которую резонаторы продолжены с увеличивающейся глубиной, как это было предложено в [8]. Численное моделирование МДВ с оптимизированным ДВ и с прозрачным катодом, но без учета проводимости материала, показало [7], что электронный КПД такого магнетрона выше 70%. В эксперименте [10] электронный КПД этого магнетрона из нержавеющей

стали равен 63%.

2012 г. - M.I. Fuks & E. Schamiloglu - компактный МДВ. На основе [5] реализован компактный магнетрон [11], включая его магнитную систему с, использованием для преобразования рабочей моды в моду TE₁₁ тот факт, что максимальный радиус резонаторов анодного блока больше радиуса, соответствующего критической частоте этой излучаемой волны.

2015 г. - M. Fuks & E. Schamiloglu - эффективный МДВ на протяженном виртуальном катоде (ВК) [11]. Реальный катод в пространстве взаимодействия подвержен интенсивной электронной бомбардировке. Кроме того, в релятивистских ВЧ источниках используется, как правило, взрывоэмиссионный катод, который является также источником плазмы, быстро распространяющейся поперек магнитного поля. Это приводит к закорачиванию зазора между катодом и анодом, т.е. к ограничению длительности импульса. Поэтому предложено вынести катод из пространства взаимодействия и создать на его месте протяженный ВК путем формирования локальных ВК так, чтобы прямой пучок от первого ВК и отраженный пучок от второго ВК создавали настолько большой заряд в пространстве взаимодействия, чтобы его потенциал становился близок к нулю. Компьютерное моделирование с использованием кода [9] показало возможность такого состояния. Кроме того, моделирование показало, что МДВ на таком протяженном катоде может работать столь же эффективно, как с реальным катодом. Реальный катод вне пространства взаимодействия может быть использован в секционированной электронной пушке с магнитной компрессией, что позволяет использовать другие виды эмиссии без образования плазмы.

В настоящее время готовится эксперимент с МДВ на протяженном ВК.

1. Bekefi G., Orzechowski J.J. *Phys. Rev. Lett.* **37** 6 (1976) 379-382
2. Ковалев Н.Ф., Кольчугин Б.Д., Нечаев В.Е., и др. *Письма в ЖТФ* **3** (1997) 430-431
3. Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М. и др. *Изв. ВУЗов, Радиофизика* **12** 8 (1969) 1236-1244
4. И.И. Винтизенко, Н.Ф. Ковалев, А.С. Су-лакшин, Г.П. Фоменко и М.И. Фукс, "Преобразование энергии квазистатических полей сильнооточных релятивистских электронных пучков в ВЧ излучение Релятивистская высокочастотная электроника, Горький, 1988.
5. Fuks M.I., Kovalev N.F., Andreev A.D., Schamiloglu E. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 3 (2006) 620-626
6. Fuks M.I., Schamiloglu E. *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 205101
7. Fuks M.I., Schamiloglu E. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **8** 6 (2010) 1302-1312
8. Daimon M., Jiang W. *Appl. Phys. Lett.* **91** 0.19 (2007) 191503-191505
9. Goplen B., Ludeking L., Smithe D., Warren G. *Comput. Phys. Commun.* **87** 1 (1995) 54-86
10. Leach C., Prasad S., Fuks M., Schamiloglu E. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 8 (2011) 819-822
11. Fuks M., Prasad S., Schamiloglu E. *IEEE Trans. Plasma Sci.* submitted in November, 2015

Радиоосвещение и источники для него на основе миниатюрных СВЧ генераторов динамического хаоса"

Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М. Ю., Исков В.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Моск. области

Под радиоосвещением будем понимать локальное, искусственно созданное, шумовое (шумоподобное) поле широкополосного (сверхширокополосного) некогерентного в пространстве и во времени излучения в радио или микроволновом диапазоне длин волн. Радиоосвещение реализуется при помощи одного или нескольких устройств некогерентного излучения. Попадая на близлежащие поверхности и предметы микроволновое излучение частично поглощается в них, частично проходит через них и частично отражается. Тем самым распространяясь далее оно несет в себе информацию о среде с которой взаимодействует. В этом отношении ситуация аналогична ситуации с обычным (видимым) светом. Разница в том, что это другой частотный диапазон и другие законы взаимодействия со средой, в которой происходит процесс. Кроме того, для обычного света имеется такой замечательный инструмент наблюдения как глаз. Для извлечения информации об объектах, находящихся в зоне радиоосвещения (радиосвета) нужны специальные датчики или системы таких датчиков. Сходство между радиосветом и обычным светом достаточно глубокое. В обоих случаях речь идет о некогерентном излучении с широким спектром, что исключает эффекты интерференции и сводит вопросы наблюдения к оценке мощностных (и возможно спектральных, как в случае цветового зрения) характеристик принимаемого сигнала. Принципиальной особенностью радиосвета по отношению к обычному свету является громадная разница в характерной области частот (примерно на пять порядков) для света и радиосвета. Последнее означает существенно более низкую потенциальную разрешающую способность при использовании радиосвета по сравнению с видимым светом. Однако, очевидно, существует достаточно много ситуаций, когда это, либо приемлемо, либо не имеет принципиального значения. В докладе рассматривается задача создания эффективных источников радиоосвещения. В настоящее время такие источники отсутствуют. Предлагается использовать для источников радиоосвещения микрогенераторы динамического хаоса СВЧ диапазона. Описывается эволюция развития твердотельных генераторов от устройств на микрополосковых устройствах до приборов на кристаллах в виде микросхем. Описывается экспериментальная лампа для радиосвещения: обсуждаются ее характеристики и возможные направления применения.

Predicting the Unpredictable: New Possibilities for Absence Seizure Control

Maksimenko V.A., Makarov V.V., Luttjohann A., Koronovskii A.A., Gilles van Luitelaar, Hramov A.E.

REC "Nonlinear Dynamics of Complex Systems", Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Polytechnicheskaya 77, Saratov, 410054, Russia

Institute of Physiology I, University of Munster, Robert-Koch-Str 27a, 48149 Munster, Germany
Saratov State University, Astrahanskaja 83, Saratov, 410012, Russia

The ultimate goal of epileptology is complete seizure control. So far, seizure abolishment is to a large extent achieved by pharmacological interventions in a restricted number of patients. The non-responders are dependent on alternative treatments, such as closed-loop deep brain stimulation, in which seizures are automatically detected and trigger a form of electrical stimulation which is aimed to subsequently abort seizures [1, 2].

A possible new direction to accomplish the above goal is the development of a closed-loop stimulation system, which would prevent (not abort) seizures [3]. This addresses the problem of seizure prediction, which despite some successes in temporal lobe epilepsy, remains practically unresolved for absence seizures, a prototypical form of secondary generalized seizures, which have been regarded as sudden and unpredictable [4-7].

In the current work we developed an on line absence seizure prediction algorithm, evaluated its performance and implemented the algorithm in an on-line, closed loop stimulation system aimed to predict and prevent spike-wave discharges (SWD), the electrophysiological anchor of absence seizures, in a genetic absence rat model. The algorithm correctly predicted 88% of SWDs while the remaining SWDs were quickly detected, but this went along with a high number of false positives, which were mainly seen during light sleep. Inclusion of an additional prediction criterion greatly reduced the false alarm rate of the algorithm, albeit with a reduction in the sensitivity. Implementation of the latter version into a closed loop electrical stimulation system resulted in a 72% decrease of seizure activity.

In contrast to long standing beliefs, these results demonstrate that absence seizures can be predicted to some extent and that the development of closed loop seizure prediction and prevention system is an interesting and feasible future direction to strive for seizure freedom.

1. R. Fisher, V. Salanova, T. Witt, R. Worth, T. Henry, R. Gross, K. Oommen, I. Osorio, J. Nazzaro, D. Labar, M. Kaplitt, M. Sperling, E. Sandok, J. Neal, A. Handforth, J. Stern, A. DeSalles, S. Chung, A. Shetter, D. Bergen, R. Bakay, J. Henderson, J. French, G. Baltuch, W. Rosenfeld, A. Youkilis, W. Marks, P. Garcia, N. Barbaro, N. Fountain, C. Bazil, R. Goodman, G. McKhann, K. Babu Krishnamurthy, S. Papavassiliou, C. Epstein, J. Pollard, L. Tonder, J. Grebin, R. Coffey, N. Graves, S. S. Group. *Epilepsia* 51, 899-908 (2010).
2. V. Salanova, T. Witt, R. Worth, T. R. Henry, R. E. Gross, J. M. Nazzaro, D. Labar, M. R. Sperling, A. Sharan, E. Sandok, A. Handforth, J. M. Stern, S. Chung, J. M. Henderson, J. French, G. Baltuch, W. E. Rosenfeld, P. Garcia, N. M. Barbaro, N. B. Fountain, W. J. Elias, R. R. Goodman, J. R. Pollard, A. I. Troster, C. P. Irwin, K. Lambrecht, N. Graves, R. Fisher, S. S. Group, *Neurology* 84, 1017-1025 (2015).
3. W. C. Stacey, B. Litt, *Nat Clin Pract Neurol.* 4, 190-201 (2008).
4. H. Feldwisch-Drentrup, B. Schelter, M. Jachan, J. Nawrath, J. Timmer, A. Schulze-Bonhage, *Epilepsia* 51, 1598-1606 (2010).
5. B. Jobst, *Epilepsy research* 89, 154-161 (2010).
6. F. H. L. Lopes da Silva, W. Blanes, S. N. Kalitzin, J. Parra, P. Suffczynski, D. N. Velis, *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING* 50, 540-548 (2003).
7. F. Mormann, R. G. Andrzejak, C. E. Elger, K. Lehnertz, *Brain : a journal of neurology* 130, 314-333 (2007) .
8. Tor A.I. Chaos in figures. Nauka, Moscow, 1997.
9. Ivanov V.S., Sidorov S.L. *Phys. Rev. E* **25** (2007) 076104

Беспроводные сверхширокополосные активные сети на основе хаотических радиоимпульсов

Дмитриев А.С.

ИРЭ РАН, Москва

Беспроводные сенсорные сети стремительно набирают популярность, приобретая новые черты и претендуя на новые области применения. Для такой экспансии требуются новые технические решения, обладающие значительно более высокими скоростями передачи по сравнению с существующими, с малым потреблением мощности на этих скоростях, а также повышение гибкости устройств (узлов сети) и программного обеспечения, с целью достижения многофункциональности.

Одним из таких научно-технических решений может стать использование в беспроводных сетях в качестве носителя информации хаотических сигналов, которые давно привлекают внимание исследователей как переносчик информации для беспроводных средств связи. Однако, наряду с хорошо известными достоинствами этих сигналов, существует ряд проблем, которые требуют своего решения при практической реализации этой идеи. При этом существует серьезный разрыв в том, как понимают связь с использованием хаотических колебаний исследователи нелинейных явлений и что такое связь с точки зрения специалистов в области коммуникаций. В лекции обсуждается различие в этом понимании на примере прямохаотических систем связи. Этот вопрос представляется принципиальным для становления и развития хаотических коммуникаций.

Далее рассматриваются активные и сенсорные беспроводные сети, использующие в качестве носителя информации для беспроводной передачи сверхширокополосные хаотические импульсы. Описывается предложенный, разработанный и исследованный универсальный приемопередающий модуль для узлов активных сетей и различные типы узлов на его основе. Рассматривается структура активных сверхширокополосных беспроводных сетей и принципы их функционирования для статических и мобильных приложений. Показывается перспективность использования предложенных решений для организации связи и навигации в группировках роботов. Приводятся примеры экспериментальных сетей на основе универсального модуля и их характеристики.

Динамика фазовых систем синхронизации с однонаправленными связями

Алешин К.Н., Матросов В.В.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

К математическим моделям связанных систем синхронизации проявляют интерес специалисты многих областей науки и промышленности как к основному инструменту для изучения многомерных ансамблей осцилляторных элементов. Примерами таких ансамблей могут служить группы прецизионных эталонов частоты [1], нейронные сети [2], ансамбли осцилляторов Курамото [3] и т.д.

В докладе представлены результаты изучения динамики модель цепочки однонаправленно связанных генераторов с фазовым управлением (систем фазовой автоподстройки

частоты – ФАП) [4]. Детально рассматриваются синхронные режимы и асинхронные режимы ансамблей малой размерности. В пространстве параметров выделены области существования режима глобальной синхронизации, определены границы существования синхронного режима для отдельных элементов цепочки, изучены сценарии потери устойчивости элементами цепочки. Проведен бифуркационный анализ движений моделей ансамблей малой размерности. Выделены области с различным динамическим поведением, проанализированы пути смены режимов при вариациях параметров, прослежена эволюция структуры пространства параметров с ростом числа элементов цепочки. Обнаружен эффект подавления колебаний вниз по цепочке.

Изучено влияние инерционности цепи управления ФАП на динамику ансамбля. Установлено, что с ростом инерционности происходит перекрытие областей параметров с различной динамикой, что объясняет явление высокой мультистабильности. Показано, что увеличение инерционности может приводить к хаотизации автоколебаний через каскад бифуркаций удвоения периода и перемежаемость.

Работа поддержана грантом между МОН РФ и ННГУ (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003).

1. Использование синхронизации для уменьшения фазового шума в группе прецизионных генераторов / К.Г. Мишагин [и др.] // Труды Института прикладной астрономии РАН, вып. 32, 2015.
2. Matrosov V. V., Mishchenko M. A., Shalfeev V. D. Neuron-like dynamics of a phase-locked loop //The European Physical Journal Special Topics. – 2013. – Т. 222. – N. 10. – С. 2399-2405.
3. Abrams D. M., Strogatz S. H. Chimera states in a ring of nonlocally coupled oscillators //International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2006. – Т. 16. – N. 01. – С. 21-37.
4. Матросов В.В., Алешина К.Н., Шалфеев В.Д. Динамика малых ансамблей систем фазовой синхронизации с однонаправленными связями //Изв.вузов. Радиофизика. - 2016. - Т. 59.- N 1. - С. 55-66.

Развитие хаоса и подавление клеточной активности в сети динамически связанных нейроподобных элементов

Калякулина А.И., Панкратова Е.В.

ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород

В данной работе рассматривается система из n нейроподобных элементов, каждый из которых описывается уравнениями ФитцХью-Ринцеля. Данные элементы связанных как линейно, так и через общую внешнюю среду посредством дифференциального уравнения первого порядка:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= x_i - x_i^3/3 - y_i + z_i + \varepsilon(w - x_i) + \sum_{j=1}^n \xi_{ij}x_j, \\ \dot{y}_i &= \gamma(x_i - by_i), \\ \dot{z}_i &= \mu(c - x_i - dz_i), \\ \dot{w} &= -hw + \varepsilon \sum_{j=1}^n (x_j - w), \quad i = 1, \dots, n\end{aligned}\tag{1}$$

где x_i – изменение мембранного потенциала i -ой клетки, y_i и z_i – транспорт ионов через быстрый и медленный ионные каналы, w – состояние внешней среды [1]. Матрица $\mathcal{G} = \{\xi_{ij}\}$ – симметричная матрица связи размера $n \times n$, неотрицательные элементы ξ_{ij} , $i \neq j$ которой указывают на наличие диффузионной связи между i -ым и j -ым осциллятором сети. Параметр ε отвечает за силу взаимодействия нервных клеток и внешней среды, параметр h имеет смысл вязкости внешней среды.

Для параметров системы (1), удовлетворяющих условию:

$$\left[\frac{1}{b} + \frac{1}{d} - 1 + \frac{h\varepsilon}{h + n\varepsilon} \right]^3 + \frac{9c^2}{4d^2} > 0, \quad (2)$$

показано, что состояние равновесия $O_*(x_*, y_*, z_*, w_*)$ единственно и располагается на синхронном многообразии $\mathbf{M} : \{\mathbf{X}_i = \{x_i, y_i, z_i\} \mid \mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_2 = \dots = \mathbf{X}_n\}$. В результате использования необходимого условия устойчивости для данного состояния равновесия получена оценка порогового числа элементов в сети, которое обеспечивает незатухающую популяционную динамику при

$$n > n^* = \frac{b_1 b_2 - \mu d \gamma b - \gamma - \mu - h(b_1 - b_2)}{\varepsilon[(b_1 - b_2) - \varepsilon]}, \quad (3)$$

где $b_1 = \mu d + \gamma b$, $b_2 = 1 - x_*^2 - \varepsilon$, $\mu d + \gamma b + x_*^2 < 1$. Так как состояние равновесия единственно, то подавление колебаний в системе (1) происходит по сценарию амплитудной смерти [2].

В работе показано, что характер сетевой колебательной динамики существенно зависит от параметров, определяющих вязкость среды и степень ее влияния на поведение элементов сети. В частности, в результате вычисления спектра показателей Ляпунова были получены области существования хаотических аттракторов. На основе анализа значений мультипликаторов вблизи границ полученных областей сделаны выводы о возможности различных сценариев развития хаоса в исследуемой системе.

1. Pankratova E., Kalyakulina A. Environmentally-induced amplitude death and firing provocation in large-scale networks of neuronal systems. Regular and Chaotic Dynamics. V.1, 2017 (in press).
2. Resmi V., Ambika G., Amritkar R.E., Rangarajau G. Amplitude death in complex networks induced by environment. Phys. Rev. E 85, 046211, 2012.

Анализ эволюции структуры конкурирующих слоев многослойной адаптивной сети осцилляторов

Кирсанов Д.В., Недайвозов В.О., Макаров В.В., Храмов А.Е.

СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов

Изучение обратной связи между эволюцией структуры и динамикой адаптивных сетей является ключом к пониманию множества процессов, происходящих как на макроуровне Ч в сетях городов и популяций [1] и социальных системах [2], так и на микроуровне Ч в биологических сетях [3], и нейронных ансамблях [4]. В свою очередь, выявление принципов взаимодействия между отдельными адаптивными сетями, таких как кооперация и

конкуренция, представляется важной задачей, исследование которой позволит получить более целостное представление о процессах, протекающих в реальных системах [5].

В качестве такой системы, состоящей из взаимодействующих подсетей может быть рассмотрена многослойная сеть (multiplex network) динамических элементов, слои которой содержат идентичный набор узлов, но имеют различную топологию связей. В настоящей работе исследуется структура и динамика многослойной адаптивной сети фазовых осцилляторов, структура слоев которой имеет обратную связь с динамикой элементов и эволюционирует согласно принципам аддитивности [2] и гомеостаза [6]. Взаимодействие между слоями исследуемой модели происходит по принципам конкуренции, приводящей к динамическому перераспределению связей внутри каждого слоя.

С помощью разработанной модели была численно рассчитана динамика процессов конкуренции и синхронизации в многослойной сети осцилляторов при изменении управляющих параметров τ времени адаптации, T , между элементами и силы связи, λ . Обнаружено что режимы глобальной синхронной динамики характеризуются возникновением идентичной топологии взаимодействующих слоев и однородным распределением связей внутри каждого слоя. При этом режимы частичной синхронизации и кластерной синхронизации приводят к появлению внутри слоев топологий, характеризующихся свойством свободного масштабирования и уникальных для каждого слоя. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что развитие математических моделей динамических сетей на основе принципов, реализующихся в реальных системах, таких как гомеостазис и конкуренция, дают возможность получить структуры сети, близкие к существующим в природе, и лучше понять принципы такой коллективной организации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-32-00334 и 15-52-45003).

1. Onnela J.P., Saramäki J., Hyvönen J. A. et al. *Proc. Nat. Acad. Sci. E USA*. **104** (2007) 7332
2. McPherson M., Smith-Lovin L., M Cook J. *Ann. Rev. Sociol.* **27** (2001) 415
3. Valencia M., Pastor M.A., Fernandez-Seara V.A. *Phys. Rev. E*. **77** (2008) e 5 050905
4. Ulhaas P.J. *Frontiers Neurosc.* **3** (2009) 17
5. Van Ooyen A. *Computation in Neural Systems*. **12** (2001) 1
6. Gutiérrez R., Amann A., Assenza S. et al. *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 234103

Формирование структур в предбифуркационной области параметров в случае субкритической бифуркации Тьюринга

Кузнецов М.Б., Полежаев А.А.

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва

Пространственно-временные структуры образуются в системах различной природы, и их очевидное сходство говорит о том, что за их формированием стоят общие законы, а значит, результаты, полученные при исследовании определенной системы, могут быть обобщены на системы другой природы. Это послужило значительным стимулом для исследования механизмов, ответственных за формирование структур. В экспериментах наблюдаются как нелокализованные структуры, которые занимают всё доступное им пространство, так и локализованные.

На примере системы уравнений, аналогичной модели ФитцХью-Нагумо, мы демонстрируем возникновение локализованных структур в результате жесткого возбуждения в области параметров до субкритической бифуркации Тьюринга и показываем, что при определенных условиях происходит последовательная самопроизвольная достройка этих структур. Результат достройки напрямую зависит от размерности пространства – как в одномерном, так и в двумерном случаях вблизи линии бифуркации возникают диссипативные структуры, схожие со структурами Тьюринга, образующимися после прохождения системой бифуркации, но в двумерном случае при отдалении от линии бифуркации возникают более сложные лабиринтные структуры.

Коллективная динамика идентичных бистабильных автогенераторов с запаздывающей обратной связью, связанных через общее поле

Кульминский Д.Д.^{1,2}, Пономаренко В.И.^{1,2}, Караваев А.С.^{2,1}, Хорев В.С.², Прохоров М.Д.¹

¹*СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов,* ²*СарГУ, Саратов*

Задача изучения пространственно-временной динамики ансамблей осцилляторов уже несколько десятилетий привлекает к себе большое внимание. При исследовании этой задачи было открыто много интересных нелинейных явлений, одним из которых является относительно недавно обнаруженное состояние кхимера. Этот термин был впервые введен в работе [1] для обозначения состояния, при котором в ансамбле идентичных осцилляторов существует две области, в одной из которых элементы синхронны, а в другой несинхронны. Состояния кхимера были обнаружены в различных ансамблях осцилляторов, как при теоретических [1-4], так и при экспериментальных исследованиях [5].

В настоящей работе мы численно и экспериментально исследовали особенности коллективной динамики в ансамблях идентичных бистабильных автогенераторов с запаздывающей обратной связью, связанных между собой через общее поле, которое формируется путем сложения сигналов с выходов всех генераторов, сдвига фазы результирующего сигнала и подачи на каждый из генераторов в качестве внешнего воздействия. Обнаружены режимы, при которых в исследуемом ансамбле формируется два кластера, каждый из которых в зависимости от величины фазового сдвига общего поля может демонстрировать как синхронное, так и несинхронное поведение входящих в него элементов. Для получения разной величины фазового сдвига общего поля для элементов соседних кластеров использовано два оригинальных подхода. В первом случае параметры идентичных бистабильных генераторов с запаздыванием подобраны таким образом, чтобы одна группа элементов совершает колебания на основной моде, а другая группа совершает колебания на третьей гармонике основной моды. Во втором случае все элементы ансамбля совершают колебания на одной моде, а разный фазовый сдвиг общего поля достигается за счет того, что в качестве фильтра в автогенераторах использована *RC*-цепочка с нелинейной емкостью, что обеспечивает зависимость частоты генерации от постоянного смещения, величина которого отличается для бистабильных состояний элементов.

Исследованы режимы, при которых элементы в каждом кластере синхронны, элементы в каждом кластере несинхронны и элементы одного кластера синхронны, а другого кла-

стера несинхронны, что соответствует состоянию кхимера. Показано, что перечисленные режимы можно получить, как для периодических, так и для хаотических колебательных состояний элементов ансамбля.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант € 16-02-00091.

1. Abrams D.M., Strogatz S.H. *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 174102
2. Singh R., Sinha S. *Phys. Rev. E* **87** (2013) 012907
3. Yeldesbay A., Pikovsky A., Rosenblum M. *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 144103
4. Zakharova A., Kapeller M., Scholl E. *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 154101
5. Larger L., Penkovsky B., Maistrenko Y. *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 054103

Унификация процедуры вычисления матриц Якоби систем с высокой размерностью фазового пространства на основе сетевого формализма

Купцов П.В.

СГТУ, Саратов

Значительное количество численных методов анализа динамики нелинейных систем опирается на использование матриц Якоби. С формальной точки зрения вычисление этой матрицы представляется достаточно простой операцией. Однако почти всегда на практике это легко осуществить только для систем с низкой размерностью фазового пространства. В настоящей работе предлагается формализм, позволяющий унифицировать процедуру построения матриц Якоби для достаточно широкого класса систем высокой размерности. Развиваемый подход основан на том, что большое число систем высокой размерности имеют в своей структуре хорошо выраженные локальные колебательные элементы некоторым образом связанные друг с другом. В одних случаях, как, например, у решчток связанных отображений, эта структура просматривается очевидным образом, в других она возникает при построении конечно-разностного приближения, используемого при построении численной схемы решения соответствующих динамических уравнений. Наличие таких связанных элементов позволяет предложить в достаточной степени универсальную форму записи модельных уравнений в виде динамической сети. В свою очередь, для этой формы можно сравнительно легко найти общую формулу для матрицы Якоби и использовать её при вычислении этой матрицы в ходе численного моделирования. Предложенный формализм позволит упростить процедуру вычисления матриц Якоби и, следовательно, повысить эффективность исследований собственно динамических сетей, решчток связанных отображений, систем заданных уравнениями в частных производных и систем с запаздыванием.

Бифуркационный анализ взаимной синхронизации двух осцилляторов, связанных с задержкой

Адилова А.Б., Герасимова С.А., Рыскин Н.М.

СарГУ, Саратов

Изучение проблемы синхронизации связанных осцилляторов относится к числу основных направлений развития нелинейной динамики. Описание различных систем в терминах взаимодействующих осцилляторов используется в радиофизике, микроволновой электронике, биофизике, химии. В частности, взаимная синхронизация связанных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов широко применяется в системах сложения мощностей. Однако в СВЧ диапазоне нельзя не учитывать время задержки сигнала между двумя генераторами, поскольку расстояние между ними может существенно превышать длину волны. Взаимная синхронизация осцилляторов, связанных с задержкой является предметом активного изучения [1]. В работе [2] была введена в рассмотрение модель двух связанных генераторов с задержкой, которая описывается уравнениями для медленно меняющихся амплитуд

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dt} + \frac{i\Delta}{2}A_1 &= (\lambda_1 - |A_1|^2)A_1 + \rho_1 e^{-i\psi}A_2(t - \tau), \\ \frac{dA_2}{dt} - \frac{i\Delta}{2}A_2 &= (\lambda_2 - |A_2|^2)A_2 + \rho_2 e^{-i\psi}A_1(t - \tau), \end{aligned} \quad (1)$$

где Δ — нормированная частотная расстройка, $\lambda_{1,2}$ — параметры возбуждения, $\rho_{1,2}$ — коэффициенты связи, τ — время задержки, $\psi = \omega_0\tau$ — набег фазы сигнала за время прохождения по цепи связи, $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$ — средняя частота.

В настоящей работе представлены результаты более подробного изучения вышеуказанной системы. В случае малого значения времени задержки проведено исследование уравнений (1) с помощью программного пакета XPPAUT, который предназначен для решения обыкновенных дифференциальных уравнений и построения бифуркационных линий [3]. Полученные результаты обнаруживают ряд отличий по сравнению с фазовым приближением, рассмотренным в работе [2]. Результаты бифуркационного анализа хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

1. Клиньшов В.В., Некоркин В.И. Синхронизация автоколебательных сетей с запаздывающими связями. *Успехи физических наук* **183** (2013) 1323
2. Usacheva S.A. and Ryskin N.M. Phase locking of two limit cycle oscillators with delay coupling. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* **24** (2014) 023123
3. <http://www.math.pitt.edu/~bard/xpp/xpp.html>

Исследование синхронизации в сети осцилляторов Курамото с использованием технологии параллельных вычислений CUDA

Недайвозов В.О., Кирсанов Д.В., Макаров В.В., Храмов А.Е.

СГТУ, Саратов

Одной из наиболее важных задач теории сложных сетей определение принципов влияния топологии сети на ее динамические свойства, в том числе, на синхронизацию ее элементов [1]. Моделирование таких сетевых структур требует огромных вычислительных мощностей, которые в современном мире можно получить с помощью параллельного программирования, в данной работе для расчета динамики элементов сети используется технология NVidia CUDA [2].

В данной работе проводится изучение процессов синхронизации в сети, топология которой обладает свойством гомеостазиса ограничения и постоянства входящих связей каждого элемента [3]. В качестве исследуемой сети используется модель Курамото [4], являющаяся эффективным инструментом анализа коллективной динамики систем различной природы [5,6]. Динамическое состояние i -го узла данной сети определяется соотношением

$$\dot{\phi}_i = \omega_i + \lambda \sum w_{ij} \sin \phi_i - \phi_j$$

где $N=300$ — количество элементов сети, w_{ij} — вес связи соединяющей узлы i и j , λ — сила связи, при больших значениях которой, синхронизация фаз элементов сети происходит быстрее, а при малых λ может не происходить вовсе. Изначально фазы (ϕ_i) и натуральные частоты (ω_i) взаимодействующих элементов заданы случайно на отрезке $[-\pi; \pi]$. Вычисление динамики фаз всех элементов производится на GPU с помощью технологии NVidia CUDA, что позволяет существенно увеличить вычислительную производительность за счет использования мощности графического процессора.

Для того чтобы исследовать влияние гомеостазиса топологии сети на синхронизацию элементов матрица связей задавалась следующим образом. Для каждого элемента сети было случайно выбрано n_c входящих связей, каждая из которых задавалась в случайном диапазоне $[0; 1]$. При этом суммарная входящая связь каждого узла нормировалась на единицу $\sum W_{ij} = 1$, в результате чего эффективная сила связи в сети не менялась в зависимости от параметра n_c . С помощью разработанного программного пакета было изучено влияние количества входящих связей n_c каждого элемента и силы связей λ на степень синхронизации сети.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-02-00624) и Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 931, 3.23.2014/К).

1. Arenas A., Diaz-Guilera A., Pérez-Vicente C. J. *Phys. Rev. Lett.* **96** (2010) 114102
2. Nowotny T. *BMC Neuroscience*. **12** (2011) 239
3. Gutiérrez R., Amann A., Assenza S. et al. *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 234103
4. Kuramoto Y. *Lect. Notes in Phys.* **30** (1975) 420
5. Stehlé J., Voirin N., Barrat A. et al. *Phys. Rev. E*. **81** (2010) 3 035101
6. Van Ooyen A. *Computation in Neural Systems*. **12** (2001) 1

Использование топологических методов в задаче мониторинга критических изменений кардиодинамики человека

Романец И.А.¹, Копылов Ф.Ю.², Гурия Г.Т.^{1, 3}

¹ ФГБУ Гематологический научный центр МЗ РФ, Москва

² Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, Москва

³ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Применение топологических методов для изучения динамики активных сред началось еще в 1980х годах [1, 2]. На настоящий момент топологический подход широко применяется для описания сложных трехмерных вихрей возбуждения в сердечной ткани [3, 4]. Особый интерес представляют топологические методы, пригодные для мониторинга кардиодинамики в режиме реального времени. Эти методы открывают новые возможности для выявления и предупреждения критических состояний в кардиодинамике.

В докладе будет представлен обзор существующих теоретических и практических подходов к мониторингу кардиодинамики человека. Особое внимание будет уделено подходам, развитым в рамках непрерывного вейвлет-преобразования и математического аппарата персистентных гомологий [5, 6]. При этом делается акцент на задаче детектирования топологических индексов, отвечающих росту риска возникновения критических состояний в кардиодинамике. Разработанный нами подход [7] будет представлен на примере различных сценариев кардиодинамики. В частности, будет рассмотрен сценарий начального развития инфаркта миокарда.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант € 14-14-00990).

1. Guria G.T., Livshits M.A. Topology of two-dimensional autowaves. *Physics Letters A* **97(5)** (1983) 175-177.
2. Winfree A.T., Strogatz S.H. Singular filaments organize chemical waves in three dimensions: I. Geometrically simple waves *Physica D: Nonlinear Phenomena*. **8(1)** (1983) 35-49.
3. Pertsov A.M., Wellner M., Vinson M., Jalife J. Topological constraint on scroll wave pinning. *Physical review letters* **84(12)** (2000) 2738.
4. Davidsen J., Glass L., Kapral R. Topological constraints on spiral wave dynamics in spherical geometries with inhomogeneous excitability. *Physical Review E*. **70(5)** (2004) 056203.
5. Zomorodian A., Carlsson G. Computing persistent homology. In *Proceedings of the twentieth annual symposium on Computational geometry*. 2004, June, pp. 347-356. ACM.
6. Addison P.S. Wavelet transforms and the ECG: a review. *Physiological measurement* **26(5)** (2005) R155.
7. Романец И.А., Копылов Ф.Ю., Гурия Г.Т. Способ обработки электрокардиограмм с целью выделения стадий в динамике изменений функционального состояния миокарда. Заявка на изобретение N 2016109224.

Нелинейные характеристики в линейных моделях взаимодействующих квантовых частиц

Юсипов И.И., Иванченко М.В.

ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород

Одной из основных задач колебательно-волновой физики является локализация волн в пространственно-неоднородных средах [1]. С 60-х годов XX века это явление было известно как андерсоновская локализация собственных состояний квантовой частицы на решетке вследствие пространственной неоднородности, беспорядка. Его экспериментальные проявления наблюдались в динамике самых различных волновых систем, включая конденсаты ультрахолодных атомов и световые пучки в оптических кристаллах [2,3].

Для одной частицы или, что эквивалентно, многих невзаимодействующих частиц, известны классические результаты: в случае пространственного беспорядка все собственные состояния становятся локализованными [1], в случае квазипериодической неоднородности существует порог перехода к локализации по силе неоднородности [4]. В другом предельном случае Π многих взаимодействующих частиц Π задача решалась в среднеполевом приближении, которое приводило к нелинейному дискретному уравнению Шредингера. В нем наблюдалось разрушение локализации за счет нелинейности, возникающего динамического хаоса. Основными наблюдаемыми свойствами были: субдиффузия волновых пакетов, их самоподобие в асимптотическом пределе, зависимость показателя субдиффузии от порядка нелинейности [5].

Интересным результатом данной работы является обнаружение этих свойств в случае минимального количества взаимодействующих частиц (двух и трех), когда условия среднеполевого приближения не выполнены, и система должна была демонстрировать линейные свойства.

Линейная модель двух взаимодействующих частиц задается системой дискретных уравнений Шредингера на виртуальной двумерной решетке:

$$i\dot{\psi}_{n,m} = (\epsilon_{n,m} + \delta_{n,m}U) \psi_{n,m} + \psi_{n\pm 1,m} + \psi_{n,m\pm 1}, \quad (1)$$

где энергии на каждом узле решетки являются случайными величинами с равномерным распределением на интервале $\epsilon_n \in [-W/2, W/2]$, U Π сила взаимодействия между частицами.

Также для данной задачи был рассмотрен квазипериодический потенциал ($\epsilon_n = \cos 2\pi\alpha n + \beta$, где α - иррациональное число, β - варьируемая фаза) и был выявлен суббаллистический механизм полной делокализации волновых пакетов.

Для модели двух частиц проводилось исследование статистики разностей ближайших уровней энергий, что позволило охарактеризовать динамику системы в случае квазипериодического потенциала как регулярную, в то время как в случайном потенциале наблюдается квантовый хаос.

1. Anderson P.W. // Phys. Rev. 1958. V.109. P.1492.
2. J. Billy, V. Josse, et al., Nature, 453, 891 (2008).
3. T. Schwartz, G. Bartal, S. Fishman and M. Segev, Nature, 446, 52 (2007).
4. S. Aubry and G. Andre, Ann. Israel Phys. Soc., 3, 133, (1980).
5. T. Lapyteva, M. Ivanchenko and S. Flach, J. Phys. A Math. Theor. 47 493001 (2014).

Хаотизация динамических режимов в задаче принудительной синхронизации как следствие применения асимптотических методов при построении точечного отображения

Антоновская О.Г.

ННГАСУ, Нижний Новгород

Изучение колебательных процессов имеет фундаментальное значение в различных разделах механики, физики, техники [1]. Но если математический аппарат теории линейных колебаний детально разработан, то изучение нелинейных колебательных процессов является задачей намного более сложной. Наиболее доступными для исследования являются системы с малой нелинейностью, но и для их приближенного исследования требуются методы, позволяющие учитывать нелинейный характер системы.

Для слабо нелинейных систем, описываемых дифференциальными уравнениями с малым параметром при нелинейных членах, имеется ряд общих асимптотических методов исследования [1,2]. В настоящем докладе предложен асимптотический метод исследования таких систем, основанный на применении метода точечных отображений, который рассматривается на примере исследования квазигармонического осциллятора. Здесь же обсуждаются последствия применения метода последовательных приближений [2] для построения функций последования точечного отображения, к исследованию свойств которого сводится изучение явления синхронизации квазигармонического осциллятора. Показано, что в приближенной математической модели возможны явления бифуркации удвоения периода стационарных колебаний, заканчивающиеся хаотизацией движений [3].

Следует также отметить, что при полиномиальном характере нелинейности бесконечность фазового пространства приближенной модели всегда устойчива [4]. То есть в ограниченной части фазового пространства всегда существует неустойчивое многообразие. Более того, в пространстве параметров, при увеличении амплитуды внешней силы осуществляется переход через границу, за которой в фазовом пространстве модели не существует ограниченного притягивающего множества. В случае, когда нелинейность обладает насыщением, может быть получено ограничение на величину расстройки, при которой имеет место качественное соответствие поведения траекторий исходной системы и приближенной модели [5].

1. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.:Физматгиз, 1959.
2. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.
3. Спротт Дж. К. Элегантный хаос: алгебраически простые хаотические потоки. М.-Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2012.
4. Антоновская О.Г., Горюнов В.И. Метод точечных отображений в нелинейной динамике: метод точечных отображений и задача исследования динамики квазигармонического осциллятора. Гамбург: LAP Lambert Academic Publishing, 2013.
5. Антоновская О.Г. Математическое моделирование и оптимальное управление: Вестник ННГУ 2(21) (1999)

Метод точечных отображений в динамике системы синхронизации с комбинированной широтно-импульсной модуляцией управляющего сигнала

Антоновская О.Г., Горюнов В.И.

ННГАСУ Нижний Новгород

ННГУ Нижний Новгород

Настоящий доклад связан с практически важной прикладной задачей реализации надежной радиосвязи [1], в основе которой лежит использование управляемых синтезаторов частот (СЧ) [2], построенных на базе импульсных систем фазовой синхронизации. В таких системах используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) управляющего сигнала и поэтому их математические модели (ММ) являются частным случаем систем с переменной структурой, порядок смены дифференциальных уравнений, в которых определяется динамическими свойствами фазовых траекторий движения и реализуется в моменты переключения управляющих импульсов. Именно в силу этого обстоятельства изучение динамики ММ таких СЧ осуществляется на основе применения метода точечных отображений [3].

В докладе излагаются основные моменты применения методики исследования динамики систем с ШИМ управляющего сигнала к исследованию динамики синтезатора частот с комбинированным импульсным частотно-фазовым детектором [2]. Методика основана на применении метода точечных отображений и состоит в использовании для рассмотрения динамики системы фазовых подпространств, соответствующих постоянству управляющего сигнала [4]. В частности, предложена процедура моделирования перехода от режима управления по числу импульсов (фазовое детектирование (ФД)) к режиму управления по временному рассогласованию (частотное детектирование (ЧД)).

Исследование поведения траекторий точечных отображений в каждом из подпространств на основе диаграмм Ламерея-Кенигса [5], а также процесса склейки фазовых траекторий, позволил установить, что синхронный режим в системе соответствует неподвижной точке отображения, определяющего динамику СЧ в режиме ФД. В пространстве параметров системы выделены области устойчивости синхронного режима "в малом" и "в большом".

1. Горюнов В.И., Палочкин Ю.П. *LVI научная сессия, посвященная дню радио: Труды* 2 (2001).
2. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. М.: Радио и связь, 1989.
3. Неймарк Ю.И. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1972.
4. Антоновская О.Г., Горюнов В.И. *Изв. ИМИ УдГУ* 2(46) (2016).
5. Капранов М.В., Томашевский А.И. Регулярная и хаотическая динамика нелинейных систем с дискретным временем. М.: Изд.дом МЭИ, 2009.

Исследование процессов взаимодействия релятивистских электронных пучков в многолучевом виркаторе с использованием CST Particle Studio.

А.А. Бадарин, С.А. Куркин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

СарГУ, СарГТУ, Саратов

Важной задачей в настоящее время является повышение мощности электромагнитного излучения при одновременном повышении частоты электромагнитного излучения в пучково-плазменных устройствах СВЧ [1]. Учитывая неизбежное падение достижимой мощности излучения с ростом частоты вновь возникает интерес к анализу связанных мощных систем, в которых возможно достичь увеличения мощности за счет сложения сигналов от нескольких источников. Традиционный подход здесь — разработка фазированных антенных решеток и нелинейных антенн. С учетом особенностей таких источников сверхмощного СВЧ излучения как приборы с виртуальным катодом (виркаторы, виртоды, редитроны и т.п.) предложена схема, в которой сложение мощностей каждого из колеблющихся виртуальных катодов происходит в общем резонаторе (камере дрейфа) — многолучевая схема виркатора, в которой несколько пучков со сверхкритическими токами нагружены на общий резонатор. Такая схема может рассматриваться как перспективная для дальнейшего повышения мощности и частоты генераторов на виртуальном катоде. Схема многолучевого виркатора ранее не рассматривалась, поэтому в рамках численного моделирования была проанализирована возможность эффективного взаимодействия нескольких виртуальных катодов в едином пространстве взаимодействия и определены условия, при которых реализуется эффективное сложение мощности каждого из пучков на выходной нагрузке.

Обнаружен эффект синхронизации виртуальных катодов в модели многолучевого релятивистского виркатора. Данный эффект является важным не только с фундаментальной, но и с прикладной точки зрения, т.к. в перспективе может позволить продвинуть релятивистские виркаторы в более высокочастотный диапазон без существенного увеличения общего тока в системе. Такого результата возможно достигнуть, используя один РЭП с наибольшим током в качестве задающего частоту, а остальные ($N-1$) с меньшими токами — в качестве поддерживающих, накачивающих необходимую энергию в систему. Таким образом, для повышения частоты генерации виркатора (которая определяется плазменной частотой) и мощности на данной частоте нет необходимости увеличивать общий ток, инжектируемый в систему, как в случае с одним РЭП, а достаточно увеличить лишь ток одного из N пучков (ведущего). В результате, за счет синхронизации ВК во всех электронных потоках начнут осциллировать на одной частоте, задаваемой частотой колебаний ВК в ведущем пучке, что приведет к увеличению мощности выходного сигнала на данной частоте. Образующиеся синхронно осциллирующие виртуальные катоды можно рассматривать как единую пространственно-распределенную неоднородную электронную структуру.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (€ 14-02-00329) и гранта Президента РФ для молодых российских ученых-кандидатов наук (МК-5426.2015.2).

1. Booske J. H. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation. // *Physics of Plasmas*. 2008 V. 15. No. 5. P. 055502

Структура пространства параметров модели оптоэлектронного осциллятора

Балакин М.И., Астахов С.В., Дворак А.А., Кочанов А.А., Астахов В.В.

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

На современном этапе развития телекоммуникационных сетей актуальными являются задачи повышения скорости передачи данных и защищенности передаваемых сообщений. На сегодняшний день решение этих задач достигается путем применения оптоэлектронных генераторов для формирования стабильной высокочастотной (до терагерц) несущей [1]. Такая несущая может быть промодулирована импульсами малой длительности (порядка пикосекунд), что позволяет развить высокую скорость передачи данных [2]. Достоинствами оптоэлектронных генераторов является высокая добротность, низкий уровень фазовых шумов, относительная простота изготовления и возможность их применения с уже существующими системами телекоммуникаций. Было показано, что система из двух связанных оптоэлектронных генераторов может обеспечивать скрытую передачу данных со скоростью до 10 ГБ/сек с низким уровнем ошибок [3].

В настоящей работе исследуется модель оптоэлектронного генератора в виде:

$$x(t) + \tau x(t) + \frac{1}{\theta} \int x(t) dt = \beta F[x(t - T)], F[x(t)] = \cos^2(x(t) + \phi).$$

Здесь $x(t)$ - динамическая переменная, $\tau, \theta, \phi, \beta$ - управляющие параметры, T - время запаздывания в цепи обратной связи. Установлено, что развитая мультистабильность в исследуемой системе формируется в результате последовательности двух видов бифуркаций Π суперкритической бифуркации Андронова-Хопфа и субкритической бифуркации Неймарка-Сакера. При вариации управляющих параметров неподвижная точка в фазовом пространстве многократно претерпевает суперкритическую бифуркацию Андронова-Хопфа, что ведет к увеличению числа седловых циклов. После первой бифуркации рождается устойчивый предельный цикл, а после каждой последующей Π седловой предельный цикл с двумерным, четырехмерным, шестимерным, восьмимерным и т.д. неустойчивыми многообразиями. Устойчивость они приобретают, соответственно, после одной, двух, четырех, шести и т.д. субкритических бифуркаций Неймарка-Сакера. Внутри листов существуют предельные циклы и все режимы, возникающие на их основе. Увеличение запаздывания приводит к появлению новых листов на бифуркационной диаграмме. Уже при малых значениях временной задержки листы перекрываются, и возникает мультистабильность: в фазовом пространстве системы могут сосуществовать периодические и квазипериодические режимы.

1. Suzuki, S., Shiraishi, M., Shibayama, H., Asada, M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19(1)** (2013) 8500108
2. Y.K. Chembo, A. Hmima, P.-A. Lacourt, L. Larger, and J.M. Dudley. *J. Lightwave Tech.* **27(22)** (2009)
3. L. Larger. *Phil. Trans. R. Soc. A.* **371** (2012) 20120464

Стохастическая неустойчивость параметров кардиоинтервалов**Башкатова Ю.В., Филатова Д.Ю., Григоренко В.В., Ключ И.В.***БУ ВО «Сургутский государственный университет», Сургут*

На основе математической статистики изучалась динамика поведения параметров сердечно-сосудистой системы одного человека при 15-ти повторях измерений в ответ на дозированную физическую нагрузку. Прослеживалась динамика уменьшения числа пар совпадений выборок после физической нагрузки в матрицах парных сравнений. На основании изучения матриц парных сравнений кардиоинтервалов установлено, что доля стохастики при повторях однотипных измерений может нарастать при изменении функционального состояния организма. В результате проведенного исследования параметров функциональных систем организма человека на основе расчета матриц парных сравнений были показаны выборки, которые по матрицам парного сравнения в 4-15% случаев регистрируются пары выборок, которые можно отнести к одной генеральной совокупности, а в 85-96% эти пары были разными. Это доказывает, что почти все статистические функции состояний $f(x)$ у одного человека при повторных (подряд) измерениях параметров $x(t)$ будут без статистических совпадений.

Установлено, что при регистрации кардиоинтервалов подряд у одного и того же человека для любых интервалов времени регистрации t_i будут свои (индивидуальные) наборы функций $f_i(x)$. В редких случаях они могут совпадать статистически. Это классифицируется как неопределенность 2-го типа при изучении их динамики поведения, сложных биосистем в виде эффекта Еськова-Зинченко [1].

Дозированная физическая нагрузка изменяла значения параметров сердечно - сосудистой системы.. Значение числа совпадений (пар) k после физической нагрузки незначительно уменьшается для кардиоинтервалов у одного и того же человека. Это позволяет объективно оценивать динамику параметров сердечно-сосудистой системы, последовательность выборок которых очень редко совпадают. Невозможен прогноз динамики на основе анализа предыдущих состояний и начального значения $x(t_0)$. Только при условии искусственного создания человеком внешних управляющих (например, дозированная физическая нагрузка) воздействий возможно выполнение прогноза в динамике поведения параметров сердечно-сосудистой системы. Появляются некоторые закономерности после выполнения дозированной физической нагрузки во всех выборках матриц парных сравнений, что приводит к уменьшению числа k пар совпадений выборок (их статистических функций) [2, 3].

1. Филатов М.А., Веракса А.Н., Филатова Д.Ю., Поскина Т.Ю. *Сложность. Разум. Постнеклассика* **1** (2016)
2. Garaeva G.R., Eskov V.M., Eskov V.V., Gudkov A.B., Filatova O.E., Khimikova O.I. *Human Ecology* **9** (2015)
3. Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E., Khadartsev A.A., Sinenko D.V. *Advances in Gerontology* **1** (2016)

Управление аттрактора Плыкина методом Пирагаса

Белякин С.Т.¹, Кузнецов С.П.²

¹ *Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва;*

² *Саратовский филиал Института радиотехники и электроники, Саратов*

Как известно, хаотические системы чрезвычайно чувствительны к внешним воздействиям. Эта особенность послужила предпосылкой для создания новых методов управления нелинейными системами и подавления в них хаоса. В данной работе изучается возможность стабилизации хаотических колебаний в системах с гиперболическим типом аттрактора посредством обратной связи и синусоидального возмущения.

Множество Λ называется гиперболическим аттрактором динамической системы, если Λ замкнутое топологически транзитивное гиперболическое множество и существует такая окрестность $U \supset \Lambda$, что $\Lambda = \bigcup_{t \geq 0} f^n U$. К хорошо известным относятся гиперболический аттрактор Плыкина. Гиперболический аттрактор Плыкина располагается на двумерной области $T = S^2$, где S^2 единичная окружность. Тогда $f : T \mapsto T$, $f(x, y, z) = (\cos \varphi \sin \phi, \sin \varphi \sin \phi, \cos \phi)$, где значение $k > 2$, и представляет собой подмножество $T \subset \mathbb{R}^3$.

В настоящее время, к гиперболическим аттракторам типа Плыкина [1] проявлен большой интерес, при моделировании сердечной аритмии и атмосферных процессов. Аттрактор Плыкина представлен следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{X} = -2\epsilon Y^2 \Omega_1 (\cos(\omega_2 \cos \omega_1 t) - X \sin(\omega_2 \cos \omega_1 t)) + \\ \quad kY \Omega_2 (\cos(\omega_2 \sin \omega_1 t) - X \sin(\omega_2 \sin \omega_1 t)) \sin \omega_1 t, \\ \dot{Y} = 2Y \Omega_1 (X \cos(\omega_2 \cos \omega_1 t) + 2^{-1}(1 - X^2 + Y^2) \sin(\omega_2 \cos \omega_1 t)) - \\ \quad k \Omega_2 (X \cos(\omega_2 \sin \omega_1 t) + 2^{-1}(1 - X^2 + Y^2) \sin(\omega_2 \sin \omega_1 t)) \sin \omega_1 t + D(K, \tau), \\ \Omega_1 = (2X \cos(\omega_2 \cos \omega_1 t) + (1 - X^2 - Y^2) \sin(\omega_2 \cos \omega_1 t))(1 + X^2 + Y^2)^{-2}, \\ \Omega_2 = (-2X \sin(\omega_2 \sin \omega_1 t) + (1 - X^2 - Y^2) \cos(\omega_2 \sin \omega_1 t))(1 + X^2 + Y^2)^{-1} + 2^{-1/2}. \end{cases}$$

В настоящей работе показано, что посредством обратной связи Y и временной задержки τ вида $D(K, \tau) \mapsto K(Y(t - \tau) - Y(t))$ можно выводить данную систему на регулярный, хаотический и циклический режим.

Данный метод Пирагаса может быть использован в управлении и для других типов хаотических динамических моделей аттракторов [2].

1. Kuznetsov S.P. Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 144101.

2. Kuznetsov S.P., Pikovsky A. Physica D 232 (2007) 87.

Компартментно-кластерное моделирование хаотической динамики параметров тремора

Берестин Д.К., Вохмина Ю.В., Алиев А.А., Курманов И.Г.

БУ ВО «Сургутский государственный университет», Сургут

На сегодняшний день остается недостаточно исследованной и весьма дискуссионной проблема моделирования в рамках нелинейной динамики произвольных (теппинг) и непроизвольных (тремор) движений человека и животных. Работы ряда авторов в рамках компартментного подхода и стохастического описания двигательных функций человека позволяют объяснить хаотичное изменение тремора под действием статических и динамических нагрузок [1-3]. В этой связи возникает потребность в моделировании произвольных и непроизвольных движений, выполняемых человеком в различных условиях, а также моделирование организации двигательных функций в аспекте различных психических состояний. Исследование этих проблем мы сейчас производим в рамках моделей компартментно-кластерных систем [1-2]. Использование математических моделей регуляции движений человека в рамках компартментного подхода, обусловлено возможностью учета наибольшего числа базовых биологических принципов: пуловая организация управления биосистемами, диссипативность структур, наличие тормозных и возбуждающих процессов, существование информационных и возбуждающих связей между пулами (компартаментами), выполнение принципов оптимального управления и иерархичность в организации движений.

Для решения задачи моделирования непроизвольных движений человека (тремора) была использована трехкомпартментная двухкластерная математическая модель. Имитационное моделирование двухкластерной трчхкомпартментной системы управления нервно - мышечной системой осуществлялось в среде моделирования Simulink MatLab. Для исследования сигнала применялись методы теории хаоса и самоорганизации, которые базировались на одновременном использовании и стохастических методов. Для доказательства отсутствия детерминированной периодичности и невозможности использования стохастического подхода в описании постурального тремора было проведено имитационное математическое моделирование в двухкластерной трчхкомпартментной модели при различных значениях коэффициентов диссипации b_1, b_2, b_3 и при разных значениях внешнего управляющего драйва Ud . В результате было получено, что компартментно-кластерная модель позволяет доказать непрерывную хаотическую динамику непроизвольных движений человека в условиях нормы и патологии, а также обеспечивает иллюстрацию возникновения болезни Паркинсона при снижении уровня дофамина. Возникновение дефицита дофамина в модели проявляется в нарастании драйва Ud от 1-го кластера и нейросетей головного мозга, что приводит к бифуркациям рождения циклов. Частоты этих циклов также варьируют с изменением Ud и b , что согласуется с наблюдениями над испытуемыми и больными.

1. Майстренко Е.В., Даянова Д.Д., Третьяков С.А., Черников Н.А. *Сложность. Разум. Постнеклассика* **1** (2015)
2. Еськов В.М., Полухин В.В., Дерпак В.Ю., Пашнин А.С. *Сложность. Разум. Постнеклассика* **2** (2015)
3. Добрынина И.Ю., Даянова Д.Д., Козлов А.С., Умаров Б.К. *Вестник новых медицинских технологий* **2** (2015)

Компьютерный анализ D-разбиения

Богаевская В.Г.

ЯрГУ, Ярославль

Исследования динамики решений дифференциальных уравнений и возможностей воздействия на нее являются одними из важнейших направлений в современной математике. Особое место занимают дифференциальные уравнения с запаздывающим управлением:

$$\dot{z}(t) = F(z, t) + (\alpha + i\beta)(z(t - T) - z(t)), \quad (1)$$

где α, β - вещественные параметры, а T - вещественно и положительно.

Линеаризуем уравнение (1) на исследуемом периодическом решении или состоянии равновесия и построим характеристическое уравнение для линеаризованной системы:

$$h(\mu, \alpha, \beta, T) = 0. \quad (2)$$

Согласно теореме Ляпунова об устойчивости по первому приближению, количество корней уравнения (2) с положительной вещественной частью позволяет судить об устойчивости решения. Для определения этого числа зачастую используется метод D-разбиений. Рассматривается отображение мнимой оси комплексной плоскости корней характеристического уравнения на плоскость двух управляющих параметров, например, α и β . Полученные кривые называются D-кривыми. Для областей, на которые они разбивают плоскость параметров, количество корней с положительной вещественной частью фиксировано. Будем считать, что из аналитических исследований (2) нам известно:

- 1) количество корней характеристического уравнения с положительной вещественной частью при $\alpha = \beta = 0$,
- 2) уравнение D-кривой, задающей переход корня через начало координат,
- 3) уравнения D-кривых, задающих переход пары корней через пару комплексно сопряженных точек $\pm i\omega$ на мнимой оси,
- 4) направление перехода корня или пары корней при возрастании одного из управляющих параметров (например, β) через каждую из D-кривых.

Ставится задача автоматизировать процесс анализа D-разбиения.

Построен алгоритм, позволяющий перевести аналитически заданное D-разбиение в хранящийся в памяти компьютера планарный граф и воспроизводить автоматически стандартный метод подсчета количества неустойчивых корней. Алгоритм также сохраняет информацию о формулах, задающих отрезки D-кривых, ограничивающих каждую область, что дает возможность продолжить аналитические исследования после численного анализа. Структура алгоритма не опирается на конкретный вид уравнений, поэтому может быть использован для любого вида задач, позволяющих построить D-разбиение.

Моделирование динамики кальция в цепочке астроцитов

Болдырева Н.В., Матросов В.В.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород

Исследование динамики кальция в малых ансамблях астроцитов является важным шагом на пути к пониманию механизмов генерации и распространения кальциевых волн в астроцитарных сетях, а также их роль в нейрон-глиальном взаимодействии. В докладе представлены результаты моделирования цепочки из трех последовательно связанных астроцитов. Динамика каждого элемента описывается концентрацией внутриклеточного кальция и инозитолтрифосфата (ИТФ), а также долей инактивированных кальциевых каналов [1]. Связь реализуется за счет диффузии ИТФ и регулируется значением коэффициента связи k_{IP3} . Модель отдельного астроцита можно рассматривать как модель нелинейного осциллятора, в котором в общем случае устанавливается либо стационарный режим (соответствующий постоянной концентрации химических компонентов), либо режим колебаний различной сложности (при котором концентрация компонент изменяется), что определяется параметрами генерации (O_d) и деградации ИТФ (O_{3k} , O_{5p}), а в некоторых случаях и начальными условиями [2].

В результате исследования однородной цепочки (параметры всех элементов идентичны) было установлено, что бифуркационные значения параметров, при которых происходит смена устойчивости или седлоузловая бифуркация состояния равновесия и рождение (исчезновение) предельного цикла, не зависят от коэффициента связи. Введение в систему слабой неоднородности влияет на зависимость динамики от коэффициента связи: значения параметров, при которых происходит смена динамических режимов, меняются, при увеличении k_{IP3} возникают новые динамические режимы. С помощью бифуркационного анализа системы были определены области с различной динамикой. Так при высоких значениях O_{d2} система находится в состоянии равновесия с высоким уровнем концентрации кальция на всем диапазоне k_{IP3} . При низких значениях O_{d2} в системе может реализовываться один из двух регулярных колебательных режимов или хаотические колебания в зависимости от коэффициента связи. Среди регулярных режимов можно выделить режим симфазной синхронизации трех элементов и режим синхронизации с задержкой. Разрушения этих режимов происходит через бифуркацию двукратный предельный цикл и бифуркацию Неймарка-Саккера. В системе возможны хаотические колебания, переход к которым осуществляется через перемежаемость первого рода или квазигармонический режим. На плоскости параметров (k_{IP3} ; O_{d2}) были выделены области существования перечисленных режимов, а также области мультистабильности системы, где динамика определяется начальными условиями. Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ (соглашение № 02.В.49.21.0003).

- 1 M. De Pitta, M. Goldberg, V. Volman, H. Berry, E. Ben-Jacob «Glutamate regulation of calcium and IP3 oscillating and pulsating dynamics in astrocytes», Journal of Biological Physics, 2009.
- 2 Болдырева Н.В., Матросов В.В., Казанцев В.Б. «Регулярные и хаотические колебания в модели астроцита с регуляцией динамики кальциевого выброса», Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика, 2015.

Коллективная динамика ротаторов, связанных общим импульсным полем

Болотов М.И., Осипов Г.В.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

Целью данной работы является исследование синхронных режимов в ансамбле ротаторов, связанных общим полем. Уравнения, описывающие динамику элементов данного ансамбля, являются предельным случаем связанных маятниковых уравнений, которые описывают многие физические системы [1-3].

Рассматривается ансамбль активных ротаторов

$$\dot{\phi}_i = \gamma - \sin \phi_i + gE(t), \quad (1)$$

где состояние i -го ротатора ансамбля задается переменной ϕ_i , которая принимает свои значения из отрезка $[0; 2\pi]$, g – сила связи, $E(t)$ – динамическая переменная состояния общего поля. При достижении ϕ_i значения 2π с i -го осциллятора в уравнение для общего поля подается импульсное воздействие. Эволюция поля ансамбля при этом задается уравнением

$$\ddot{E} + 2\alpha\dot{E} + \alpha^2 E = \beta \sum_{n|t_n < t} \delta(t - t_n), \quad (2)$$

где $\alpha > 0$ – параметр эволюции, характеризующий затухание поля на межимпульсном интервале, $\beta > 0$ – параметр, задающий величину импульсного воздействия, t_n – момент времени поступления n -го импульса. Изучение синхронных режимов в подобных ансамблях представляет большой интерес исследователей, как физиков, так и математиков [4, 5].

В ходе исследования проводится численное изучение динамики ансамбля при различных значениях параметров системы. На основе полученных данных в зависимости от значения параметра синхронности делается вывод о коллективном поведении элементов ансамбля, характере эволюции поля ансамбля, зависимости поведения поля ансамбля от синхронности элементов ансамбля.

В результате численного исследования динамики ансамбля было установлено существование мультистабильности в системе, в частности имеет место множество асинхронных режимов, когда элементы ансамбля асинхронны, а среднее поле либо постоянное с малыми возмущениями, либо периодическое с малой амплитудой; синхронного режима, при котором элементы ансамбля полностью синхронны, а среднее поле периодическое с большой амплитудой, а также режима, когда рост общего поля приводит к росту частоты каждого ротатора.

1. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences. *Cambridge: Cambridge University Press*, 2001.
2. Osipov G., Kurths J., Zhou Ch. Synchronization in oscillatory networks. *Berlin, Heidelberg: Springer*, 2007.
3. Mosekilde E., Maiistrenko Yu., Postnov D. Chaotic synchronization. Application to living systems. *Singapore: World Scientific*, 2002.
4. Mohanty P.K., Politi A. *J. Phys. A*. 2006. V. 39. P. L415.
5. Olmi S., Livi R., Politi A., Torcini A. *Phys. Rev. E*. 2010. V. 81. P. 046-119.

Аппаратная модель нейрона с импульсной и пачечной динамикой**Большаков Д.И., Мищенко М.А.***ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н.Новгород*

Задача аппаратной реализации нейронов и их сетей возникла в конце 80-х годов XX века. К этому времени было известно достаточно много математических моделей, описывающих динамику нейронов с различной степенью детализации. Но проводить численные эксперименты, даже с небольшими ансамблями модельных клеток, было невозможно, так как вычислительная техника не обладала необходимыми возможностями. На этом фоне аппаратные или кремниевые нейроны обладали огромным преимуществом, поскольку скорость их работы определялась только конкретной схемотехнической реализацией и не ограничивалась количеством элементов, включенных в сеть. Было разработано множество различных схемотехнических реализаций нейронов, отличающихся по степени детализации и биологической правдоподобности [1,2], по количеству воспроизводимых динамических режимов [3,4].

В данной работе рассматривается аппаратная модель нейрона с импульсной и пачечной динамикой, выполненная на основе системы фазовой автоподстройки частоты с полосовым фильтром. Теоретическое исследование такой модели было проведено в работах [5,6]. Было показано, что в такой системе отсутствует режим синхронизации и при всех значениях параметров реализуется режим биений. При этом при варьировании параметров, этой системы, на выходе полосового фильтра можно получить временную характеристику напряжения, качественно похожую на динамику мембранного потенциала нейрона.

Задачей данной работы была разработка и исследование аппаратной реализации устройства для генерации нейроподобных колебаний, а также сравнение полученных результатов с результатами теоретического исследования [5,6]. За основу была взята микросхема фирмы Texas Instruments. В ее состав входят фазовый компаратор, реализующий функцию «Исключающее ИЛИ» и генератор, управляемый напряжением. Был разработан полосовой фильтр, позволяющий получить колебания необходимой формы. На разработанном устройстве была продемонстрирована возможность генерации нейроподобных колебаний различной сложности: регулярные одиночные импульсы, пачечные импульсы различной длительности, хаотическая импульсная динамика. Произведено экспериментальное разбиение пространства параметров модели на области существования различных режимов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00643 мол_а.

1. Simoni M.F. et al. *IEEE Trans. Biomed. Eng* **51(2)** (2004) 342Ц-354.
2. Torikai H., Nishigami T. *Neural Netw.* **22(5-6)** (2009) 664–673
3. Wijekoon J.H.B., Dudek P. *Neural Netw.* **21** (2008) 524–534
4. Savino G.V., Formigli C.M. *Biosystems* **97(1)** (2009) 9–14
5. Мищенко М.А., Шалфеев В.Д., Матросов В.В. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика* **20(4)** (2012) 122–130
6. Matrosov V.V., Mishchenko M.A., Shalfeev V.D. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **222(10)** (2013) 2399–2405

Локализация в периодически модулируемых решетках с гладким беспорядком

Вершинина О.С., Иванченко М.В., Денисов С.В.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

Одной из важных физических задач является локализация в динамических решеточных системах с беспорядком. Особый интерес здесь вызывает вопрос о влиянии периодической модуляции на наблюдаемые свойства локализованных состояний. Существующие исследования в данной области ограничены случаем некоррелированного беспорядка, когда случайные параметры соседних узлов решетки независимы [1]. Для этого случая показано, что периодическая модуляция приводит к увеличению локализационной длины собственных состояний в определенном диапазоне частоты и амплитуды модуляции [2, 3]. В то же время, необходимо отметить, что модель некоррелированного беспорядка является лишь приближением, далеко не всегда реализующимся на практике [4]. Так, в экспериментах с локализацией бозе-эйнштейновских конденсатов в оптических потенциалах, пространственные корреляции принципиальны.

В нашей работе мы рассматриваем локализацию состояний одиночных квантовых частиц в неавтономном случайном коррелированном потенциале. Следствием коррелированного беспорядка является появление слаболокализованных состояний (для конечных систем - эффективно делокализованных), в дополнение к сильно локализованным состояниям решетки с некоррелированным беспорядком [5, 6]. В результате было показано, что при увеличении амплитуды внешнего воздействия происходит взаимодействие локализованных и делокализованных состояний. Наблюдается выравнивание локализационных свойств различных состояний в спектре системы, в первую очередь длины локализации. Детальный анализ профилей Флоке-состояний и их разложения в базисе исходных стационарных мод показал, что в основе этого эффекта лежит гибридизация различных стационарных состояний за счет квазирезонансного взаимодействия через модулирующий сигнал. Представленные результаты указывают на наличие неизвестных ранее нетривиальных свойств локализации в модулируемых системах и открывают широкое поле дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки, госзадание €1.115.2014/К.

1. Lapyeva T.V., Ivanchenko M.V., Flach S. Nonlinear lattice waves in heterogeneous media. *J. Phys. A: Math. Theor.* **47** 493001 (2014).
2. Holthaus M., Ristow G.H., Hone D.W., ac-Field-Controlled Anderson Localization in Disordered Semiconductor Superlattices. *Phys. Rev. Lett* **75** 3914 (1995).
3. Martinez D.F., Molina R.A. Delocalization induced by low-frequency driving in disordered tight-binding lattices. *Phys. Rev. B* **73** 073104 (2006).
4. Modugno M., Collective dynamics and expansion of a Bose-Einstein condensate in a random potential. *Phys. Rev. A* **73** 013606 (2006).
5. Lugan P. One-dimensional Anderson localization in certain correlated random potentials. *Phys. Rev. A* **80** 023605 (2009).
6. Falko G.M. Density of states in an optical speckle potential. *Phys. Rev. A* **82** 053405 (2010).

Нейроморфные сети на основе взаимосвязанных спиновых наноосцилляторов

¹Габриелян Г.А., ^{1,2}Сафин А.Р., ²Бичурин М.И., ²Петров Р.В., ²Татаренко А.С.

¹НИУ "МЭИ Москва; ²НовГУ, Великий Новгород

Нейроморфные системы и нейронные сети являются чрезвычайно актуальной и популярной областью прикладных и теоретических исследований [1]. Базовые ячейки современных нейроморфных процессоров — нейроны и аксоны построены на основе транзисторов. В последние годы [2] предлагаются альтернативные модели нейронов и аксонов на основе спинтроники, а точнее эффекта переноса спина в магнитных мультислойных наноструктурах. Ранее было показано [2], что магнитный наностолбик при некоторых параметрах может демонстрировать мемристивный эффект (зависимость сопротивления от намагниченности) и может являться прототипом нейрона или аксона. Объединение в нейронную сеть при этом может осуществляться за счет разных механизмов связи. Одним из первых предложенных механизмов является нелокальная связь за счет электрических контактов. Она обладает существенным недостатком, связанным с большими потерями мощности. Альтернативным механизмом является использование локальных механизмов связи за счет магнетодипольного взаимодействия или спиновых волн, распространяющихся в общем ферромагнитном рабочем слое (см. напр. [3]). Поэтому чрезвычайно важной и актуальной с теоретической точки зрения является задача исследования ансамблей спиновых наноосцилляторов с различной топологией.

В данной работе исследовались иерархические ансамбли наноосцилляторов на предмет динамики возможных состояний системы в фазовом пространстве. Задача решалась следующим образом. На первом этапе записываются уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта-Слончевского для каждого наноосциллятора. Далее в линейном консервативном случае (затухание считается малым) ищутся нормальные моды колебаний. Было показано, что для иерархической системы типа кбинарное дерево структура нормальных мод представляет собой фрактал типа кчертова лестница. Далее производится переход от исходных координат к нормальным координатам и записываются нелинейные уравнения с учетом диссипации, которые и анализируются в фазовом пространстве.

Проведенные исследования дают возможность определить как параметры индивидуальных наноосцилляторов, так и структуры иерархической сети, при которых достигается режим полной частотной и фазовой синхронизации нейронов на одной колебательной моде.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ €15-19-10036.

1. Dressler F., Akan O. *Comp. Net. Vol. 54* (2010) P. 881-900.
2. Locatelli N., Cros V., Grollier J. *Nat. Mat.* **13** (2014) P. 11-20.
3. Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **67** (2014) P. 20601.

Квазилинейная теория терагерцовых ЛСЭ, основанных на вынужденном рассеянии некогерентной волны накачки сильноточным релятивистским электронным пучком

Гинзбург Н.С., Кочаровская Е.Р.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

Достоинством использования некогерентной накачки в комптоновских ЛСЭ является расширение спектра синхронных с электронным потоком комбинационных волн и, как следствие, повышение эффективности трансформации энергии электронов в попутную монохроматическую сигнальную волну [1,2]. Кроме того, использование некогерентной накачки снижает критичность к дисперсии параметров релятивистского электронного пучка, что позволяет использовать в ЛСЭ терагерцового диапазона сильноточные электронные пучки, получаемые с помощью взрывоэмиссионных катодов.

В рамках квазилинейной теории исследованы усилительные и генераторные варианты комптоновских ЛСЭ. Продемонстрирована возможность генерации в такой схеме терагерцового излучения. Расширение спектра волны накачки при использовании в качестве источников накачки виркаторов или релятивистских ЛОВ гигаваттного уровня мощности, работающих в автомодуляционных режимах генерации, позволяет при относительно высоком электронном КПД до 5 % получать квазимонохроматическое терагерцовое излучение с мощностью до нескольких сотен мегаватт.

1. Bogomolov Ya. L., Ginzburg N. S., and Golubyatnikova E. R. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **358** (1995) 171
2. Ginzburg N.S., Kocharovskaya E.R. *Phys. Rev. ST AB* **19** (2016) 080701

Генерация темных и светлых солитонов в решетке латерально связанных магнитных микроволноводов

Грачев А.А., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П..

СарГУ, Саратов

Системы латерально связанных волноведущих структур на основе тонких пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, интерферометров, мультиплексоров, фильтров и ответвителей. В данной работе проведено исследование процессов генерации пространственных солитонов в системе латерально связанных ферритовых волноводов численными методами и методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии. Схематически структура представлена на рисунке 1(а).

Численное моделирование производилось на анализе решений дискретного нелинейного уравнения Шрёдингера (ДНУШ) [1,2]. Показано, что полученные дифракционные картины существенным образом зависят от частоты и амплитуды входного сигнала возбуждаемого в волноводах с $n = -2, -1, 0, 1$ и 2 . Видно, что с ростом частоты увеличивается длина перекачки в волноводах и, следовательно, режим дифракции сменяется на рефракцию пучка магнитостатических волн (Рис. 1(б)). Также видно, что при увеличении ам-

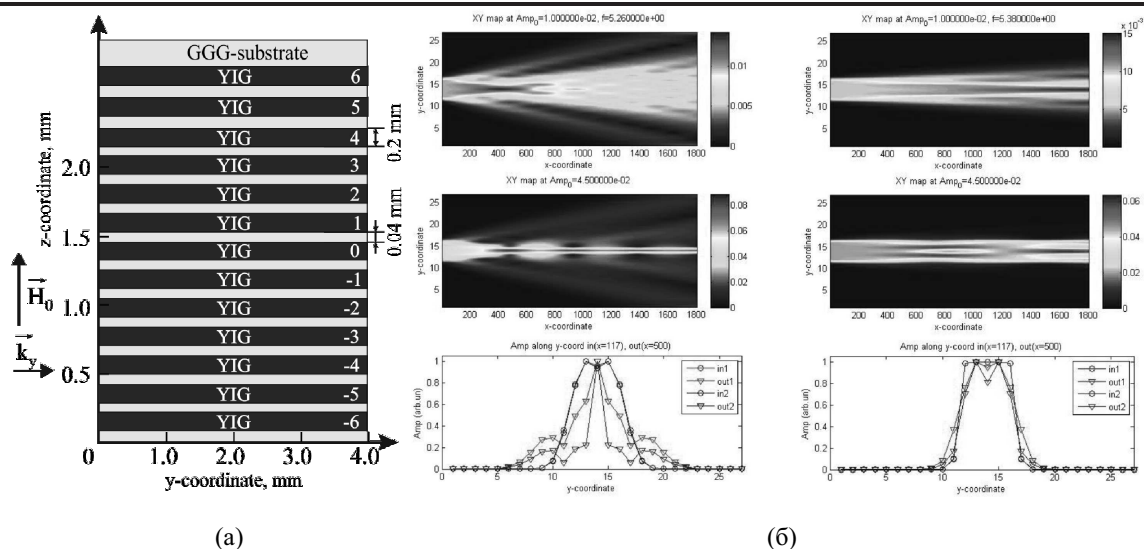


Рис. 2: Схема рассматриваемой структуры (а). Распространение пучка МСВ в рассматриваемой структуре (б).

плитуды входного сигнала на динамику распространения спиновых волн начинает влиять нелинейность, приводящая к формированию дискретного солитона в такой структуре.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-37-60093, 16-37-00217, 16-29-03120), стипендии (СП-313.2015.5) и гранта (МК-5837.2016.9) Президента РФ.

1. Lederer F. et. al. *Phys. Rep.* **463** (2008) P. 1-126.
2. Кившарь Ю.С. "Оптические солитоны" М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

Уменьшение нелинейной корреляции между каналами внутричерепных ЭЭГ крыс перед началом пик-волновых разрядов

Грищенко А.А.¹, Кузнецова Г.Д.², ван Рейн К.М.³, Сысоев И.В.¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов

²Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

³Радбод университет Неймеген, Нидерланды

Пик-волновые разряды на электроэнцефалограмме (ЭЭГ) — основной признак абсансной эпилепсии — формы эпилепсии невыясненной (предположительно генетической) этиологии [1]. В значительном проценте случаев абсансная эпилепсия, не будучи вовремя диагностирована и вылечена, переходит в конвульсивные формы, существенно более сложные и опасные. Изучение абсансной эпилепсии часто проводят на генетических моделях, в частности, крысах линии WAG/Rij [2], поскольку для них возможна запись внутричерепных ЭЭГ.

Считается, что началу разряда соответствует увеличение синхронности между различными отделами мозга, в частности, областями коры. Целью данной работы было выявить,

как ведёт себя нелинейная корреляционная функция (1) при переходе от нормальной активности к пик-волновому разряду. Для этого в данной работе были проанализированы записи 15 крыс линии WAG/Rij, по 20 разрядов у каждой. Данные снимались с частотой выборки 512 Гц и записывались 16-разрядным АЦП с аппаратной фильтрацией в диапазоне 1–99 Гц и подавлением 50-Гц наводки. Анализировались два канала: лобная область и теменная область коры больших полушарий. Все данные рассчитывались во временном окне длиной 1 с.

$$h^2 = 1 - \frac{\sigma_{\text{ост}}^2}{\sigma_{\text{общ}}^2} \quad (1)$$

Было впервые обнаружено значимое (на уровне значимости $p < 0.05$) падение функции нелинейной корреляции перед началом разряда, что говорит о сложности процессов запуска разряда и может иметь отношение к обнаруженному ранее эффекту падения связанности в первую секунду разряда [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 16-34-00203 и Стипендии Президента для поддержки молодых ученых СП-1510.2015.4.

1. Волнова А.Б., Ленков Д.Н. Абсансная эпилепсия: механизмы гиперсинхронизации нейронных ансамблей // Медицинский академический журнал, 2012, т 12, №1, С. 7–20.
2. C.M. van Rijn, S. Gaetani, I.Santolini et al. WAG/Rij rats show a reduced expression of CB1 receptors in thalamic nuclei and respond to the CB1 receptor agonist, R(+)WIN55,212-2, with a reduced incidence of spike-wave discharges // Epilepsia, V 51, Iss. 8, pp. 1511–1521.
3. F. Lopes da Siva, J.P. Pijn, P. Boeijinga. Interdependence of EEG Signals: Linear vs. Nonlinear Associations and the Significance of Time Delays and Phase Shifts // Brain Topography, V 2, Iss. 1, pp. 9–18.
4. M.V. Sysoeva, A. Luttjohann, G. van Luijtelaar and I.V. Sysoev. Dynamics of directional coupling underlying spike-wave discharges // Neuroscience, 2016, V 314, pp. 75–89.

Механизм формирования мультистабильности в кольцевом генераторе из однонаправленно связанных осцилляторов Тоды

Дворак А.А., Астахов С.В. и Астахов В.В.

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

В настоящей работе исследуется кольцо однонаправленно связанных осцилляторов Тоды:

$$\ddot{x}_i + \alpha \dot{x}_i + f(x_i) = \gamma f(x_{i-1}).$$

Здесь x_i — динамическая переменная i -го осциллятора ($i = 1, \dots, N$, где N — количество осцилляторов в кольце), α , γ — управляющие параметры, $f(x) = \exp(x) - 1$ — функция взаимодействия парциальных осцилляторов.

Для таких систем показано, что с ростом числа осцилляторов растёт количество бифуркаций Андронова-Хопфа, которые претерпевает состояние равновесия системы при

увеличении параметра связи [1, 2]. В результате первой бифуркации рождается устойчивый предельный цикл, в результате последующих — седловые. Седловые циклы могут становиться устойчивыми в результате бифуркаций Неймарка-Сакера, что приводит к возникновению в системе мультистабильности.

Поскольку в основе сценария формирования мультистабильности лежат бифуркации двумерных торов, мы используем переход к укороченной модели для амплитуд и фаз. Кроме того, мы ограничиваемся нелинейностью третьего порядка в разложении функции $f(x)$ в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_i &= -\frac{\alpha}{2}\rho_i + \frac{\gamma}{2}\rho_{i-1}\left(1 + \frac{1}{8}\rho_{i-1}^2\right)\sin(\phi_{i-1} - \phi_i), \\ \dot{\phi}_i &= \frac{1}{16}\rho_i^2 - \frac{\gamma}{2}\rho_{i-1}\left(1 + \frac{1}{8}\rho_{i-1}^2\right)\cos(\phi_{i-1} - \phi_i).\end{aligned}$$

Отметим, что в исследуемой области значений управляющих параметров использованные приближения вполне допустимы. Анализ состояний равновесия и предельных циклов в данной системе позволил исследовать изменение структуры фазового пространства исходной модели, связанные с бифуркациями предельных циклов и торов. Результаты численного моделирования исходной системы находятся в полном соответствии со сценарием, выявленным для укороченной модели.

1. P. Perlikowski, S. Yanchuk, M. Wolfrum, A. Stefanski, P. Mosiolek, T. Kapitaniak, Routes to complex dynamics in a ring of unidirectionally coupled systems, CHAOS. Vol. 20, (2010), P. 03111.
2. A. Dvorak, P. Kuzma, P. Perlikowski, V. Astakhov, T. Kapitaniak Dynamics of three Toda oscillators with nonlinear unidirectional coupling, EPJ ST 06/2013

Генератор грубого хаоса на основе эффекта гибели колебаний

Дорошенко В.М., Кузнецов С.П.

СарГУ, Саратов

СФИРЭ РАН, Саратов

В работе предлагается новая неавтономная система на основе двух взаимодействующих осцилляторов, где реализуется гиперболический хаос, и которая отличается по принципу действия от описанных ранее примеров [1,2]. Функционирование системы основано на использовании эффекта гибели колебаний [3].

Рассмотрим систему, описываемую уравнениями

$$\begin{aligned}\ddot{x} - (\mu - x^2)\dot{x} + \omega_0^2 x + 2\varepsilon xy &= KH(\sin(2\pi t/T))(\dot{y} - \dot{x}), \\ \ddot{y} + \alpha\dot{y} + 4\omega_0^2 y + \varepsilon x^2 &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где в записи правой части первого уравнения использована функция Хевисайда:

$$H(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi < 0, \\ 1, & \xi \geq 0. \end{cases}\tag{2}$$

Система содержит два элемента – осциллятор Ван дер Поля с рабочей частотой ω_0 и линейный осциллятор с диссипацией, которые связаны через квадратичный нелинейный элемент, не вносящий потерь энергии. При возбуждении автоколебаний первого осциллятора, часть энергии передается второму через нелинейный элемент, и его колебания отвечают второй гармонике, имея удвоенную частоту и фазу в сравнении с первым осциллятором. Это имеет место на интервале времени протяженности $T/2$. Далее, на такое же время включается однонаправленная связь – воздействие второго осциллятора на первый, пропорциональное разности мгновенных обобщенных скоростей. Это влечет гибель колебаний в первом осцилляторе, тогда как во втором происходит только медленное затухание в силу наличия собственных потерь, описываемых параметром α . Затем однонаправленная связь выключается, и в первом осцилляторе снова начинает развиваться автоколебательный процесс. Начальные условия для него задаются состоянием, реализующимся в конце периода присутствия однонаправленной связи, и определяются воздействием второго осциллятора. Соответственно, фаза возникающих автоколебаний отвечает фазе второго осциллятора, то есть удвоенной фазе предыдущей автоколебательной стадии. Таким образом, за полный период модуляции параметра связи T фаза претерпевает двукратно растягивающее отображение. В силу сжатия в пространстве состояний по остальным направлениям, аттрактором стробоскопического отображения Пуанкаре будет соленоид Смейла – Вильямса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ ϵ 16-32-00449 (ВМД) и 16-02-00135 (СПК).

1. Кузнецов С.П. *УФН* **181** (2011) 121.
2. Кузнецов С.П. Динамический хаос и гиперболические аттракторы: от математики к физике. ИКИ Москва - Ижевск, 2013.
3. Mirollo R.E., Strogatz S.H. *SIAM Journal on Applied Mathematics* **50** (1990) 1645.
4. Aronson D.G., Ermentrout G.B., Kopell N. *Physica D* **41** (1990) 403

Граница применимости теоремы Такенса в моделировании complexity

Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Еськов В.В., Вохмина Ю.В.

БУ ВО «Сургутский государственный университет», Сургут

Одним из ключевых показателей для определения уровня упорядоченности системы является энтропия. Существует большое количество подходов к расчетам энтропии, при этом значение энтропии интерпретируется как мера неопределенности системы. В этой связи представляет интерес изучения энтропии Такенса для систем третьего типа Ц биосистем (complexity), у которых в представлениях J.A. Wheeler, M. Gell-Mann и I.R. Prigogine имеется динамический хаос. Одним из ключевых понятий в теории хаоса является понятие аттрактора, но для биологических систем мы предложили новое понятие квазиаттрактор. Отметим, что энтропия Такенса позволяет получить не только числовое значение энтропии, но и определить наличие аттрактора во временных рядах при выполнении необходимых и достаточных условий. Основным ограничением применения энтропии Такенса является вычислительная сложность алгоритма, которая многим исследователям не позволила ранее выполнить проверку медико-биологических данных (требуется супер-ЭВМ) у нас была ЭВМ с 5 Teraflops.

Согласно теореме Ф. Такенса, временной ряд $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$ может быть представлен гладкой детерминированной моделью, если $\ln C_{n,\epsilon}/n$ равномерно ограничена при $n \rightarrow \infty$. Для такого ряда может быть рассчитана топологическая энтропия H и предельная чмкость D для $C_{n,\epsilon}$ Ц числа элементов множества $J_{n,\epsilon} \subset N_0 \cdot J_{n,\epsilon}$ [3].

В этом случае можно говорить о наличии кстранных аттракторов в $\{x_i\}$, если топологическая энтропия H для $\{x_i\}$ положительна, а D Ц предельная чмкость стремится к нецелому значению. Нами на основе данной теоремы был разработан алгоритм расччта предельной чмкости D и топологической энтропии H по формулам, которые были представлены в этой теореме [3]. Результаты расчетов и проверки показали, что значения предельной чмкости D и топологической энтропии H не позволяют идентифицировать факт наличия или отсутствия аттрактора. При этом расчеты проводились с использованием как реальных медико-биологических данных, так и результатов численных экспериментов (в том числе с аттрактором Лоренца). Для биосистем (с неустойчивостью статистических функций распределения $f(x)$) мы предлагаем рассчитывать параметры квазиаттракторов, которые сохраняются для систем, находящихся в гомеостазе, и выполнять расчет матриц парных сравнений выборок. Признаки динамического хаоса для квазиаттракторов биосистем (положительные константы Ляпунова, свойство перемешивания, ходимость к нулю автокорреляционных функций $A(t)$) отсутствуют (нет аттракторов Лоренца).

1. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия* **2** (2015)
2. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В., Гавриленко Т.В. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия* **2** (2016)
3. Takens F. *Lect. Notes in Math.* Springer, 1981

Взаимная синхронизация квазипериодических колебаний

Захаров С.А., Кузнецов А.П., Станкевич Н.В.

СарГТУ, Саратов

СарГУ, Саратов

Квазипериодические колебания весьма распространены в различных областях науки и техники [1Ц3]. Поэтому проблема синхронизации таких колебаний является важной задачей нелинейной теории. Как ни парадоксально, задача о синхронизации квазипериодических колебаний изучена гораздо меньше, чем для случая регулярных или хаотических режимов. При этом достаточно полная теория предполагает широкий круг возможных задач. В частности, это может быть задача о динамике двух связанных автономных систем с квазипериодическими колебаниями (квазипериодических генераторов).

В недавних работах [2-3] предложен целый ряд моделей генераторов квазипериодических колебаний, которые могут быть использованы в качестве базовых для исследования вопросов синхронизации квазипериодических колебаний. Каждая из моделей имеет свою специфику и особенность: одна из моделей не имеет состояний равновесия, а две других одну или две неподвижные точки.

В данной работе будут представлены результаты исследования особенностей взаимной синхронизации моделей генераторов квазипериодических колебаний. Ранее были исследованы вопросы синхронизации двух связанных генераторов без состояния равновесия [4]. Для такой модели была обнаружена возможность фазовой и полной синхронизации квазипериодических колебаний. Были выявлены области многочастотных квазипериодических колебаний, а также области хаоса и гиперхаоса. В системе возможны как седло-узловые бифуркации торов разной размерности, так и квазипериодические бифуркации Хопфа. На плоскости параметров собственных частот генераторов при малой связи обнаружена резонансная паутина Арнольда, которая разрушается с увеличением связи. Одна из особенностей данной системы заключается в отсутствии области гибели колебаний, которая связана с вырожденностью базовой модели: отсутствие состояния равновесия. Целью настоящей работы является изучить особенности взаимной синхронизации в моделях с одним и двумя состояниями равновесия.

Для систем связанных генераторов на базе описанных выше моделей будут представлены карты динамических режимов и карты показателей Ляпунова на различных плоскостях параметров, визуализированы фазовые портреты, спектры Фурье. С помощью полного спектра показателей Ляпунова будут диагностированы квазипериодические бифуркации, проведен сравнительный анализ динамики систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты ϵ 14-02-00085, ϵ 16-02-00135)

1. Кузнецов А.П., Сатаев И.Р., Станкевич Н.В., Тюрюкина Л.В. Физика квазипериодических колебаний. Издательский центр Наука, Саратов, 2013.
2. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Stankevich N.V. *Comm. Nonlin. Sci. Num. Simul.* **15** (2010) 1676-1681.
3. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Mosekilde E., Stankevich N.V. *EPJ ST* **222** (2013) 2391-2398.
4. Кузнецов А.П., Станкевич Н.В. *Нелинейная динамика* **9** (2013) 409-419

Влияние тепловых флуктуаций на динамику топологических

солитонов в ферромагнитных пленках

Байкенов Е.Ж.¹, Изможеров И.М.¹, Зверев В.В.¹, Филиппов Б.Н.^{1,2}

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

Наноразмерные ферромагнитные элементы с различной геометрией (пленка, диски, страйпы, проволока) вызывают практический интерес, так как допускают существование большого числа метастабильных состояний, переходы между которыми сопровождаются топологическими перестройками конфигурации намагниченности. Управляемые переходы между такими состояниями могут быть использованы для записи и обработки информации. Однако в момент перехода, преодолевая энергетический барьер, магнитная подсистема попадает в состояние неустойчивого равновесия, что делает ее чувствительной к случайным внешним воздействиям. В данной работе исследовано влияние тепловых флуктуаций на режим движения доменной стенки в магнитной пленке, представляющий собой серию топологических перестроек [1, 2].

Динамика намагниченности описывается путем численного решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта $\dot{\mathbf{m}} = |\gamma|[\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] + \alpha[\mathbf{m} \times \dot{\mathbf{m}}]$, в котором эффективное поле $\mathbf{H}_{\text{eff}} = 2AM_s^{-1}\Delta\mathbf{m} + \mathbf{H}^{(m)} + \mathbf{k}H_0 + 2KM_s^{-1}\mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{m})$ равно сумме (слева направо) обменного, магнитостатического и внешнего полей, а также поля анизотропии. Выбраны значения параметров, характерные для пермаллоя. Расчеты проводятся для фрагмента пленки толщиной 50 нм, имеющего форму квадрата со сторонами 10^3 нм. Роль начального распределения намагниченности играет фрагмент стенки “с перетяжками” (“кросс-тай” структура) [2], с вихрем (v) и антивихрем (av).

При $T = 0\text{K}^\circ$ в полях $H_0 = 20 - 100$ Э наблюдается движение v и av вдоль стенки с постоянной скоростью. В полях $H_0 > 150$ Э движение становится нерегулярным: “медленные” стадии плавной деформации магнитных конфигураций с определенной топологией прерываются “быстрыми” актами топологических перестроек (среди которых: аннигиляции (рождения) пар $v - av$ с появлением или без появления сингулярных точек (sp); перевороты векторов намагниченности в корах v, av и проч.). С ростом H_0 число “быстрых” процессов на единицу времени возрастает.

Тепловые флуктуации (моделируемые путем введения случайного магнитного поля) меняют общую картину движения. Показано, что при $T = 300, 500\text{K}^\circ$ топологические солитоны (v, av, sp) сами по себе не претерпевают существенных изменений, но топологические перестройки происходят в случайные моменты времени.

При проведении расчетов использовались пакет `numax3` [3] и программы визуализации, основанные на расчете числа вращения $J = (2\pi)^{-1} \oint_L \mathbf{j}[\tilde{\mathbf{m}} \times (d\tilde{\mathbf{m}}/d\tau)] d\tau$ и гомотопического числа $\chi = (4\pi)^{-1} \iint_S [\nabla \cos \Theta \times \nabla \Phi] ds$ (связь между $\mathbf{m}$, $\tilde{\mathbf{m}}$, Θ и Φ следует из соотношений $\mathbf{m} = (\sin \Theta \cos \Phi, \sin \Theta \sin \Phi, \cos \Theta)$ и $\tilde{\mathbf{m}} = (\cos \Phi, \sin \Phi)$).

Работа выполнена и при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ на основе госзадания, проект ϵ 2705.

1. Зверев В.В., Филиппов Б.Н. *ФТТ* **58** (2016) 473-484
2. Дубовик М.Н., Зверев В.В., Филиппов Б.Н. *ЖЭТФ* **150** (2016) 122-134
3. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. *AIP Advances* **4** (2014) 107133

Динамика топологических солитонов в постоянном внешнем магнитном поле в ферромагнитных образцах

Изожеров И.М., Зверев В.В., Филлипов Б.Н., Байкенов Е.Ж.

УрФУ, Екатеринбург, ИФМ, Екатеринбург

В последнее время наблюдается значительный интерес к вопросам, связанным с динамикой упорядоченных структур намагниченности в ферромагнетиках различной формы (нанодиски, страйпы, тонкие плочки), размеров, при различных внешних воздействиях. В первую очередь это связано с перспективой применения магнитных структур, представляющих из себя топологические солитоны (вихрей, антивихрей, сингулярных точек) как носителей в устройствах обработки информации[1]. В связи с этим важными являются вопросы устойчивости режимов движения, возникающих в магнетиках при изменении геометрических параметров образца и силы внешнего воздействия. Помимо этого задачи движения таких топологических солитонов во внешнем поле могут быть интересны и с фундаментальной точки зрения, являясь примерами неравновесных систем с диссипацией энергии.

В нашей работе моделируются динамические режимы, которые возникают в ферромагнетиках при движении одновихревых доменных стенок различных толщин. Стенка находится под воздействием внешнего поля, параллельного оси легкого намагничивания. Область моделирования была выбрана в виде прямоугольного параллелепипеда, один размер которого, соответствующий толщине плочки менялся: от 30 до 50 нанометров, а другие оставались неизменными и равными 400 и 800 нм соответственно. В процессе моделирования использовалась квадратная сетка с шагом 3.125 нм. Было показано, что при значениях внешнего магнитного поля порядка 70 Гс устойчивость асимметричной вихревой блоховской стенки независимо от ее первоначальной ориентации нарушается, происходит фазовый переход к стенке содержащей кросс-тай структуры Ц последовательности вихрей и антивихрей, нитями протягивающиеся от одной поверхности плочки к другой. Были также изучены соответствующие переходные процессы и особенности устанавливающихся режимов движения при различных толщинах плочки и различных значениях внешнего магнитного поля.

Симуляция проводилась в программном пакете для микромагнитных расчетов mumax3[2].

1. Gliga S. Ultrafast vortex core dynamics investigated by finite-element micromagnetic simulations//Forschungszentrum Julich: Schriften des Forschungszentrums Julich / Reihe EnergieUmwelt ; Bd. 79, 2010
2. Vansteenkiste A.,Leliaert J.,Dvornik M.,Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. *AIP Advances* 4 (2014) 107133

Модель неявного отображения, демонстрирующая переход от диссипативной комплексной аналитической динамики к консервативной

Исаева О.Б., Обычев М.А., Савин Д.В.

СарГУ, Саратов

Изучена дискретная модель, оператор эволюции которой задается неявной функцией значений переменной состояния в следующих друг за другом моментах времени. В общем виде такое отображение можно записать как $g(z_{n+1}, z_n) = 0$. Будучи комплексно аналитической функцией и имея одинаковый степенной порядок по комплексным переменным z_{n+1} и z_n оператор эволюции характеризуется своего рода "обратимостью": любая точка фазового пространства обладает одинаковым количеством образов и прообразов (за исключением сингулярностей, в которых сливаются образы, и экстремумов, в которых сливаются прообразы). Ранее в работе [1] рассматривался конкретный пример такой системы, оператор эволюции в котором удовлетворял условию унитарности $g(z_{n+1}, z_n) = (g(z_n^*, z_{n+1}^*))^* E$ (где E – комплексная единица). Эта система демонстрировала динамику, свойственную для консервативных отображений: обнаружено множество точек эллиптического типа на фазовой плоскости.

В настоящей работе предложена модификация неявной системы

$$\varepsilon z_{n+1}^2 + z_{n+1} = \rho z_n + z_n^2, \quad (1)$$

позволяющая осуществлением изменением управляющего параметра ε гладкий переход от необратимого квадратичного классического отображения Мандельброта при $\varepsilon = 0$ к неявному случаю, переходящему к унитарному при $\varepsilon = \rho = e^{2\pi i \varphi}$. Данная модель, сочетающая свойства необратимой диссипативной системы и обратимого сохраняющего площадь отображения, дала возможность раскрыть взаимосвязь между феноменами комплексной аналитической и консервативной динамики.

Исследована трансформация множества Жюлиа (репеллера на границе бассейнов притяжения) в "стохастическую паутину" на фазовой плоскости, встраивание классического диска Зигеля (области нейтрального вращения в диссипативных отображениях) в иерархически устроенную систему гамильтоновских островков устойчивости. Кроме того, проанализировано искажение множества Мандельброта при приближении к консервативному пределу и возникновение новых динамических режимов, с ним не ассоциирующихся, и возникающих благодаря неоднозначности динамики в прямом времени. Поиск этих дополнительных режимов осуществлялся путем перебора различных временных решений с различными периодическими последовательностями символического кода, отвечающего за выбор решения на каждом временном шаге. Обнаружено, что при приближении к консервативному пределу возникает все больше областей со все более сильной мультистабильностью, свойственных для почти консервативных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект с 16-02-00135).

1. Bullett S., Osbaldestin A. H., Persival I. *Physica D* **19** (1986) 290.

Источник микроволновых колебаний на основе гетеропереходов ферромагнетик-сверхпроводник

Каткова О.С., Сафин А.Р.

НИУ МЭИ, Москва

Динамика намагниченности в ферромагнитных наноструктурах, индуцируемая спин-поляризованным током в настоящее время представляет большой интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения [1,2]. Чаще всего исследуются наноразмерные туннельные структуры, состоящие из двух ферромагнитных слоев и тонкой немагнитной прослойки. Намагниченность одного из слоев жестко фиксирована, а другого может меняться под действием внешнего магнитного поля или протекающего спин-поляризованного тока. При протекании через систему электрического тока за счет эффекта переноса спина в ферромагнитном слое со свободной намагниченностью наблюдается прецессия намагниченности в микроволновом диапазоне. В силу миниатюрных размеров, малого энергопотребления и широкой перестройки по частоте такие осцилляторы, управляемые током могут найти широкое применение в телекоммуникационных устройствах.

Несмотря на ряд достоинств таких наноосцилляторов, у них есть и существенный недостаток, связанный с низкой выходной мощностью генерируемых колебаний. Поэтому были предприняты различные попытки повышения мощности единичных образцов. К одному из таких способов относится использование сверхпроводящих материалов в качестве промежуточных слоев, разделяющих ферромагнитные слои.

В данной работе исследовались структуры типа ферромагнетик-сверхпроводник-ферромагнетик. Было рассчитано влияние сверхпроводящего слоя на величину спин-трансферного эффекта и магнетосопротивления. Проведенные вычисления показывают, что использование сверхпроводящих слоев повышает магнетосопротивление образца, что приводит к увеличению выходной мощности генерируемых колебаний с одной стороны и уменьшению ширины спектральной линии с другой.

Сделанный анализ дает возможность определить диапазон изменения рабочих параметров, позволяющих добиться устойчивой генерации в широких пределах перестройки по току.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента для молодых кандидатов наук (проект ϵ МК-7026.2016.8).

1. Linder J. *Phys. Rev. B* **79** (2009) P. 224504.
2. Linder J. *Nat. Phys.* **11** (2015) P. 307-315.

Оценка степени перемежающейся фазовой синхронизации в реальной нейрофизиологической системе

Колоскова А.Д., Москаленко О.И.

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Саратов

В настоящее время известно, что ляпуновские показатели необходимы для анализа сложного поведения систем различной природы [1,2]. С помощью показателей Ляпунова можно обнаружить качественные изменения в динамике системы при изменении управляющих параметров. Показатели Ляпунова находят широкое применение при анализе поведения неавтономных и связанных систем. Для вычисления спектра показателей Ляпунова существуют эффективные методы и подходы. Однако, во многих случаях найти значения

показателей Ляпунова аналитически не представляется возможным, так как единственной доступной характеристикой является временная реализация системы. На этот случай также разработаны методы, но все они обладают существенными недостатками, в первую очередь, большой чувствительностью к шуму. Следовательно, необходимо разрабатывать новые, усовершенствованные методы, которые позволят проводить исследования не только в модельных, но и реальных системах по экспериментальным данным.

В данной работе предложен новый подход, способный решить важную научную проблему, а именно оценку степени синхронности поведения взаимодействующих систем по временным рядам при помощи показателей Ляпунова. Предложенный метод позволяет также определить степень режимов фазовой синхронизации и перемежающейся фазовой синхронизации, имеющей место на границе этого типа синхронного поведения [3,4]. Перемежающаяся фазовая синхронизация наблюдается в реальных нейрофизиологических системах, например, при развитии эпилептической активности у человека и животных. Таким образом, в рамках настоящего исследования были изучены реальные экспериментальные данные нейрофизиологической природы — сигналы электроэнцефалограмм (ЭЭГ), снятые с различных областей головного мозга человека, страдающего эпилепсией. Метод был применен как к пик-волновым разрядам, так и участкам фоновой активности головного мозга человека. Были получены распределения плотности вероятности разности фаз и проведена их аппроксимация аналитически полученной закономерностью. Показано, что и в случае пик-волновых разрядов, и синхронных участков фоновой активности аналитически и численно полученные результаты находятся в хорошем соответствии друг с другом, а значения показателей Ляпунова, определяющих степень синхронности режима перемежающейся фазовой синхронизации, рассчитанные по пик-волновым разрядам и участкам фоновой активности, находятся в соотношении 2 : 1. Это указывает на более высокую степень синхронизма пик-волновых разрядов по сравнению с участками фоновой активности головного мозга человека.

Результаты выполнения данной работы подтверждают эффективность разработанного метода оценки степени перемежающейся фазовой синхронизации по временным рядам, что может оказать существенное влияние на дальнейшее развитие научного направления, связанного с разработкой и применением методов анализа синхронного поведения взаимодействующих систем к реальным нейрофизиологическим системам.

1. Dunki R.M. *Phys. Rev. E* **62** (2000) 6505.
2. Porcher R., Thomas G. *Phys. Rev. E* **64** (2001) 010902(R).
3. Анищенко В.С., Постнов Д.Э. *Письма в ЖТФ* **14** (6) (1988) 569.
4. Pikovsky A. S., Osipov G. V., Rosenblum M. G., Zaks M., Kurths J. *Phys. Rev. Lett.* **79** (1) (1997) 47-50.

Об особенностях нерегулярных колебаний в конвекции ферронаножидкости

Краузин П.В., Краузина М.Т.

ПГНИУ, Пермь

Необходимость в исследовании конвекции ферронаножидкостей связана с их использованием в качестве теплоносителя в различных системах охлаждения и преобразования энергии. Ферронаножидкость представляет собой устойчивую взвесь ферромагнитных частиц, со средним размером 10 нм, в жидкости-носителе (в случае углеводородных носителей это смесь разных по размеру, массе и химическому составу молекул). Кроме того, в ее состав могут входить свободные молекулы поверхностно-активного вещества, а также агрегаты, содержащие от нескольких до сотен частиц. Многокомпонентный состав ферронаножидкостей обуславливает множество действующих в ней физических механизмов, таких как тепловая и концентрационная конвекция, термофорез, гравитационная седиментация и вращательная вязкость. Вследствие этого возникают нерегулярные перемежающиеся колебательные режимы конвекции [1]. Для изучения влияния на тепловую конвекцию различных осложняющих факторов была выбрана шаровая полость, в которой первой моде неустойчивости отвечает один вихрь [2].

В подогреваемой снизу полости вблизи порога конвекции были проведены продолжительные (от нескольких недель до месяца) опыты, в которых обнаружены незатухающие автоколебания с переходами от квазигармонических колебаний к релаксационным, а затем нерегулярным колебаниям. Регистрируемые при помощи термопар колебания температуры отвечают вращению оси конвективного вихря. Для отдельных цугов, содержащих колебания высоких и низких частот, построены вейвлеты и скелетоны. Вейвлетное преобразование позволило эффективно выделить временные интервалы существования тех или иных гармоник в сигналах. Проведено сравнение с колебаниями, возникающими в жидкости-носителе — трансформаторном масле, которое широко применяется в качестве традиционного теплоносителя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта $\epsilon 16-31-00091$ мол_а.

1. Krauzina M.T., Bozhko A.A., Putin G.F., Suslov S.A. *Phys. Rev. E* **91** (2015) 013010.
2. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. Наука, Москва, 1972.

Соленоид Смейла - Вильямса в системе двух связанных осцилляторов с гомоклинической “восьмеркой”

Круглов В.П., Кузнецов С.П., Хаджиева Л.М.

Саратовский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, СарГУ, Саратов

В последнее время было предложено большое число систем с однородно гиперболическими аттракторами [1, 2], в основном, с аттракторами типа Смейла и Вильямса. Функционирование этих систем основано на манипуляции угловыми переменными [1, 2] (например, фазами колебаний). Для возникновения соленоида Смейла и Вильямса угловая переменная должна подвергаться растягивающему отображению окружности через средний временной интервал, характерный для системы. Большинство известных примеров и неавтономные системы, хотя были предложены и автономные [3, 4].

Мы предлагаем новый пример автономной системы с аттрактором типа Смейла и Вильямса, построенный схоже с системами из [3]. Модель состоит из двух подсистем, которые

являются осцилляторами Неймарка с сепаратрисой седла в виде Y восьмерки Y . Координаты этих подсистем можно рассматривать как действительную и мнимую части комплексной переменной. Благодаря связи между подсистемами особого вида аргумент этой переменной подвергается растягивающему отображению окружности, когда траектория проходит рядом с седлом, лежащим в начале координат. Уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u, & \dot{u} &= (1 - x^2 - y^2)x + [L - (x^2 + y^2 - 1)^2]u + \varepsilon(u^3 - 3uv^2), \\ \dot{y} &= v, & \dot{v} &= (1 - x^2 - y^2)y + [L - (x^2 + y^2 - 1)^2]v + \varepsilon(3u^2v - v^3),\end{aligned}\quad (1)$$

где $\varepsilon \in \mathbb{C}$ параметр связи. Уравнения можно переписать в комплексной форме:

$$\dot{z} = w, \quad \dot{w} = (1 - |z|^2)z + [L - (|z|^2 - 1)^2]w + \varepsilon w^3, \quad (2)$$

где $z = x + iy$ и $w = u + iv$.

Функционирование системы мы объясним следующим образом. Аргумент переменной z назовем θ : $z = C \exp(i\theta)$. Когда абсолютная величина z близка к нулю (траектория близка к седлу в начале координат), угловая переменная θ увеличивается в 3 раза благодаря слагаемому εw^3 и кубической нелинейности $(1 - |z|^2)z$. Таким образом, угловая переменная подвергается отображению Бернулли $\theta_{n+1} = 3\theta_n + \text{const} \pmod{2\pi}$ после среднего времени, необходимого траектории для возвращения к седлу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты ϵ 16-32-00449 и 16-02-00135).

1. Кузнецов С.П. Динамический хаос и гиперболические аттракторы: от математики к физике. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013
2. Кузнецов С.П. *Успехи физических наук* **181** (2011) No. 2, 121-149
3. Kuznetsov S.P., Pikovsky, A. *Physica D: Nonlinear Phenomena* **232** (2007) No. 2, 87-102
4. Kruglov, V.P., Kuznetsov, S.P., Pikovsky, A. *Regular and Chaotic Dynamics* **19** (2014) No. 4, 483-494.

Диагностика направления связи между осцилляторами на основе оценок причинности по Грейнджеру по временным рядам при наличии скрытых переменных

Крылов С.Н., Смирнов Д.А., Безручко Б.П.

СарГУ, Саратов; СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

Количественная оценка направленных связей (воздействий) между колебательными системами по временным рядам важна на практике, например в геофизике и нейрофизиологии. В таких случаях оценка причинности по Грейнджеру – улучшение прогноза одного процесса при учете данных о другом по сравнению с индивидуальным прогнозом – распространенный подход. Нормированное улучшение прогноза (УП) считается оценкой силы воздействия, причем значения УП в несколько процентов могут означать значительное долгосрочное влияние связи на динамику [1]. Ненулевые УП в обе стороны часто считают признаком двунаправленной связи, но возможны и ложные выводы, например,

при влиянии скрытой третьей системы на две наблюдаемых. Поэтому важно учитывать априорную информацию о возможном наличии скрытой системы и ее динамике и ввести в метод поправки или хотя бы диагностировать возможные трудности. В работе исследуется зависимость численных значений УП в ложную сторону от параметров наблюдаемых и скрытой систем для достаточно простого класса колебательных систем. Установив области в пространствах параметров этих систем для больших значений УП в ложную сторону (так называемый эффект ложных связей) и имея даже приближенную априорную информацию о параметрах этих процессов, можно судить о достаточности традиционных оценок УП и необходимости специальных подходов. В работе проведен анализ проявления эффекта ложных связей для эталонной системы Ц линейных стохастических диссипативных осцилляторов с однонаправленной связью под действием скрытого третьего процесса, заданных стохастическими разностными уравнениями:

$$\begin{aligned} x_n &= a_x x_{n-1} + b_x x_{n-2} + \xi_{x,n} + c_x z_{n-1}, & y_n &= a_y y_{n-1} + b_y y_{n-2} + \xi_{y,n} + c_y z_{n-1} + k x_{n-1} \\ z_n &= a_z z_{n-1} + \xi_{z,n} \end{aligned} \quad (1)$$

где $a_{x,y} = 2\cos(2\pi/T_{x,y})\exp(-1/\tau_{x,y})$, $b_{x,y} = -\exp(-2/\tau_{x,y})$, T Ц периоды колебаний, τ Ц времена релаксации, ξ Ц гауссовские взаимно некоррелированные белые шумы с нулевым средним и одинаковой интенсивностью. Значения УП вычислялись через определители матричной ковариационной функции многомерного процесса (1) решением дифференциальных уравнений для моментов второго порядка. Показано, что эффект ложных связей может быть довольно силен (УП более 1% и 5%) и при умеренной взаимной корреляции наблюдаемых сигналов (менее 0.5) и имеет место в некотором диапазоне значений силы воздействия третьей системы $c_{x,y}$, ширина которого растет с ростом времени релаксации скрытого процесса. Соответствующие области в пространстве параметров оказались достаточно широки. Полученные результаты полезны как критерий необходимости учета скрытого третьего процесса на практике. Планируется дальнейшая проверка и обобщение этих результатов путем исследования стохастически возмущаемых нелинейных колебательных систем.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант € 14-12-00291).

1. Smirnov D.A., Mokhov I.I. *Phys. Rev. E* **92** (2015) 042138.

Динамика спиновых волн в L -образном магнитном микроволноводе Мартышкин А.А., Садовников А.В., Романенко Д.В.

СарГУ, Саратов

В настоящее время нерегулярные планарные ферритовые волноведущие структуры представляют большой интерес [1]. Такие структуры могут быть использованы как базовые элементы магнитных сетей для создания различных функциональных устройств: интерферометров, мультиплексоров, фильтров и ответвителей. Путем структурирования магнитного материала на подложке оказывается возможным управлять свойствами магнитостатических волн (МСВ).

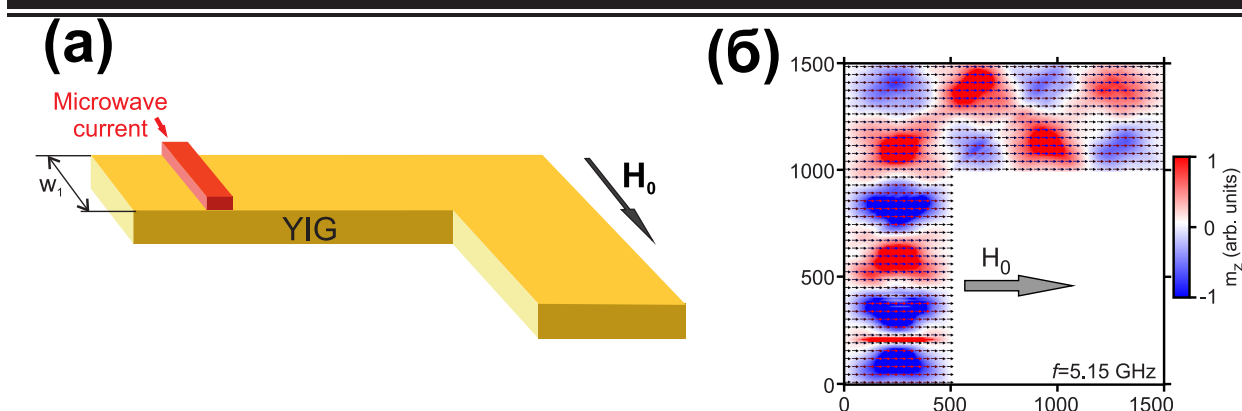


Рис. 3: Схема исследуемой структуры (а) и распределение компоненты намагниченности m_z на частотах входного сигнала $f = 5.15$ ГГц (б).

В данной работе исследована динамика распространения МСВ в нерегулярном L-образном волноводе микронных размеров (рис. 1(а)), изготовленном из железо-иттриевого граната (ЖИГ). Рассмотрено влияние анизотропии формы на направление распространения МСВ при различных направлениях внешнего магнитного поля. Показана возможность управления модовым составом распространяющихся МСВ. Проведено численное моделирование методом конечных разностей во временной области [2]. Продемонстрирована возможность ответвления МСВ. Проведено экспериментальное исследование распространения МСВ в рассматриваемой структуре методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии. Результаты численного моделирования находятся в хорошем соответствии с данными экспериментального исследования.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-37-00217, 16-37-60093) и стипендии (СП-313.2015.5, СП-2829.2016.5) и гранта (МК-5837.2016.9) Президента РФ.

1. Sheshukova S., Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S. *IEEE Magn. Lett.* **5** (2014)
2. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. *AIP Advances* **4** (2014)

Моделирование пик-волновых разрядов с помощью сети нейронных осцилляторов

Медведева Т.М.¹, Сысоева М.В.^{2,1}, Сысоев И.В.¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия

²Саратовский Государственный Технический Университет имени Ю.А. Гагарина

Пик-волновые разряды известны как основное проявление абсансной эпилепсии — неконвульсивной генерализованной формы эпилепсии неизвестной этиологии [1]. Для понимания механизмов возникновения абсансной эпилепсии важно построить модели, которые воспроизводили бы основные ее особенности. Такие модели известны на различных

уровнях организации: от моделей возбуждения индивидуального нейрона вследствие патологического изменения концентрации нейромедиаторов [2], до большой феноменологической модели в виде ансамбля фазовых осцилляторов Курамото [3]. Цель данной работы — создание такой модели, которая будет учитывать иерархию организации функциональных единиц нейронных связей, принимающих участие в возникновении и поддержании абсансных разрядов и воспроизводить некоторые экспериментально наблюдаемые индивидуальные характеристики абсансных сигналов и характеристики связанности.

Модель организована в два уровня. Первый — это модель соматосенсорной области коры мозга, которая считается фокусом эпилепсии [1], модель ветропостериального ядра таламуса и модель внешнего входа — нейронов периферии. Для моделирования групп нейронов были использованы уравнения Фицхью-Нагумо. Второй уровень — это модель связей между внешним входом, таламусом и неокортексом. Она способна воспроизводить хорошо изученные характеристики пик-волновых разрядов: основную частоту и форму колебаний, их амплитуду и среднюю продолжительность. Кроме того, были воспроизведены некоторые характеристики в динамике связанности [2], полученные при оценки связанности реализаций соответствующих отведений ЭЭГ [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант $\epsilon 16-34-00203$ и Стипендии Президента для поддержки молодых ученых СП-1510.2015.4.

1. Meeren HK, Pijn JP, van Luijckelaar EL, Coenen AM, Lopes da Silva FH. Cortical focus drives widespread corticothalamic networks during spontaneous absence seizures in rats. *Journal of Neuroscience*. 2002;22:1480-1495.
2. Destexhe A, McCormick DA, Sejnowski TJ. A model for 8-10 Hz spindling in interconnected thalamic relay and reticularis neurons. *Biophys J* 1993;65: 2473-7.
3. Schmidt H, Petkov G, Richardson MP, Terry JR. Dynamics on networks: the role of local dynamics and global networks on the emergence of hypersynchronous neural activity. *PLoS Comput Biol* 2014;10:e1003947.
4. Sysoeva M.V., Lüttjohann A., van Luijckelaar G., Sysoev I.V. Dynamics of directional coupling underlying spike-wave discharges. *Neuroscience* 2016;314:75-89.

Динамика спиновых волн в системе вертикально связанных магнито-кристаллических решеток

Одинцов С.А., Садовников А.В., Шараевская А.Ю., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П.

СарГУ, Саратов

Магнонные волноводы, сформированные из тонких магнитных пленок с низким коэффициентом линейного затухания, являются функциональным блоком любой комплексной интегральной магнонной сети [1], поскольку на их основе возможно создавать межсоединения и линии передач между узлами обработки информационного сигнала [2]. Явление каналирования в структуре из двумерного магнонного кристалла подробно рассмотрено в работе [3].

В настоящей работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования линейных и нелинейных свойств структуры, состоящей из двух двумерных

магнетонных кристаллов (2D МК), образованных путем создания периодической в двух направлениях структуры канавок на их поверхностях. Две плочки помещены так, друг над другом, образуя многослойную нерегулярную периодическую структуру.

С помощью метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов показана возможность частотно-пространственной селективности и образования волноводных каналов в 2D МК конечной ширины. Результаты численного моделирования методом конечных элементов имеют хорошее совпадение с результатами эксперимента и свидетельствуют о возможности авто-коллимации спиновой волны в рассматриваемом 2D МК.

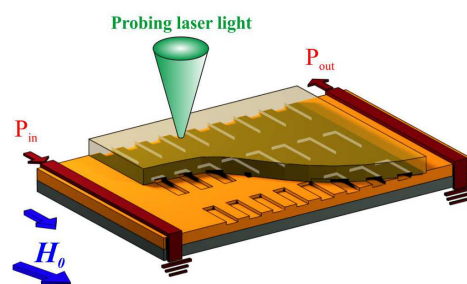


Рис. 4: Схема экспериментального исследования системы латерально связанных ЖИГ волноводов

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-37-60093, 16-37-00217, 16-29-03120), стипендии (СП-313.2015.5) и гранта (МК-5837.2016.9) Президента РФ.

1. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., and Grundler D., *J. Phys.D: Appl. Phys.* **25** (2010) 264001
2. Sadovnikov A. V., Davies S., Grishin S. V., Kruglyak V., Romanenko D., Sharaevskii Y., and Nikitov S., *Appl. Phys. Lett.* **106** (2015) 192406
3. Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Odincov S. A., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., Stognij A. I. and Nikitov S. A., *Appl. Phys. Lett.* **108** (2016) 172411

Пучково-плазменная неустойчивость в заряженной электронной плазме в отсутствие ионов

Дубинов А.Е.^{1,2}, Петрик А.Г.³, Куркин С.А.^{3,4}, Фролов Н.С.^{3,4}

¹Российский федеральный ядерный центр Ц Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров;

²Саровский физико-технический институт Ц филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Саров;

³Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов;

⁴Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов

Пучково-плазменная неустойчивость (ППН) — явление, которое интенсивно изучается как теоретически, так и экспериментально [1]. ППН заключается в раскачке продольных колебаний пространственного заряда в плазме при пропускании сквозь нее электронного пучка [2]. ППН используется в пучково-плазменных СВЧ-генераторах и усилителях [3], а также для возбуждения пучково-плазменных разрядов для технологий [4].

В работе была изучена возможность формирования пучково-плазменной неустойчивости в случае, когда электронный пучок инжектируется в неподвижную однокомпонентную горячую электронную плазму без ионов. В качестве такой плазмы было выбрано так называемое сжатое состояние электронного пучка (ССП).

Явление СПП в виркаторах заключается в следующем. Сразу же после начала отражения электронов от виртуального катода (ВК) в потенциальной яме катод-ВК устанавливается двухпотоковое состояние пучков встречных электронных потоков. Во встречных пучках с током, превышающим предельный вакуумный ток, существует более быстрая неустойчивость, опережающая в своем развитии двухпотоковую, а именно, формирование плотного горячего облака заряженной электронной плазмы, характеризующейся большой плотностью электронов и развитой турбулентностью. Фактически, СПП можно назвать распределенным в пространстве дрейфа ВК.

В результате численного моделирования была показана возможность формирования пучково-плазменной неустойчивости и получены детальные характеристики физических процессов, происходящих при взаимодействии двух пучков. Были получены зависимости инкремента неустойчивости и длины волны от значения тока релятивистского электронного пучка.

1. P. C. Jagher de, F. W. Sluijter, and H. J. Hopman. Relativistic electron beams and beam-plasma interaction. // *Phys. Rep.* (1988) V. **167**, P. 177–239.
2. Ахиезер А.И., Файнберг Я.Б. О взаимодействии пучка заряженных частиц с электронной плазмой // *ДАН СССР*. (1949) Т. **69**, С. 555–556.
3. I. L. Bogdankevich, I. E. Ivanov, and P. S. Strelkov. Experimental study and numerical simulations of a plasma relativistic microwave amplifier. // *Plasma Phys. Rep.* (2010) V. **36**, P. 762–771.
4. S. G. Walton, C. Muratore, D. Leonhardt, R. F. Fernsler, D. D. Blackwell, and R. A. Meger. Electron-beam-generated plasmas for materials processing. // *Surf. Coat. Technol.* (2004) V. **186**, P. 40–46.

Сложные колебания в системах с частотным и фазовым управлением

Пономаренко В.П.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия, e-mail: ponomarenko@vtnk.unn.ru

Анализируются динамические режимы и нелинейные эффекты в моделях автогенераторных систем с частотным и фазовым управлением. Основное внимание уделено автомодуляционным режимам, определяемым многовитковыми хаотическими аттракторами с нерегулярными переключениями колебаний. Рассмотрены модели систем с частотным

управлением и систем автофазирования, представляемые нелинейными динамическими системами с полутора и двумя степенями свободы. Особенностью этих моделей является множественность состояний равновесия, определяющих режимы стационарной генерации и режимы автофазирования. Выяснено, что в рассматриваемых системах благодаря неединственности состояний равновесия реализуется большое число различных периодических и хаотических автомодуляционных режимов. Переходы к хаотическим режимам осуществляются через бифуркации удвоения предельных циклов, через перемежаемость и разрушение торов. Характерным является возбуждение хаотических колебаний на многоспиральных аттракторах с нерегулярными переходами между неустойчивыми состояниями равновесия.

Рассмотрены модели систем с частотно-фазовым управлением, представляемые нелинейными динамическими системами с одной и двумя степенями свободы в соответствующих цилиндрических фазовых пространствах. Выявлена достаточно сложная картина динамических состояний исследуемых моделей, обусловленная существованием множества асинхронных режимов различной сложности и их бифуркаций. Выяснена нетривиальная роль периодической нелинейности кольца частотного управления при формировании автомодуляционных колебаний. Наиболее интересными эффектами являются: потеря устойчивости синхронного режима, многочисленные переходы между периодическими и хаотическими режимами по мере увеличения параметра инерционности и степени влияния частотного кольца управления, возникновение хаотических колебаний различной сложности с переключениями движений, качественно похожих на колебания в режимах многоспиральных хаотических аттракторов, характерных для динамических систем с неединственным состоянием равновесия. Возникновение подобных режимов в частотно-фазовых системах оказывается возможным благодаря существованию множества периодических, квазипериодических и хаотических асинхронных режимов, обязанных своим происхождением периодической нелинейности частотного кольца управления, и взаимодействию таких режимов.

Выявленное многообразие динамических состояний исследуемых моделей систем с частотным и фазовым управлением и возможность эффективного воздействия на их свойства и области существования путем легко реализуемого изменения параметров цепей управления создают предпосылки для использования рассматриваемых систем в качестве генераторов хаотических колебаний для формирования перспективных сигналов с хаотической модуляцией их неэнергетических параметров (частоты и фазы) и применения таких сигналов в информационно-коммуникационных системах.

Нетривиальные аттракторы в слабодиссипативном отображении Икеды с квазипериодическим воздействием

Савин А.В., Савин Д.В., Кузнецов А.П.

Саратовский государственный университет, Саратов, Россия

В работе исследуется динамика систем, находящихся под воздействием сигнала, частота которого несоизмерима с частотой собственных колебаний. Динамика таких систем в случае существенной диссипации довольно хорошо изучена [1]. В частности, известно, что в этом случае одним из типичных режимов является странный нехаотический аттрактор (СНА). В то же время вопрос о существовании и особенностях СНА в системах с малой

диссипацией исследован еще весьма слабо. Так, в работе [2] показано существованию СНА в системе со слабой диссипацией при одном фиксированном наборе параметров, однако вопрос о величине диапазона параметров, соответствующих существованию СНА, в ней не исследовался.

В настоящей работе исследовалась динамика отображения Икеды [3] под воздействием сигнала на несоизмеримой частоте:

$$z_{n+1} = A(1 + \varepsilon \sin 2\pi\theta_n) + Bz_n e^{i|z_n|^2}, \theta_{n+1} = \theta_n + w.$$

где частота сигнала w выбиралась равной Золотому среднему γ : $w = (\sqrt{5} - 1)/2$.

В работе были определены области на плоскости γ параметр нелинейности A - амплитуда воздействия $\varepsilon\gamma$, соответствующие существованию СНА. Для идентификации СНА для аттракторов с отрицательным старшим ляпуновским показателем проводился анализ их структуры при помощи метода рациональных аппроксимаций [1]. Обнаружено, что области существования СНА в пространстве параметров сильно уменьшаются с уменьшением диссипации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 15-02-02893.

1. U. Feudel, S. Kuznetsov, A. Pikovsky. Strange Nonchaotic Attractors. World Scientific, 2006.
2. S. Bilal, R. Ramaswamy // Phys. Rev. E, v. 87, 034901 (2013)
3. Ikeda K., Daido H., Akimoto O. // Phys. Rev. Lett., 1980, v. 45, p. 709.

О синхронизации генераторов гиперболического хаоса и широкополосной коммуникации на ее основе

Исаева О.Б., Кузнецов С.П., Савин Д.В., Селезнев Е.П.

СарГУ, Саратов

Начиная с работы [1] активно разрабатываются модели генераторов гиперболического хаоса, обладающих различной физической природой. Некоторые из них допускают воплощение в виде радиотехнического устройства. Присущее гиперболическому хаосу свойство грубости должно стать значительным преимуществом таких радиотехнических генераторов с точки зрения приложений. Важная область применения хаотических систем базируется на явлении синхронизации. Например, к ним относится хаотическая коммуникация. Изучение проявлений структурной устойчивости для связанных генераторов гиперболического хаоса кажется актуальной задачей.

В работе проведены исследования по анализу грубости аттрактора в фазовом пространстве двух однонаправленно и симметрично диссипативно связанных генераторов гиперболического хаоса

$$\ddot{x}_{1,2} - (A_{1,2} \cos(\omega_{1,2}t/T) - x_{1,2}^2)\dot{x}_{1,2} + \omega_{1,2}^2 x_{1,2} = \varepsilon_{1,2} y_{1,2} \cos \omega_{1,2}t + \delta_{1,2}(x_{2,1} - x_{1,2}), \quad (1)$$

$$\ddot{y}_{1,2} - (-A_{1,2} \cos(\omega_{1,2}t/T) - y_{1,2}^2)\dot{y}_{1,2} + (2\omega_{1,2})^2 y_{1,2} = \varepsilon_{1,2} x_{1,2}^2. \quad (2)$$

Для связанных таким образом генераторов реализуется режим гиперхаоса в асинхронном случае (при слабой связи) и синхронный режим с одним положительным показателем Ляпунова (при интенсивной связи). Было показано, что и тот и другой режимы

могут являться структурно устойчивыми. Продемонстрированы картины синхронизации для гиперболического и негиперболического случаев, в том числе и для неидентичных генераторов. Анализ структурной устойчивости проводился с помощью расчета распределения локальных ляпуновских показателей и распределения углов между устойчивым и неустойчивым многообразиями аттрактора.

В работе описано также несколько коммуникационных схем на базе генераторов с гиперболической динамикой. Схемы предусматривают нелинейное подмешивание передаваемой информации к хаотическому сигналу генератора-передатчика с дальнейшей расшифровкой на синхронизированном с передатчиком генераторе-приемнике. Помимо грубости эти схемы демонстрируют более выраженную широкополосность, обусловленную однородной сплошной структурой спектра мощности гиперболического хаотического сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект ϵ 16-02-00085).

1. Kuznetsov S.P. *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 144101.

Метод обучения в модели нейронных сетей с гетероклиническим контуром

Сельский А.О.

СарГУ, Саратов

Обучение является одной из основных когнитивных функций, таким образом исследование механизмов обучения в нейронных сетях представляется актуальной задачей современной науки. В настоящей работе для описания нейронной сети использовалась модель, описанная в [1]. В рамках данной модели в зависимости от матрицы связи направление обхода и продолжительность активности в системе могут меняться (см. рисунок, 1, а, б).

В настоящей работе предложен метод, связывающий матрицу связи ведомой системы с динамикой ведущей и ведомой систем и позволяющий производить эффективное обучение:

$$\dot{\alpha}_i(t) = \frac{\Delta\phi_2}{|\Delta\phi_2|} c \left((a_i^m)^2 - (a_i^r)^2 \right) \cdot \alpha_i, \beta_i = \frac{1}{\alpha_i}, \Delta\phi_2 = (a_2^m - a_3^m) - (a_2^r - a_3^r). \quad (1)$$

Здесь $a_i(t)$ — переменная, описывающая состояние i -го нейрона в системе; α_i, β_i — коэффициенты в матрице связи ведомой системы; c — скорость обучения. Применение данного метода позволяет обучать ведомую систему направлению обхода и продолжительности активности ведущей системы, в результате чего динамика ведущей и ведомой систем синхронизируется (см. рисунок).

1. Afraimovich S., Zhigulin V.P., Rabinovich M.I. *CHAOS* **14** 4 (2004) 1123-1129

Транспорт заряда в полупроводниковых сверхрешетках в присутствии возмущения концентрации легирующей примеси

Сельский А.О.

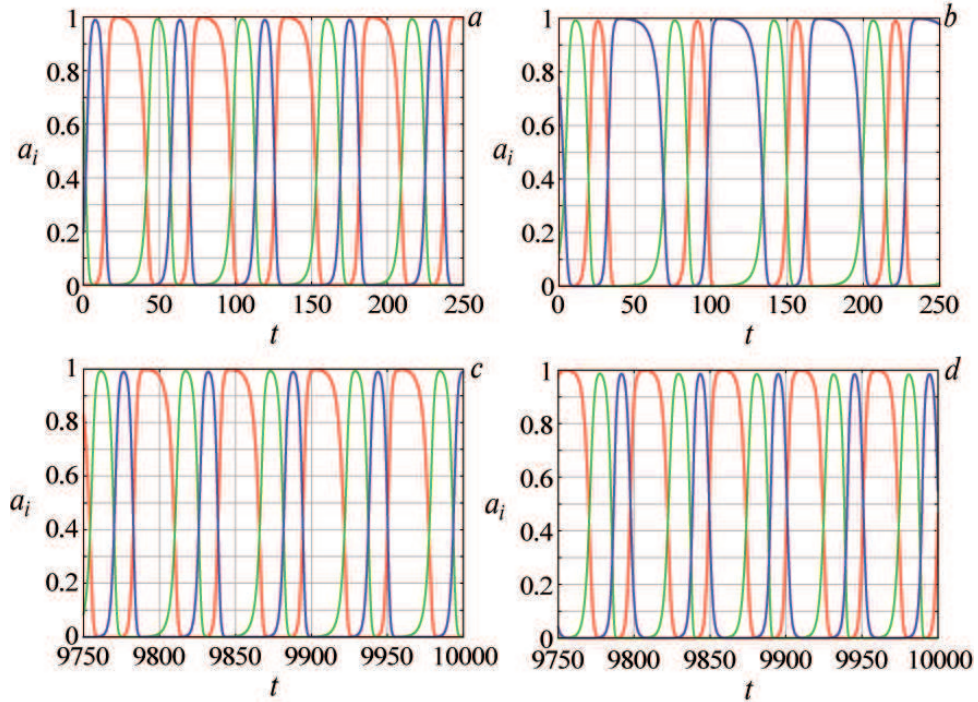


Рис. 5: Реализации состояния ведущей (а,с) и ведомой систем (b,d) до (а,b) и после (с,d) обучения

СГУ, Саратов

Полупроводниковые сверхрешетки Ч сложные наноструктуры, состоящие из нескольких чередующихся тонких (~ 10 нм) слоев различных полупроводниковых материалов, которые возможно использовать для генерации и управления высокочастотными колебаниями [1]. При приложении напряжения к концам структуры можно наблюдать генерацию колебаний тока, вызываемую формированием доменов пространственного заряда [2], в случае если напряжение выше порогового значения. Данные колебания могут достигать частоты десятков ГГц и сопровождаться рядом нелинейных эффектов. Большое влияние на транспорт заряда в сверхрешетке оказывают различные воздействия, к примеру, наклонное магнитное поле [3], температура [4], или изменение концентрации легирующей примеси. В работе [5], к примеру, рассматривалось влияние флуктуаций концентрации на динамику электронов в сверхрешетке. В настоящей работе рассматривается изменение транспорта заряда при изменении концентрации легирующей примеси в виде локального возмущения.

Для моделирования транспорта заряда используем модель, описанную в [2]:

$$\begin{aligned} e \frac{\partial n}{\partial t} &= - \frac{\partial J}{\partial x}, \\ J &= e n v_d(F), \\ \frac{\partial F}{\partial x} &= \frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} (n - n_D). \end{aligned} \quad (1)$$

где n – концентрация электронов; J – плотность тока; $v_d(F)$ – дрейфовая скорость электронов, рассчитываемая по формуле Эсаки-Тсу [1]; F – напряженность электрического поля; n_D – концентрация легирующей примеси. При наличии возмущения n_D является

функцией координаты, различные профили концентрации легирующей примеси представлены на рисунке 1. В рамках данной работы было рассмотрено три варианта: постоянная концентрация, понижение концентрации вблизи начала или конца структуры.

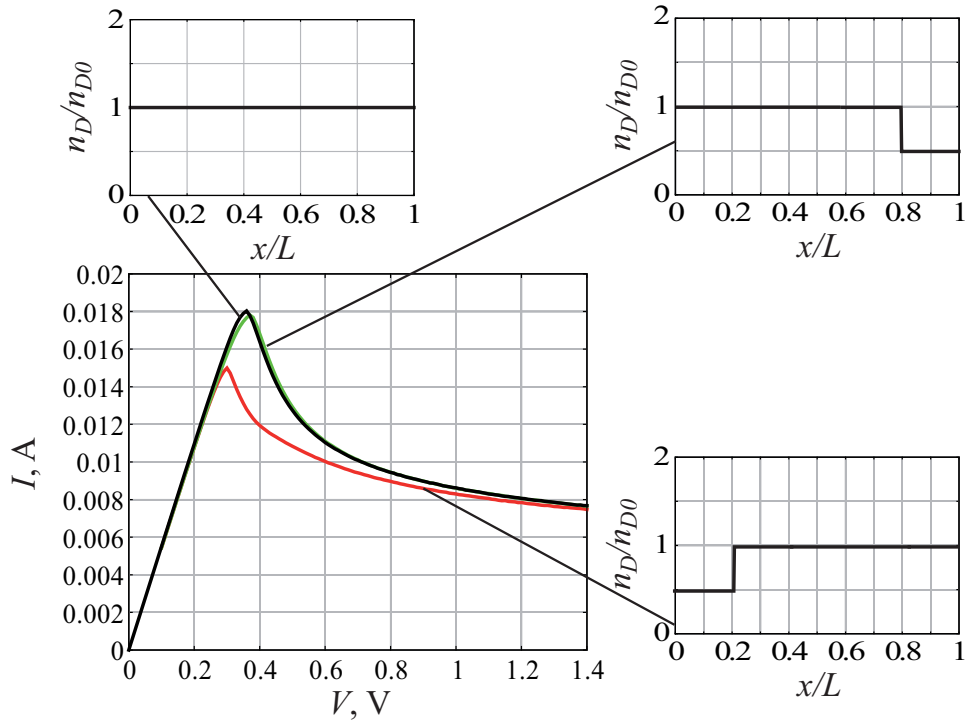


Рис. 6: Зависимости усредненного по времени тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, от напряжения, приложенного к ней, при различных профилях концентрации легирующей примеси

Помимо профилей на рисунке приведены соответствующие зависимости среднего тока от напряжения, приложенного к сверхрешетке. Генерация колебаний соответствует падающему участку данной зависимости, а пороговое напряжение, таким образом, отвечает максимальному значению тока. Можно видеть, что в зависимости от локализации возмущения зависимости тока от напряжения заметно изменяются. При локализации возмущения вблизи конца сверхрешетки зависимость почти не отличается от случая без возмущения. Если возмущение концентрации легирующей примеси локализовано вблизи начала, пороговое значение напряжения, соответствующего генерации колебаний тока, уменьшается, как и максимальный ток, протекающий через полупроводниковую сверхрешетку.

Таким образом, изменяя локально концентрацию легирующей примеси вблизи начала полупроводниковой сверхрешетки возможно существенно изменить характеристики транспорта заряда через полупроводниковую сверхрешетку.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект ϵ 16-32-60059).

1. Esaki L., Tsu R. *IBM J. Res. Develop.* **14** (1970) 61-65
2. Wacker A. *Phys. Rep.* **357** (2002) 1-111
3. Fromhold T.M., Patane A., Bujkiewicz S. et al. *Nature* **428** (2004) 726-730
4. Selskii A.O., Koronovskii A.A., Hramov A.E. et al. *Phys. Rev. B* **84** (2011) 235-311

5. Patra M., Schwarz G., Scholl E. *Phys. Rev.* **57** (1998) 18-24

Разработка методов хаотической модуляции, основанных на “лабиринтном” хаосе Томаса

Савкин Л.В.

ПАО “Радиофизика”, Москва

ИРЭ им. В.А. Котельникова, Москва

В работе представлены результаты разработки и исследования методов *хаотической лабиринтной модуляции*, в основе которых лежит стандартная система уравнений Томаса [1, 2]

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sin y - ax, \\ \dot{y} &= \sin z - ay, \\ \dot{z} &= \sin x - az,\end{aligned}$$

в которой при определенных значениях параметра a возникает хаотическая динамика. Основной диапазон варьирования параметра a , использовавшийся в исследованиях $\text{var}\{a\} = [0.000135768; 0.0898]$.

Исследования проводились с использованием различных схем ввода информационных (аналоговых и цифровых) сигналов, включая периодическое и аperiodическое «подмешивание», аддитивное (прямое) наложение с кусочно-линейным преобразованием и поразрядное сложение (лабиринтная манипуляция) по правилу циклической группы $G = \langle h \rangle = \{h^i | i \in \mathbb{Z}\}$ с тремя типами порождающих элементов ($h = 2; 4; 8$). В ходе работы был получен ряд модифицированных моделей осцилляторов Томаса, обладающих более равномерной спектральной плотностью в полосе генерации хаотических колебаний по сравнению со стандартной системой Томаса.

Разработан способ синхронизации лабиринтных систем, отличный от способа, предложенного в [3]. В качестве основной экспериментальной платформы для отработки методов хаотической лабиринтной модуляции (манипуляции) были задействованы две аппаратно-программные платформы ПЛИС Xilinx Virtex-6 LX240T FPGA.

Особое внимание в работе было уделено вопросам повышения прецизионности [4] нелинейных характеристик генераторов «лабиринтного» хаоса [5].

1. *Sprott J.C.* Labyrinth Chaos. Int. Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 17, No. 6, 2007.
2. *Gotthans T., Petrzela J.* Experimental Study of the Sampled Labyrinth Chaos. Radioengineering, Vol. 20, No. 4, 2011.
3. *Ke Ding, Qing-Long Han.* Chaotic synchronization of labyrinth systems. 49th IEEE Conference on Decision and Control. December 15-17, Atlanta, GA, USA, 2010.
4. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса / Под общ. ред. Дмитриева А.С. - М.: Техносфера, 2012.
5. *Savkin L.V.* Analysis of the methods of implementation of the precision chaos generators. Dynamics, Bifurcation, and Chaos 2016. International Conference-Scholl of Lobachevsky University. July 18 - 22, 2016. Book of abstracts. Nizhny Novgorod, 2016.

Об одном классе циркулянтных систем и вопросы прецизионности циркулянтных генераторов хаоса

Савкин Л.В.

ПАО «Радиофизика», Москва

ИРЭ им. В.А. Котельникова, Москва

Работа посвящена вопросам проектирования прецизионных [1, 2] генераторов хаоса циркулянтного [3] типа на базе ПЛИС класса FPGA. К системам *циркулянтного* типа для случая $\mathbb{R}^3$ относятся системы уравнений вида

$$\dot{x} = f(x, y, z), \dot{y} = f(y, z, x), \dot{z} = f(z, x, y), \quad (1)$$

характеризующиеся тем, что все функции в правой части уравнений совпадают с точностью до перестановки переменных [3]. Особый интерес в данного типа системах представляет переход от системы (1) к частному, но в то же время довольно широкому, классу циркулянтных систем вида

$$\dot{x} = f(y, z), \dot{y} = f(z, x), \dot{z} = f(x, y), \quad (2)$$

обеспечивающих практически полное избавление от диссипации[3].

В результате исследования данного класса (2) систем высказана гипотеза, касающаяся возможности графоаналитического представления математических моделей циркулянтных систем (осцилляторов) в виде соответствующих им (по принципу полного структурно-функционального соответствия) циркулянтных графов $G = G(D, Q)$, где $D = \{d_i, i \in \overline{1, I}\}$ - множество базисных функциональных вершин, удовлетворяющих принципу декомпозиции [4, 5] исходного осциллятора (2), а $Q = \{q_j, j \in \overline{1, J}\}$ - множество ребер, задающих число узлов $\lambda = C_n^3$ (для $\mathbb{R}^3$) и разрывов $\mu = f(I)$ по правилам построения неориентированного графа, содержащего симметрию с переводом (или «прыжком») от любой базисной функциональной вершины $A_n = q_j$ в любую другую вершину $A_{n+1} \neq q_j$.

Представлены примеры применения предложенного подхода для проектирования ряда циркулянтных генераторов хаоса радиоволнового диапазона, строящихся преимущественно на базе ПЛИС класса FPGA.

1. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. Генерация хаоса / Под общ. ред. Дмитриева А.С. - М.: Техносфера, 2012.
2. Savkin L.V. Analysis of the methods of implementation of the precision chaos generators. Dynamics, Bifurcation, and Chaos 2016. International Conference-Scholl of Lobachevsky University. July 18-22, 2016. Book of abstracts. Nizhny Novgorod, 2016.
3. Sprott J.C. Elegant Chaos. Algebraically Simple Chaotic Flows. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2010.
4. Pecora L.M., Carrol T.L. Synchronization in chaotic systems. Phys. Rev. Letters. 1990. Vol. 64, No. 8.
5. Волковский А.Р., Рульков Н.В. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы для передачи информации с хаотической несущей. Письма в ЖТФ. Т. 19. Вып. 3. 1993.

О маятниковой модели с бесконечным числом состояний равновесия и квазипериодической динамикой

Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Седова Ю.В.

СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов

Помимо периодических движений и хаоса в нелинейных системах могут реализоваться квазипериодические колебания, когда возвраты фазовой траектории в окрестность исходного состояния в ходе эволюции во времени происходят регулярно, но при этом период возврата увеличивается по мере повышения точности, с которой фиксируется возврат. Квазипериодические колебания как в консервативных, так и в диссипативных системах, характеризуются дискретным спектром Фурье, в виде набора составляющих, у которых частоты находятся в иррациональном отношении.

Мы хотим привлечь внимание к одной специфической возможности возникновения квазипериодических колебаний в механических системах, связанной с иррациональным соотношением геометрических размеров вовлеченных в движение вращающихся элементов. Речь может идти о системах типа маятников, взаимодействующих посредством фрикционной или ременной передачи между вращающимися валами или дисками, которые к ним присоединены, или о системах типа экипажей с колесами разного размера, совершающих движение на шероховатой поверхности без проскальзывания. На простых примерах маятниковых систем с фрикционной передачей мы продемонстрируем некоторые особенности динамического поведения, которые оказываются в некоторых отношениях необычными с точки зрения традиционных представлений нелинейной динамики.

Имея в виду, что при отсутствии проскальзывания упомянутые выше механические передачи в идеале могут рассматриваться как функционирующие без потерь механической энергии, мы начнем обсуждение с консервативной системы, относящейся к указанному классу. Затем будут рассмотрены системы с диссипацией, включая модель автоколебательного типа, представляющую собой модификацию исходной системы с использованием идеи маятника Фруда.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ ϵ 15-12-20035 в части построения основной модели и анализа ее консервативного и диссипативного вариантов, а также гранта РФФИ N 14-02-00085 в части анализа автоколебательных процессов.

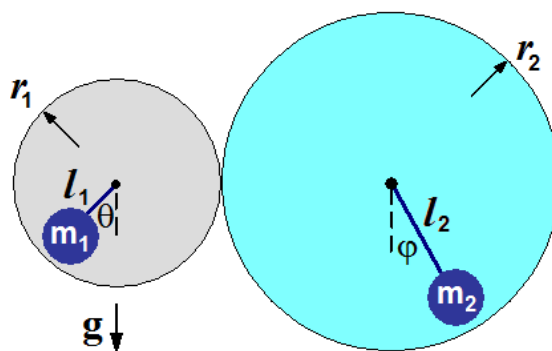


Рис. 7: Исследуемая механическая система

Динамика простейшей дискретной модели с трехчастотной квазипериодичностью и квазипериодическими бифуркациями

Кузнецов А.П., Седова Ю.В.

СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов

Мы предлагаем новое *автономное* трехмерное отображение, которое демонстрирует двух- и трехчастотную квазипериодичность

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= x_n + h \cdot y_{n+1}, \\y_{n+1} &= y_n + h \cdot ((\lambda + z_n + x_n^2 - \beta x_n^4)y_n - \omega_0^2 x_n), \\z_{n+1} &= z_n + h \cdot (b(\varepsilon - z_n) - ky_n^2).\end{aligned}\quad (1)$$

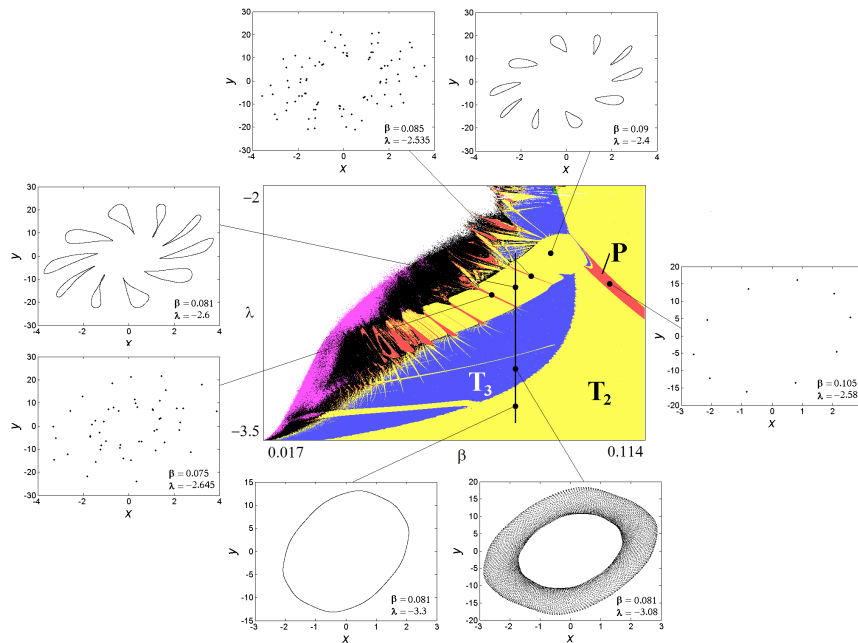


Рис. 8: Карта ляпуновских показателей и фазовые портреты тор-отображения (1). Параметр дискретизации $h = 0.1$. Фиксированные параметры $b = 1$, $\varepsilon = 4$, $k = 0.02$, $\omega_0 = 2\pi$.

Отображение получено заменой производных по времени конечными разностями в уравнении генератора квазипериодических колебаний [1, 2]. В отображении возможны все основные квазипериодические бифуркации. Исследование выполнено методом ляпуновских карт, дополненных графиками ляпуновских показателей, фазовыми портретами и бифуркационными деревьями, иллюстрирующими квазипериодические бифуркации. Обсуждаются особенности трехпараметрической картины, ассоциирующей с квазипериодической бифуркацией Хопфа. Также проводится сравнение с неавтономной моделью.

Работа поддержана проектом РФФИ 15-02-02893.

1. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Mosekilde E., Stankevich N.V. *The European Physical Journal Special Topics* **222** (2013) pp.2391-2398.
2. Кузнецов А.П., Станкевич Н.В. *Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика* **23** (2015) С.71-93.

Оценка связей между осцилляторами по коротким временным рядам на основе моделирования фазовой динамики

Сидак Е.В.(1), Смирнов Д.А.(2), Безручко Б.П.(1,2)

1-СарГУ, Саратов; 2-СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

Задача достоверного выявления связанности между колебательными системами по временным рядам встречается в различных областях науки и в биомедицине [1], геофизике [2], радиофизике [3] и др. Для решения такой задачи в работах [4,5] был предложен и развит метод, основанный на эмпирическом моделировании наблюдаемой фазовой динамики исследуемых систем по временным рядам фаз их колебаний. Метод показал свою эффективность для анализа различных систем. Он оказывается полезным на практике, поскольку позволяет выявлять, в том числе и слабые связи с контролем достоверности выводов и уровня статистической значимости. Одним из важных условий применимости метода является достаточная длина ряда: метод дает надежные оценки при анализе временных реализаций длительности 50 характерных периодов колебаний и более. Однако не всегда на практике в распоряжении исследователя имеются временные ряды такой длины. Например, этого нет во многих биомедицинских задачах, когда важно проводить анализ нестационарных данных по как можно более коротким фрагментам, или в геофизике, когда весь доступный сигнал зачастую включает в себя лишь несколько характерных периодов исследуемых процессов. В подобных условиях очень малого объема данных вероятность ошибок метода (ложных выводов о наличии связи) может превышать заданную в методе малую величину (обычно - 5 %). Для диагностики таких ошибок на практике в данной работе проводилось исследование статистических свойств оценок связи, получаемых на основе моделирования фазовой динамики, в зависимости от длины временного ряда при уменьшении последней до области очень коротких рядов.

Численные эксперименты проводились на ансамблях временных рядов от двух стохастически возмущаемых фазовых осцилляторов при разных вариантах связи между ними. Анализ проводился при различных значениях параметров осцилляторов и уровней шума. В результате было показано, что минимальная требуемая длина анализируемого ряда для обеспечения малой вероятности ложных выводов о наличии связи составляет 10 характерных периодов при достаточно малых уровнях шума в уравнениях осцилляторов и уменьшается до пяти периодов при значительных шумах. Полученные результаты показывают потенциальные возможности применения метода к очень коротким рядам и требуют обобщения при исследованиях систем с различными свойствами динамики.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант N 14-12- 00291).

1. E. Pereda, R. Quiñan Quiroga, J. Bhattacharya Progr. Neurobiol., 2005. V. 77. P. 1;
2. Mokhov I.I., Smirnov D.A. Geophys. Res. Lett., 2006. V.33. L03708., Мохов И.И., Смирнов Д.А. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006. Т.42. №5. С.650.
3. Y.-C. Hung, C.-K. Hu Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101, 244102.
4. Rosenblum M., Pikovsky A. Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64. P. 045202(R).
5. Smirnov D.A., Bezruchko B.P. // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 046204

Диффузия в конфигурационном пространстве системы двух связанных ротаторов

Фельк Е.В., Кузнецов С.П., Савин А.В.

Саратовский государственный университет

В данной работе рассматривается система из двух ротаторов, аналогичная системе Терстона и Уикса [1]. Механизм составлен из лежащих в общей плоскости двух дисков, каждый из которых способен вращаться вокруг своей оси. Мгновенная конфигурация системы задается угловыми переменными, отвечающие за углы поворота дисков. Интересно исследовать данную систему с добавлением слабой диссипации.

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \nu[\mu - \frac{1}{2}(\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2)]\dot{x}_1^2 + (\cos(x_1) + \cos(x_2))\sin(x_1) \\ \ddot{x}_2 = \nu[\mu - \frac{1}{2}(\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2)]\dot{x}_2^2 + (\cos(x_1) + \cos(x_2))\sin(x_2) \end{cases}$$

В консервативном случае при малой энергии движение в фазовом пространстве происходит на сетке, образованной двумя семействами параллельных линий, которые определяются из минимума потенциала. Из-за наличия ненулевой энергии поперечных колебаний при проходе узлов сетки может происходить переход с одной линии на другую с блужданием, аналогично блужданию на "паутине Заславского". Кроме того в конфигурационном пространстве возможны "пролеты", т.е. длинные почти прямолинейные участки траекторий.

В случае диссипативной системы можно заметить возникновение большого количества сосуществующих аттракторов, представленные в виде предельных циклов (рис.1). При вариации μ изменяется их форма, а также увеличиваются области, отвечающие "пролетным" траекториям.

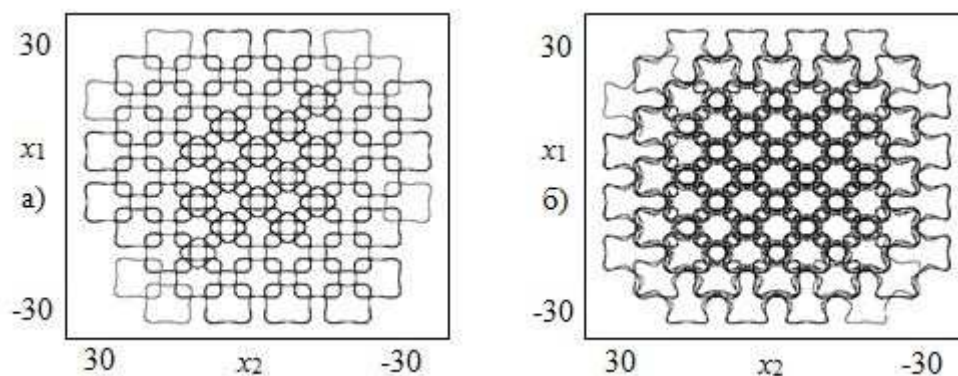


Рис. 9: Рис.1. Конфигурационное пространство системы (2) при $\nu=5$ и различных значениях диссипации: а) $\mu=0.1$; б) $\mu=0.4$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ € 15-02-02893.

1. Т. J. Hunt, Ph.D. thesis, University of Cambridge, 2000.
2. С.П. Кузнецов. Хаос в системе трех связанных ротаторов: от динамики Аносова к гиперболическому аттрактору. Известия Саратовского университета - Новая серия. Серия Физика. 15, 2015, N2, 5-17

Границы стохастического и хаотического подходов в оценке параметров движений

Филатова Д.Ю., Еськов В.В., Стрельцова Т.В., Алиев Н.Ш.

БУ ВО «Сургутский государственный университет», Сургут

С позиций недавно открытого нового эффекта Еськова-Зинченко, доказывающего хаотическую динамику не только тремора и теппинга, но и любых двигательных актов в психологии, демонстрируется граница стохастического и хаотического подходов. Эта граница начинается с хаоса статических функций $f(x)$ распределения выборок треморограмм и теппинграмм. Одновременно показывается отсутствие возможностей применения теории динамического хаоса в оценке изменения психического гомеостаза по параметрам тремора. Сейчас становится очевидным, что использование статистических методов в анализе тремора и теппинга наталкивается на серьезные трудности [1, 2]. Они связаны с непрерывным хаотическим изменением выборок, которые получаются при регистрации подряд треморограмм (ТМГ), теппинграмм и других движений, что лежит в основе нового эффекта Еськова-Зинченко. В рамках этого эффекта, его количественного представления, возникает глобальная проблема идентификации границ применимости методов и моделей стохастики в описании движений.

Наряду с этой базовой проблемой в психологии и психофизиологии возникает проблема объективной количественной оценки реакции психики человека (и ее проявления в виде различных двигательных реакций) в ответ на различные стрессорные воздействия. Последние годы эта проблема резко возросла из-за создания новой теории хаоса-самоорганизации и появления эффекта Еськова-Зинченко [1, 2]. Многократные повторы регистрации треморограмм у одного и того же человека демонстрируют хаотический калейдоскоп статистических функций распределения $f(x)$, их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и автокорреляций $A(t)$. Нет статистической устойчивости ни $f(x)$, ни АЧХ, ни $A(t)$ для подряд получаемых выборок ТМГ [1, 2].

Все статистические характеристики непрерывно изменяются, но если построить матрицы парных сравнений получаемых подряд выборок ТМГ (в условиях гомеостаза), то наблюдается характерная статистическая закономерность: имеется статистическая устойчивость числа пар k выборок, которые можно отнести к одной генеральной совокупности. В наших многочисленных экспериментах 12-ть человек подряд регистрировали по 5 секунд ТМГ Ц с помощью разработанной и зарегистрированной установки. Каждый испытуемый выполнил по 15-ть измерений ТМГ, а всего было выполнено 15-ть серий таких испытаний. Общее число выборок ТМГ в этом случае составило 225. Результаты расчетов k показали их параметрическое распределение для 15-ти серий экспериментов. Изменение гомеостаза (стресс, музыка, физическая нагрузка) приводило к изменению k .

1. Филатов М.А., Веракса А.Н., Филатова Д.Ю., Поскина Т.Ю. *Сложность. Разум. Постнеклассика* **1** (2016)
2. 2. Eskov, V.M., Eskov, V.V., Vochmina, J.V., Gavrilenko, T.V. *Moscow University Physics Bulletin* **2** (2016)
3. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия* **2** (2015)

Оценка размеров низкочастотных предшественников различных типов ритмической активности в нейронном ансамбле крыс линии WAG/Rij

Харченко А.А., Храмов А.Е., Грубов В.В., Ситникова Е.Ю

*Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А, Саратов*

Институт Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН, Москва

В настоящее время исследование синхронных режимов и формирование пространственных структур в сложных сетях является одной из важных проблем современной физики, биофизики, нелинейной динамики [1]. На сегодняшний момент вызывают значительный интерес задачи, связанные с диагностикой синхронных режимов в нейронных сетях головного мозга, которые представляют большой интерес для исследований патологической активности, в частности, эпилептической.

В настоящей работе будет рассмотрен вопрос об оценке размеров популяций нейронного ансамбля крыс линии WAG/Rij и показан анализ ритмов различных паттернов до и после пик-волнового разряда и предшествующих сонным веретенам [2]. Экспериментальный интегральный сигнал [3] анализировался с помощью непрерывного вейвлет-преобразования с использованием комплексного вейвлета Морле [4]:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{j\omega_0\eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}}, \quad (1)$$

где центральная частота была выбрана равной $\omega_0 = 2\pi$

Наряду с анализом пик-волновых разрядов была рассмотрена и проведена оценка размеров популяций сонных веретен относительно предшествующим им паттернам на ЭЭГ. Также на вейвлетных спектрах, построенных с помощью материнского вейвлета морле, анализировались события, форма которых была близка к форме сонных веретен [4], но частоты лежали в более низкочастотной области 5-9 Гц. Анализ данных интегральных сигналов и вейвлетных поверхностей построенным по ним показал, что частоты предшественников сонных веретен лежат в области $3 \div 5$ Гц, а относительный размер нейронного ансамбля, участвующего в формировании активности предшественника в среднем $65 \div 75\%$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-52-45003 ИНД_а).

1. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization: a Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
2. van Luijckelaar G., Hramov A.E., Sitnikova E.Yu., et al Spike-wave discharges in WAG/Rij rats are preceded by delta and theta precursor activity in cortex and thalamus. *Clinical Neurophysiology* **122**, (2011) 687-695
3. Hramov A.E., Harchenko A.A., Makarov V.V. et al Analysis of the characteristics of the synchronous clusters in the adaptive Kuramoto network and neural network of the epileptic brain *Proc. SPIE*. **9917**, (2016) 991725
4. Hramov, A. E., Koronovskii, A. A., Makarov, V. A., et al Wavelets in Neuroscience. Springer, Berlin. Heidelberg., 2015

Исследование конфиденциальности хаотической системы передачи информации на генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки

Хорев В.С.¹, Караваев А.С.^{1,2}, Пономаренко В.И.^{1,2}, Прохоров М.Д.²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов;

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов.

Открытие возможности синхронизации нерегулярных колебаний положило начало использованию хаотических колебаний в качестве носителей информационных сообщений [1]. Тематика синхронизации хаотических колебаний получила дальнейшее развитие во многих работах. Интерес к системам с хаотической несущей связан с возможностью организации скрытой (конфиденциальной) связи [2]. При соответствующем выборе способа внесения информации восстановление полезной составляющей сигнала может быть произведено даже в случаях, когда уровень хаотической несущей находится ниже уровня шумов, что означает возможность сокрытия не только самой информации, но и самого факта ее передачи, что в ряде задач имеет первостепенное значение.

В качестве объекта исследования была взята система передачи информации на генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки, которая может быть описана следующим уравнением:

$$\dot{x}(t) = -x(t) + f(x(t - (\tau_1 + m(t)\tau_2))), \quad (1)$$

где x — переменная состояния генератора, τ — время запаздывания, ε — параметр, характеризующий инерционные свойства системы, $f(x)$ — нелинейная функция. В качестве нелинейной функции была использована квадратичная функция $f(x) = \lambda - x^2$, где λ — параметр нелинейности.

В случае использования бинарной последовательности, состоящей из нулей и единиц, в качестве информационного сигнала $m(t)$, в кольцевом генераторе с запаздыванием (1) происходит изменение времени задержки. То есть, информационный сигнал изменяет параметры передатчика и определяет свойства хаотического сигнала, передаваемого в канал связи. В интересах конфиденциальности передачи данных генерируемые участки ряда для нуля и единицы должны обладать сходными спектральными и статистическими свойствами.

В работе с помощью расчета корреляционных и спектральных характеристик было проведено восстановление информационной последовательности при различных значениях управляющих параметров системы, а также исследовано влияние свойств несущей сигнала на возможность третьей стороны декодировать исходное информационное сообщение.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-12-00324.

1. Pecora L.M., Carrol T.L. *Phys. Rev. Lett.* **64** (1990) P. 821-824.

2. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *УФН* **179** (2009) С. 1281-1310.

Дифракция магнитостатической волны на обрыве планарного ЖИГ волновода при различных углах намагничивания

Хутиева А.Б., Ревин И.Е., Садовников А.В., Бегинин Е.Н.

СарГУ, Саратов

В настоящее время нерегулярные планарные ферритовые волноведущие структуры представляют большой интерес [1]. Такие структуры могут быть использованы как базовые элементы для создания различных элементов магнанных сетей: волноводов, интерферометров, мультиплексоров, фильтров и ответвителей [1]. Вследствие анизотропии тонкопленочных ферритовых структур становится возможным управлять направлением распространения магнитостатических волн (МСВ) путем структурирования магнитного материала на подложке.

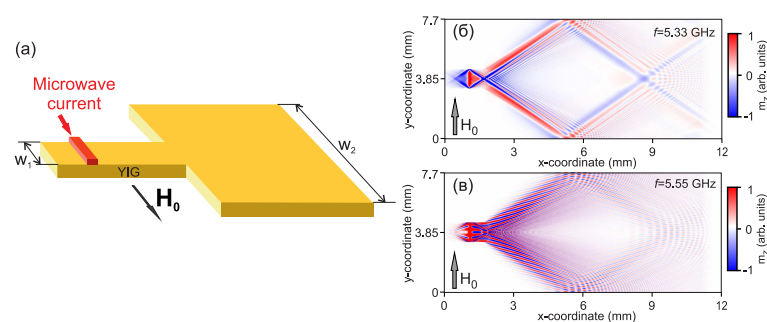


Рис. 10: Схема исследуемой структуры (а) и распределение компоненты намагниченности m_z на частотах входного сигнала $f = 5.33$ ГГц (б) и $f = 5.55$ ГГц (в).

В данной работе исследовано распространение и отражение поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) в нерегулярной структуре, представляющей собой обрыв планарного микроволновода, изготовленного из тонкой пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) (рис. 1а). Толщина пленки ЖИГ составляла 10 мкм, ширина узкой части нерегулярной структуры 1.2 мм, широкой части 7.7 мм, $M_0 = 139$ Гс — намагниченность насыщения пленки ЖИГ. Величина внешнего постоянного магнитного поля составляла 1220 Э. Экспериментально методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии показаны режимы дифракции ПМСВ в случае изменения частоты входного сигнала. Проведено численное решение методом конечных разностей во временной области [2] задачи о возбуждении и распространении ПМСВ в нерегулярной магнитной микроструктуре. На рис. 1 б,в приведены результат расчета распределения m_z компоненты намагниченности на частотах входного сигнала $f = 5.33$ ГГц и $f = 5.55$ ГГц. Результаты численного моделирования находятся в хорошем соответствии с данными экспериментального исследования.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-37-00217, 16-37-60093, 16-02-00789) и стипендии (СП-313.2015.5) и гранта (МК-5837.2016.9) Президента РФ.

1. Sheshukova S., Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S. *IEEE Magn. Lett.* **5** (2014)
2. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. *AIP Advances* **4** (2014)

Образование аттракторов в системе фазовых уравнений с симметрией при ее нарушении

Чекмарева А.Ж., Кузнецов А.П., Савин А.В.

СГУ, Саратов

В работе рассмотрена цепочка связанных фазовых осцилляторов. Уравнения, описывающие данную диссипативную систему, являются обратимыми во времени и инвариантными относительно некоторого преобразования пространственных координат. Хорошо известно [1,2], что если система уравнений обладает такими свойствами, то динамика решений такой системы может быть консервативной относительно некоторого инвариантного множества. В частности, рассмотрим систему из цепочки связанных фазовых осцилляторов [3], имеющую следующий вид:

$$\dot{\psi}_k = \Delta_k + \varepsilon f(\psi_{k-1}) + \varepsilon f(\psi_{k+1}) - 2\varepsilon f(\psi_k), \quad (1)$$

где ψ_k разность фаз между соседними осцилляторами и $f(\psi)$ функция связи между осцилляторами. Для случая, когда функция связи представляет собой сумму нечетных Фурье-гармоник, тогда для такой системы симметричное многообразие примет вид: $\psi_k \rightarrow \pi - \psi_{n-k}$, и функция связи вида: $f(\psi) = \sin \psi + A \sin 3\psi$. В функцию связи такой системы была добавлена четная гармоника вида: $f(\psi) = \sin \psi + (A - d) \sin 3\psi + d \sin 2\psi$ где параметр d управляет степенью нарушения симметрии.

Для описанной выше системы было построено сечение Пуанкаре плоскостью $\psi_2 = \pi/2$. На фазовой плоскости переменных (ψ_1, ψ_3) были найдены неподвижные точки для различных значений параметра связи ε и амплитуды четной гармоники d .

Аттракторами в такой системе являются циклы различных периодов, причем порядок периодов увеличивается с увеличением значения параметра ε . На узком интервале параметра d при значении параметра $\varepsilon = 0,35$ сосуществуют 5- и 6-циклы. Построение устойчивых и неустойчивых многообразий седловых циклов выявило существование гетероклинических структур на фазовой плоскости. Также обнаружено существование инвариантной кривой и странного аттрактора при различных значениях параметров ε и d . Были построены бассейны притяжения периодических и непериодических аттракторов. В результате чего обнаружено, что границы бассейнов периодических и непериодических аттракторов сильно изрезаны и переплетаются между собой. Проведен анализ динамики исследуемой системы при помощи ляпуновских показателей. Исследована зависимость ляпуновских показателей от параметра d , характеризующего степень нарушения симметрии. Обнаружено, что сумма ляпуновских показателей монотонно убывает с увеличением этого параметра. В то же время зависимость старшего ляпуновского показателя имеет весьма сложный характер, демонстрируя области как положительных, так и отрицательных значений. Такое поведение свидетельствует о том, что при нарушении симметрии происходит довольно сложная перестройка структуры фазового пространства системы, сопровождаемая как бифуркациями существующих аттракторов (например, рождения резонансных циклов на инвариантной кривой), так и их кризисами.

1. Lamb, J.S. W. and Stenkin, O.V. //Nonlinearity, 2004, vol.17, no.4, p. 1217.
2. Delshams, A. et al. //Nonlinearity, 2013, vol.26, no.1, p. 1
3. D. Topaj, A. Pikovsky. //Physica D, 170 (2002), p.118

Возникновение многочастотных режимов в динамике широкоапертурного лазера

Шакиров А.Р., Кренц А.А., Чертовских Р.А., Анчиков Д.А.

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва, Самара

В работе численно исследованы режимы динамики выходного излучения широкоапертурного лазера. Модель лазера описывается с помощью полной самосогласующейся системы уравнений Максвелла-Блоха (МБ), описывающих пространственно-временную динамику лазера с одной продольной модой в случае плоскопараллельных зеркал. Управляющим параметром выступал параметр накачки.

Известно, что при изменении параметров модели возможна потеря устойчивости режима стационарной пространственно-однородной генерации. Для моделирования была выбрана область параметров, в которой реализуется коротковолновая неустойчивость. Для значений параметра накачки в интервале от 1 до 230, вычислены аттракторы динамической системы из уравнений одномерной модели Максвелла-Блоха с условиями периодичности по пространству для электрического поля, поляризации и инверсии населенности. Для определения границ устойчивости аттракторов использовался метод продолжения по параметру. Для численного решения задачи использовался псевдоспектральный метод Фурье с удалением ошибки ложного представления и метод экспоненциального дифференцирования Рунге-Кутты третьего порядка.

При увеличении параметра накачки выше первого порога генерации, единственным аттрактором системы является стационарное решение, не зависящее от пространственной координаты. Стационарные решения теряют устойчивость при превышении второго порога генерации. Аттрактором системы становится нестационарный режим с двумя несоизмеримыми временными частотами и периодическое возмущение бегущей волны. В следующих бифуркациях, устойчивыми становятся решения с тремя, а затем и с четырьмя независимыми временными частотами. Затем появлялись хаотические аттракторы. Обнаружены интервалы значений параметра, где сосуществуют устойчивые двумерные и трехмерные торы, а также интервал, где сосуществуют три аттрактора с тремя независимыми временными частотами, но с разной пространственной структурой.

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ по Программе повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013-2020 гг. и Государственному заданию вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект 1451, НИР «ГР 114091840046, РФФИ (грант 16-32-60151 мол_а_дк).

1. Louvergneaux E., Papoff F., D'Alessandro G., Glorieux P. Average patterns and coherent phenomena in wide aperture lasers *Phys. Rev. E* **69** (2004) 066212
2. Кренц А.А., Молевич Н.Е. Каскад бифуркаций удвоения тора в лазере с отстройкой частоты *Квантовая электроника* **39** (2009) С. 751-756
3. Кренц А.А., Молевич Н.Е. Пространственно-временная динамика поперечного профиля оптического поля в лазере с отстройкой частоты *Компьютерная оптика* **34** (2010) С. 525-530
4. Кренц А.А., Молевич Н.Е. Рождение устойчивого тора из замкнутой особой кривой и его бифуркации в лазерной системе с отстройкой частоты *Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика* **5** (2010) С. 68-79

Переход к порядку-беспорядку в пространственно распределенном стохастическом брасселяторе

Курушина С.Е., Шаповалова Е.А., Шаповалова Ю.А.

Самарский университет, Самара

Для модели автокаталитической химической реакции брасселятор с пространственно коррелированным мультипликативным шумом в приближении среднего поля [1] получено двумерное нелинейное самосогласованное уравнение Фоккера-Планка в интерпретации Стратоновича [2].

В результате численного интегрирования полученного уравнения найдены различные типы решений, зависящие от значений интенсивности шума. При небольших интенсивностях система находится только в упорядоченном состоянии, что соответствует одномерной плотности распределения вероятностей. Дальнейшее увеличение значений интенсивности шума приводит к тому, что в упорядоченной фазе появляется разупорядоченная, то есть появляется временная бимодальность. При еще больших значениях интенсивности наблюдается многократное чередование упорядоченной и разупорядоченной фаз - перемежаемость фаз. При этом происходит многократное возникновение и исчезновение бимодальности. Статистически стационарное состояние не устанавливается. Статистические характеристики изменяются периодически. При возрастании интенсивности внешнего шума максимумы дисперсий и разность максимумов и минимумов увеличиваются. Период изменения дисперсий при этом уменьшается. Зависимости приобретают вид, похожий на релаксационные колебания. Это объясняется тем, что при увеличении интенсивности шума возрастает роль квадратичной нелинейности, заложенной в обобщенных коэффициентах диффузии. Также уменьшается период изменения средних и наиболее вероятных значений. Это означает, что времена жизни упорядоченного и разупорядоченного состояний уменьшаются, и они все чаще сменяют друг друга. Иными словами, наблюдается все более частая перемежаемость упорядоченной и разупорядоченной фаз. Далее, начиная с некоторого значения интенсивности шума, возникает беспорядок.

Таким образом, подробное изучение статистических характеристик исследуемой системы в приближении среднего поля, позволило определить сценарий ее перехода от упорядоченного состояния к разупорядоченному.

1. Kurushina S.E., Maximov V.V., Romanovskii Yu.M. *Phys. Rev. E* **90** (2014) 022135
2. Курушина С.Е., Громова Л.И., Шаповалова Е.А. *Изв. вузов "ПНД"* **22** (2014) 27-42

Дефектные моды в связанных магнитных кристаллах

Бегинин Е.Н., Шараевская А.Ю.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

В настоящее время большой интерес вызывают периодические структуры микронных или субмикронных размеров, сформированные на поверхности ферромагнитных пленок и магнитных кристаллов (МК) [1]. В таких кристаллах могут распространяться магнитостатические волны различных типов (объемные и поверхностные).

В настоящей работе рассматриваются дефектные моды в двух латерально- связанных МК с нарушенной трансляционной симметрией. МК представляют собой волноводы с периодическими системами канавок, сформированных на поверхностях ферритовых пленок. В волноводах могут распространяться поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ), связь между волнами в различных МК осуществляется только в области дефектов. Дефекты МК формируются в виде участков ферритовой пленки с постоянной толщиной d и заданной длиной L_d . Рассматриваемую систему связанных МК можно представить в виде 4-портового функционального элемента у которого связь между амплитудами падающих, отраженных и прошедших ПМСВ описывается через матрицу передачи T размером 4×4 [2]. В работе построена матрица передачи T , учитывающая связь распространяющихся волн в области дефектов. На рис.1 приведена зависимость коэффициента прохождения ПМСВ от входа одного МК к его выходу при наличии связи с другим МК. Видно, что в области первой брэгговской запрещенной зоны присутствуют две дефектные моды. В работе исследованы зависимости частотной расстройки, центральных частот и максимумов коэффициентов прохождения дефектных мод от коэффициентов связи и геометрии дефектов. Полученные результаты могут быть использованы для создания управляемых устройств магноники и элементов спин-волновой логики.

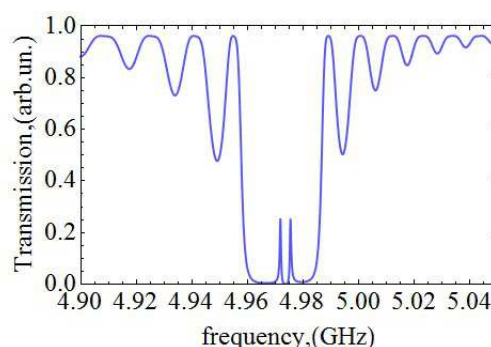


Рис. 11: Коэффициент прохождения ПМСВ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант $\epsilon 16-19-10283$).

1. Nikitov S.A., Tailhadesand Ph., Tsai C.S., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. **236** (2001) 320Ц330
2. Grishin S.V., Beginin E.N. Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 022408

SPICE-модели нейронов, допускающие построение сетей с полносвязной топологией

Дрогайцева О.В., Мантуров А.О.

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

В последнее время пристальное внимание исследователей обращено на вопросы изучения поведения нейронов и нейронных сетей. Такие исследования в настоящее время опираются, в основном, либо на проведение численного эксперимента, либо на натурные эксперименты с живыми системами. Возможности изучения коллективного поведения нейронных ансамблей в указанных подходах ограничены, с одной стороны, сложностью искусственного управления параметрами, введением сигналов воздействия и длительным поддержанием живой системы в функциональном состоянии, в случае натурных экспериментов, и невозможностью использования достаточно сложных и адекватных численных моделей единичных нейронов в случае численных экспериментов.

Таким образом, актуальным видится создание некоторого класса моделей, технически приемлемых для построения сетей с произвольной топологией и допускающих имплементацию в виде функционально законченных электронных схем, основанных на современной элементной базе.

Для упрощения задачи моделирования нейронов в задаче построения указанных моделей был использован симулятор произвольных электронных схем, основанный на устойчивом SPICE-алгоритме. Интересно отметить, что симуляторы, использующие алгоритм SPICE, являются в настоящее время весьма популярными и для моделирования процессов, происходящих в живых организмах [1]. В настоящей работе для моделирования динамики схмотехнической имитации нейрона использована разновидность симулятора LTspice [2], ориентированного на моделирование электронных схем с импульсными и быстропротекающими процессами.

В рамках настоящей работы проведено построение и численное моделирование схмотехнических реализаций моделей нейронов, основанных на моделях ФитцХью-Нагумо и Розе-Хиндмарш [3]. Предложенные решения базируются на структуре «интегрирующий конденсатор–управляемый источник тока» и допускают расширение до произвольно сложной топологии модели.

Кроме того, предложены схмотехнические решения, реализующие произвольную коммутацию сигналов нейронов по схемам «один выход–много входов» и «один вход–много выходов», с возможностью произвольного изменения веса сигналов. Указанные решения также обеспечивают электронное управление весами сигналов с характерными значениями управляющих напряжений в диапазоне выходных сигналов нейронов.

Все предложенные в работе схмотехнические решения не являются энергоемкими и могут быть реализованы в микроинтегральном исполнении на современных технологических стандартах вплоть до 28 нм включительно.

1. Edwin R. Lewis. *BioSystems* **34** (1995) 47-63
2. <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>
3. Glass L., Mackey M.C. *From Clocks to Chaos: The Rhythms of Life*. Princeton University Press, 1988.

Дисперсионные характеристики медленных электромагнитных волн в структуре феррит-полупроводниковая решетка

Костюк А.В., Бегинин Е.Н., Садовников А.В.

СарГУ, Саратов

В настоящее время интенсивно исследуются массивы латерально-связанных волноводов как в оптическом так и в микроволновом диапазонах электромагнитных волн. На их основе реализуются управляемые пространственные линейные и нелинейные волноводные переключатели в системах пространственной обработки информационных сигналов. Развитие технологий выращивания высококачественных тонких ферритовых пленок на полупроводниковых подложках вызвало новый интерес к исследованию волновых процессов в феррит-полупроводниковых структурах с целью получения управляемых устройств обработки сигналов. В данной работе проведен расчет электродинамических характеристик структур содержащих тонкие ферритовые слои с полупроводниковыми решетками [1-3]. При расчете использовались граничные условия для идеальных электрических стенок (сверху и снизу) и периодические граничные условия Флоке для компонент электрических полей для боковых стенок. На рис.1 представлены расчеты дисперсионных характеристик замедленных электромагнитных волн для различных величин концентрации электронов в полупроводнике.

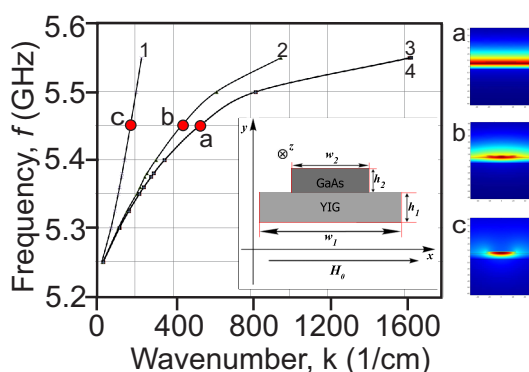


Рис. 12: Дисперсионные характеристики и схема исследуемой структуры (на врезке)

В результате проведенных исследований показано, что дисперсионная характеристика волн определяется концентрацией носителей заряда в полупроводнике. При малых концентрациях она совпадает с волной Деймона - Эшбаха, при больших концентрациях, близких к металлу, она совпадает с дисперсией металлизированной с одной стороны ферритовой плочки. Исследован спектр дисперсионных характеристик поверхностных волн, распространяющихся под различными углами относительно решетки.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-29-03120 офи-м, 16-37-60093) и стипендии (СП-313.2015.5) и гранта (МК-5837.2016.9) Президента РФ.

1. А.С. Киндяк *ЖТФ*. **348** (1999)
2. А.С. Киндяк *Письма в ЖТФ*. **348** (1995)
3. И.Г. Кудряшкин, Ю.К.Фетисов *Письма в ЖТФ*. **348** (1989)

Гиперхаотическая динамика и управление ею в цепочках и решетках ридберговских атомов

Андреев А.В., Москаленко О.И., Короновский А.А., Храмов А.Е.

СарГУ, Саратов; СГТУ, Саратов

В настоящие дни значительный интерес вызывают задачи управления квантовыми системами с ридберговскими атомами в связи с тем, что подобные задачи имеют тесную связь с проблемой создания квантовых компьютеров [1]. Ридберговские атомы - это водородоподобные атомы, внешний электрон в которых находится в высоковозбужденном состоянии, вплоть до уровней порядка 1000. Данные объекты представляют в настоящее время особый интерес [2], потому что они могут быть использованы в квантовом контроле одного атома другими благодаря ридберговским (высоковозбужденным) состояниям. Волновые функции атомов в основном состоянии не превышают значения 0.1 нм, в то время как в ридберговском состоянии они достигают нескольких нанометров и даже выше. Это позволяет атомам, находящимся достаточно далеко для того, чтобы не взаимодействовать друг с другом, находясь в основном состоянии, сильно взаимодействовать в возбужденных состояниях [3].

Значительный интерес вызывает задача возникновения хаотической динамики в квантовой системе. Эта задача также имеет прикладное значение для решения проблемы квантовых вычислений в массиве атомов, включенных в твердое тело, принимающих ридберговское состояние [4].

Также системы с ридберговскими атомами являются перспективными для хранения и передачи информации. В связи с этим является перспективной задачей анализ методик подавления хаотической динамики в таких системах, т.к. хаос будет разрушать все хранимую или передаваемую через систему информацию.

В данной работе нами было проведено исследование замкнутых цепочек из 2 - 100 ридберговских атомов и решеток из 9 атомов. В них были обнаружены области хаоса и гиперхаоса, характеризующегося разным числом положительных ляпуновских показателей. При увеличении числа атомов в цепочке был обнаружен линейный рост числа положительных показателей Ляпунова. Также для гиперхаоса были рассчитаны спектры мощности, которые, начиная с некоторого числа атома, перестают меняться, при увеличении числа атомов. В данной работе предложено объяснение этого явления.

В качестве подавления гиперхаотической динамики в замкнутых цепочках ридберговских атомах было применено введение внешнего параметрического воздействия. В результате этого были обнаружены области управляющих параметров, при которых в системе наблюдалось подавление гиперхаоса и установление периодических колебаний.

Работа поддержана РФФИ (грант 15-32-20299).

1. Lukin M.D. et al. *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 2208
2. Greenland P.T. et al. *Nature* **465** (2010) 1057-1061
3. Schwarzschild B. *Phys. Today* **62** (2009) 15-18
4. Saffman M. and Walker T.G. *Reviews of Modern Physics* **82** (2010) 2313

Последовательная активность в ансамбле из элементов Фитцхью-Нагумо

Коротков А.Г., Казаков А.О., Осипов Г.В.

ННГУ, Нижний Новгород

В нашей работе исследуется модель сети из двух возбуждающе связанных элементов Фитцхью-Нагумо с простой связью между ними, зависящей от полярного угла изображающей точки на фазовой плоскости другого элемента. Данная связь имеет 2 параметра, которые задают начало активации следующего элемента и длительность активации. В фазовом пространстве модели были обнаружены режимы синфазной и противофазной активности элементов, причём области существования этих режимов на области параметров пересекаются. Устойчивый предельный цикл, соответствующий противофазному режиму, разрушается следующим образом. Сначала с ним происходит бифуркация "вилка" а затем с каждым из двух образовавшихся устойчивых предельных циклов происходит каскад бифуркаций удвоения периода и возникают 2 странных аттрактора по сценарию Фейгенбаума, которые объединяются в один при дальнейшем увеличении параметра. В работе представлена бифуркационная диаграмма на плоскости параметров.

Исследование характеристик индуцированной шумом перемежаемости в мультистабильных системах на примере осциллятора Дуффинга

Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е.

ФГБОУ ВО "Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского", Саратов

Одним из фундаментальных явлений в физике является мультистабильность: ее можно наблюдать почти во всех областях науки и техники, в том числе в электронике [1], оптике [2], механике [3] и биологии [4]. При этом, для диссипативных систем мультистабильность означает одновременное существование нескольких возможных конечных устойчивых состояний (аттракторов) при фиксированном наборе значений параметров системы. Устойчивое состояние, к которому будет стремиться система, зависит от начальных условий, т.е. долгосрочная динамика системы, соответствующая одному из устойчивых состояний, определяется ее начальными условиями.

Необходимо отметить, что область сосуществования многих устойчивых состояний является критической, так как малый шум или любое другое внешнее возмущение может привести к переключению системы из одного устойчивого состояния в другое, что, в свою очередь, может привести к появлению индуцированной шумом перемежаемости. Существование такого типа перемежающегося поведения было продемонстрировано достаточно давно, и в настоящее время существует большое количество научных работ, связанных с изучением данного типа перемежаемости [5, 6]. Тем не менее, в настоящий момент времени остается нерешенным вопрос, связанный с детальным пониманием процессов, происходящих в мультистабильных системах при воздействии на них шумов, и теоретическим описанием возникающего при этом перемежающегося поведения. В частности, в настоя-

ций момент времени не существует общей теоретической модели, описывающей данный тип поведения.

Настоящая работа посвящена разработке теоретической модели, описывающей индуцированное шумом перемежающееся поведение в мультистабильных системах. В рамках данной работы предложенная теоретическая модель прошла апробацию на примере простой модельной системы, демонстрирующей индуцированную шумом перемежаемость, — осцилляторе Дуффинга, имеющем два устойчивых положения равновесия. В отсутствие шума при заданных начальных условиях исследуемая система приходит к одному из устойчивых состояний, в дальнейшем не покидая его. Однако, если в данную систему добавить шум, то при определенных значениях амплитуды шума можно будет наблюдать, что система будет перескакивать из одного устойчивого состояния в другое, то есть, в системе будет реализовываться перемежаемость, индуцированная шумом.

В рамках настоящей работы проведено численное моделирование осциллятора Дуффинга с внешним шумовым воздействием, получены статистические характеристики данного типа перемежаемости (распределение длительностей ламинарных участков поведения при фиксированных значениях управляющих параметров), проведено их сопоставление с разработанной теоретической моделью, получено хорошее соответствие теории с численным моделированием.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты N 15-32-20299, N 16-32-60078).

1. Maurer J. Libchaber A. *J. Phys. Lett.* (1980) V.41. P.515–L518.
2. Brun E. et. al. *Opt. Soc. Amer.* (1985) B.2 P.156–167.
3. Thompson J.M.T. Stewart H.B. *Nonlinear Dynamics and Chaos*, Wiley, Chichester, (1986)
4. Foss J. et. al. *Phys. Rev. Lett.* (1996) V.76 P.708–711.
5. Atteneave F. *Sci. Am.* (1971) V.225 P.63–71.
6. Grebogi C. et. al. *Phys. Rev. Lett.* (1983) V.50 P.935–938.

Исследование синхронизации, возникающей при взаимодействии симметричных структур в гипоталамусе грызунов, находящихся под действием общей анестезии

Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е.

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Саратов

В настоящее время все больше внимание исследователей уделяется изучению активности головного мозга [1, 2]. Такой интерес связан, в первую очередь, с желанием понять фундаментальные принципы функционирования головного мозга, а также с возможностью применения полученных знаний для создания интерфейсов мозг-машина. Стоит отметить, что над решением этой сложнейшей междисциплинарной задачи в настоящее время работают многочисленные научные коллективы и частные компании (например, Google и Honda). Тем не менее, для реализации столь амбициозной проблемы необходимо понимать общие фундаментальные процессы, происходящие в головном мозге при решении

различного рода задач. Одной из таких задач, является задача когнитивного поведения живого субъекта в реальном мире. Известно, что в мозге млекопитающих эта функция контролируется нейронной активностью в гипоталамусе. Таким образом, возникает достаточно интересный вопрос, связанный с изучением осцилляторной активности нейронных ансамблей в гипоталамусе с использованием фундаментальных подходов нелинейной динамики.

В рамках настоящей работы в качестве объекта исследований выступали грызуны, находящиеся в состоянии покоя (под действием общей анестезии). В настоящей работе была рассмотрена электрическая активность, наблюдающаяся в правом и левом гиппокампах крыс, с использованием непрерывного вейвлетного преобразования с комплексными базами [3, 4]. При рассмотрении динамики взаимодействия кортико-гиппокампальных сетей были выявлены особенности, характерные для мозговой активности в том случае, когда животное не решает когнитивные навигационные задачи. Установлено, что в исследуемой системе реализуется перемежающееся поведение. С использованием метода выделения ламинарных и турбулентных участков поведения, описанного в работе [5], было проведено статистическое исследование данного типа перемежаемости. При этом, были получены распределения длительностей интервалов синхронного поведения между генераторами локальных полевых потенциалов правой и левой части гиппокампа грызунов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-32-00181) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (проект МК-4574.2016.2).

1. Buzsaki G., Draguhn A. *Science* (2004) V.304. P.1926;
2. Rabinovich M I et al. *Rev. Mod. Phys.* (2006) **78** P.1213].
3. Torresani B., Continuous Wavelet Transform, Savoire, Paris, 1995
4. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, (2003)
5. Журавлев М.О. и др. *Письма в ЖТФ.* (2010) В.36 N10 С.31–38

Динамические эффекты химических тормозящих связей в малых ансамблях

Леванова Т.А., Осипов Г.В.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

Химическая синаптическая связь представляет собой направленную передачу электрического импульса (воздействия) от одного нейрона к другому с помощью химического вещества (нейромедиатора) [1]. Нейрон, который оказывает воздействие, называется пресинаптическим, а нейрон, на который оказывается воздействие, называется постсинаптическим. Ключевые свойства химической синаптической связи можно сформулировать следующим образом: (i) активность постсинаптического элемента присутствует либо отсутствует в зависимости от уровня активности пресинаптического элемента, и (ii) все взаимодействия между элементами являются инерционными из-за присутствия химических процессов высвобождения и связывания нейромедиатора. В зависимости от скорости этих химических процессов связи делятся на быстрые (слабоинерционные, в природе отвечают

за восприятие, движение и речь) и медленные (сильноинерционные, связаны со сложными состояниями нервной системы, такими как эмоции, настроение, мотивации, формирование памяти). По типу воздействия синаптическая связь может быть возбуждающего или тормозящего типа. При возбуждающей связи активный нейрон активирует другой (неактивный) нейрон. При тормозящей связи активный нейрон подавляет (частично или полностью) активность другого нейрона.

В данной работе на основе непрерывных и дискретных многомерных математических моделей [2-4] минимальных ансамблей связанных нейроноподобных элементов исследовано влияние химических быстрых и медленных тормозящих связей на динамику ансамбля. С помощью аналитических и численных методов показано, что введение химических тормозящих связей приводит в зависимости от соотношения сил связей либо к возникновению в системе режима последовательной активности (случай сильной асимметрии связей), либо к ситуации, когда один элемент подавляет активность остальных (случай сильных симметричных связей). Показано, что перечисленные типы активности, а также математические образы, лежащие в их основе, и сценарии перехода между ними являются универсальными для целого класса систем. Показано, что введение параметра, характеризующего скорость тормозящей связи не вносит качественных изменений в динамику системы.

1. Nicholls J.G. et al. From Neuron to brain. 5th ed. Sinauer Associates, 2011.
2. Levanova T.A., Komarov M.A., Osipov G.V. EPJ ST. 2013. V.222(10) . P. 2417.
3. Mikhaylov A.O., Komarov M.A., Levanova T.A., Osipov G.V. Europhys. Lett. 2013. V. 101(2). P. 20009.
4. Levanova T.A., Kazakov A.O., Osipov G.V., Kurths J. Eur. Phys. J. Special Topics. 2016. V. 225. P. 147.

Исследование возможностей методов на базе искусственных нейронных сетей и метода главных компонент для классификации состояний мозга по данным ЭЭГ

Мусатов В.Ю., Пчелинцева С.В., Руннова А.Е., Дыкин В.С.

СГТУ, Саратов

В настоящее время динамика головного мозга человека привлекает к себе пристальное внимание исследователей естественных и гуманитарных наук [1, 2]. Исследование различных аспектов функционирования головного мозга человека обычно основывается на объективных данных, регистрируемых в ходе психо-физиологических и когнитивных экспериментальных работ. Среди широко используемых сегодня неинвазивных методов регистрации сигналов головного мозга человека можно выделить электроэнцефалографию (ЭЭГ), магнитоэнцефалографию, различные виды магнитно-резонансной томографии и прочее. Все эти методы обладают как своими достоинствами, так и недостатками и активно используются в различного рода экспериментах. Однако, наиболее удобным и дешевым методом регистрации сигналов головного мозга в когнитивных исследованиях на сегодня остается запись ЭЭГ. Современная регистрация многоканальной ЭЭГ может вестись на

протяжении более, чем 1–2 суток и является достаточно точным методом оценки изменения динамики головного мозга (по большей части, коры головного мозга) [3]. Настоящий доклад посвящен исследованию возможностей таких способов кластеризации сложных данных, как метод главных компонент (МГК) и методы на базе искусственных нейронных сетей (ИНС) для классификации состояний мозга по данным ЭЭГ.

Идея МГК заключается в трансформации входного вектора данных с размерностью $D = n$ на новый вектор, состоящий из взаимно-ортогональных компонент и обладающий меньшей размерностью $D_1 = n - k$ [4]. В данном случае упрощение структуры данных за счет сокращения размерности и дальнейшее выделение компонент с наибольшей “значимостью” осуществляется на базе линейных преобразований и процедур ортогонализации. Преобразование в ряде случаев приводит к существенному снижению размерности и выделению всего нескольких максимально значимых компонент исходных данных, анализ которых используется для дальнейшего выделения и классификации различных состояний в динамики исследуемой системы. Метод главных компонент удобен в использовании и, очевидно, весьма понятен в истолковании получаемых результатов.

ИНС методы широко используются в современной обработке данных для решения более сложных задач работы с принципиально нелинейными данными [5]. В нашей работе мы сосредоточились на методе обучения с учителем, традиционно выбираемым для решения данного типа задач распознавания образов и классификации. Нами были рассмотрены несколько типов архитектуры нейронных сетей – многослойный перцептрон (МП), линейная ИНС и сеть радиально-базисных функций (РБФ).

В представленном докладе для обработки использовались многоканальные ЭЭГ данные, полученные в психофизиологическом эксперименте с добровольцами при визуальном стимулировании с помощью бистабильных визуальных стимулов. Отметим, что при таком стимулировании оператор может распознавать состояние одного и того же объекта как “1” или “2”. Эффект выбора связан с когнитивным состоянием человека, как с его постоянными особенностями, так и с когнитивным шумом []. Для записи ЭЭГ данных использовался электроэнцефалограф Энцефалан-ЭЭГР-19/26 (Россия) и стандартная расстановка электродов 10–20. Доброволец с помощью пульта для периодически возникающего на экране компьютера стимула отмечал свое видение объекта. Общая длительность эксперимента составляла 30 – 35 минут, стимул предъявлялся около 0,20 секунды, пауза между предъявлениями объектов составляла порядка 2,5 – 3 секунд. Затем, получаемый массив данных разделялся на фрагменты, для которых, благодаря ответам оператора, было заведомо известно, относятся ли они к классу “1” или “2”.

Итак, полученные данные были обработаны с помощью выбранных методов классификации. Применение метода МГК для автоматической классификации восприятия оператором объектов оказалось невозможным, поскольку выделение каких-либо значимых компонент не предоставляет возможности разделить полученные данные на кластеры. Вычислительные эксперименты были реализованы в среде MATLAB и, как продемонстрировано в докладе, не позволяют произвести классификацию по экспериментальным данным. Использование подходов на базе ИНС привело к существенно более интересному результату. Для обучения с учителем были случайным образом отобраны порядка 2–5 % фрагментов всех имеющихся данных, остальные использовались для тестирования возможностей “обученной” нейронной сети. Результаты численных экспериментов показали, что ИНС успешно классифицируют данные ЭЭГ для данной когнитивной деятельности. Наивысшее качество классификации было достигнуто с помощью многослойных перцептронов (95 – 97 %), в то время как линейная ИНС показала худшую производительность

(50 – 55 %). РФБ показала среднее качество распознавания когнитивных состояний человека на уровне 80 – 85 %. Таким образом, можно утверждать, что полученные результаты перспективны, в первую очередь, как мощный инструмент для обработки ЭЭГ данных в задачах создания систем управления по типу “нейроинтерфейс”, а, кроме того, это явное указание на принципиальную нелинейность получаемых сигналов. Заметим, что для ЭЭГ данных нелинейность является как “естественной”, вызванной непосредственно динамикой головного мозга, так и “привнесенной” самим методом измерений электрической активности. Принцип записи электроэнцефалографии не исключают ситуации, когда сигналы от зон мозга для одного и другого электрода могут быть частично смешаны и наложены друг на друга.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ € 16-29-08221.

1. Островский М.А. Актуальные направления современной науки о мозге. М.: Изд-во МГУ, 2010.
2. Farah M.J., et al. *J. Cogn. Neuroscience* **21**(1) (2009) 119-127
3. Jasper H.H. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* **10** (1958) 371-375
4. Chatfield C., Collins A. J. Introduction to multivariate analysis. London: Chapman & Hall, 1980.
5. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польск. И.Д.Рудинского. - М.: Финансы и статистика, 2004.

Методы нелинейной физики на основе непрерывного вейвлет-преобразования в задачах разработки нейроинтерфейсов и устройств ”мозг-компьютер”

Руннова А.Е., Журавлев М.О.

СГТУ, Саратов

Мозг является одним из наиболее сложных и загадочных объектов для комплексных исследований, привлекающий в последние десятилетия интерес широкой научной общест-венности [1 - 3]. Динамика мозга изучается специалистами из различных областей науки, в том числе нейрофизиологии, медицины, физики, математики, нелинейной динамики и т.д., и сочетание разнообразных подходов и проведение многопрофильных исследований зачастую предоставляет возможности для более глубокого понимания механизмов, лежащих в основе его динамики, и может открыть перспективные возможности в медицине и нейротехнологиях.

Одним из направлений исследования мозга является изучения визуального восприятия с помощью неоднозначных изображений с присутствием перспективы [4 - 6]. На сегодня основной механизм определения изображения не открыт полностью, однако, хорошо известно, что пространственное восприятие является продуктом процессов в распределенной сети затылочной, теменной и фронтальной области коры головного мозга [7, 8].

В рамках настоящей работы представлены методы комплексной обработки многоканальных данных ЭЭГ человека на базе непрерывного вейвлетного преобразования. С использованием стандартных материнских функций вейвлета Морле создана методика отслеживания внимания человека и способ обнаружения выбора человеком того или иного

восприятия неоднозначного изображения. Полученные результаты продемонстрированы на 15 добровольцев-испытуемых разного пола в возрасте от 20 до 32 лет. Зрение всех добровольцев было или нормальным, или скорректированным до нормального. В качестве исследуемого многомерного сигнала выступали многоканальные записи ЭЭГ, полученные с использованием программного и аппаратного оборудования Медиком МТД "Энцефалан - ЭЭГР - 19/26". С использованием вейвлетных поверхностей показано, что в записи ЭЭГ в целях определения сосредоточения (концентрации внимания) человека на решении той или иной задачи необходимо оценивать диапазон частот от 1 Гц до 40 Гц. Полученные результаты позволяют диагностировать периоды сосредоточения на решении той или иной задачи, а, кроме того, определить выбор человеком того или иного состояния распознавания сложного объекта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ € 16-29-08221.

1. Hramov A.E., et al., Wavelets in Neuroscience. Springer: Springer Series in Synergetics, 2015
2. Bear M. F., et al., Neuroscience. Exploring the brain. Woters Kluwer, 2015
3. Chavez M., et al., *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 118701
4. Leopold D. A., Logothetis N. K. *Trends in Cognitive Sciences* **3** (1999) 254
5. Blake R., Logothetis N. K. *Nature Reviews. Neuroscience* **3** (2002) 13
6. Pisarchik A. N., et al. *Biological Cybernetics* **108** (2014) 397
7. F. Tong, M. Meng, R. Blake *Trends in Cognitive Sciences* **10** (2006) 502
8. P. Sterzer, et al. *Trends in Cognitive Sciences* **13** (2009) 310

Адаптивная фильтрация внешних помех и шумов в многоканальных ЭЭГ человека на базе преобразования Гильберта-Хуанга

Грубов В.В., Пчелинцева С.В.

СГТУ, Саратов

В настоящее время большой интерес исследователей вызывают различные междисциплинарные задачи, например, изучение механизмов функционирования нейронных сетей головного мозга человека [1]. Данная задача лежит на стыке математики, радиофизики, кибернетики и нейрофизиологии и представляет интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, например, в клинической практике и при разработке интерфейса "мозг-компьютер".

Основным источником информации о работе мозга является электроэнцефалограмма (ЭЭГ), которая представляет собой сумму электрических токов, генерируемых группой нейронов в области регистрирующего электрода [2]. Известно, что существует прямая связь между характером активности на ЭЭГ в определенном частотном диапазоне (наличием осцилляторного паттерна) и функциональным состоянием организма [3]. Особую важность исследование паттернов приобретает при изучении патологий нервной системы когда паттерны могут выступать в роли диагностических признаков появления заболевания.

Исследования многоканальных данных ЭЭГ существенно осложнены наличием многочисленных артефактов, как аппаратной природы, так и физиологической, связанной с

различными нестационарными процессами, происходящими в организме человека в течение регистрации активности головного мозга. Природа артефактов может быть различна: движение глаз (так называемые, глазодвигательные артефакты), спазмы и напряжения в мышцах и сухожилиях скальпа, мышечная активность при произвольных и непроизвольных действиях (например, операции глотания или движения челюстного аппарата), кардиоритмами и т. п. Вне зависимости от своей природы такие артефакты зачастую обладают значительной амплитудой на сигнале ЭЭГ, которая может намного превышать амплитуду электрической активности головного мозга. Одновременно частотные диапазоны многих артефактов перекрываются с частотными диапазонами ритмов, представляющих интерес в исследованиях. Существуют различные методы для удаления артефактов, однако большинство из них характеризуются трудоемкими преобразованиями, недостаточной точностью определения артефактов или существенными искажениями исследуемых сигналов ЭЭГ, а также в ряде случаев требуется запись дополнительных физиологических сигналов (например, ЭОГ).

В настоящей работе предлагается новый метод по фильтрации внешних помех и шумов в многоканальных ЭЭГ человека на основе процедуры разложения сигнала по эмпирическим модам (преобразование Гильберта-Хуанга) [4]. Данный метод позволяет представить анализируемый сигнал в виде суммы амплитудно-модулированных компонентов (эмпирических мод) с нулевым средним. Исследования показывают, что каждая из эмпирических мод в разложении имеет характерный частотно-временной состав и содержит определенные осцилляторные паттерны [5]. Таким образом, разложение по эмпирическим модам может быть использовано для анализа локальных явлений в сигнале и потому находит применение при частотно-временном анализе сигналов ЭЭГ и поиске различных характерных осцилляторных паттернов, в частности, артефактов. Метод, предлагаемый в настоящей работе, включает в себя разложение исследуемого сигнала ЭЭГ на набор эмпирических мод, поиск и удаление эмпирических мод, содержащих характерные артефакты и шумы, и последующее восстановление исходного сигнала ЭЭГ.

Предлагаемый метод был протестирован на ЭЭГ добровольцев и было показано, что метод эффективно удаляет различные артефакты из сигнала ЭЭГ, не требуя сложных процедур обработки данных и записи дополнительных физиологических сигналов. Достоинством предлагаемого метода является простота алгоритма, что открывает возможность его реализации для удаления артефактов в режиме реального времени.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант € 16-29-08221).

1. Joyce C.A., Gorodnitsky I.F., Kutas M. *Psychophysiology*, **41** (2004) 313-325
2. Jung T.P., et al. *Adv Neural Info Process Syst* **10** (1998) 894-900
3. Nunez P.L., Srinivasan K. *Electric fields of the brain: The neurophysics of EEG*. Oxford University Press, 1981
4. Huang N.E., et al. *Proc. R. Soc. A*. **454** (1998) 903
5. Grubov V.V. et al. *BRAS: Physics* **76**, 12 (2012) 1361-1364

Метод линейной фильтрации физиологических сигналов в ЭЭГ данных человека, регистрируемых при сложной когнитивной динамики различных типов

Журавлев М.О., Руннова А.Е., Ситникова Е.Ю., Храмов А.Е.

СГТУ, Саратов, ИВНД и НФ РАН, Москва

Настоящая работа посвящена решению проблемы выделения и удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ человека. Эти артефакты имеют мощную амплитуду и занимают широкий меняющийся во времени диапазон частот (от минимальной спектральной частоты регистрации сигнала и до 8-15 Гц) [1, 2]. Глазодвигательные артефакты можно обнаружить на ЭЭГ в непосредственной близости от глаз, а также на значительном удалении, вплоть до затылочных областей, поэтому проблема удаления этих артефактов является весьма актуальной [3, 4].

Была проведена экспериментальная работа по регистрации ЭЭГ сигналов человека в стандартной расстановке “10-20” [5]. Эксперимент включал в себя несколько дизайнов – регистрацию фонового “покоя” – практически полного отсутствия движения глаз, регистрацию чисто физиологических эффектов от движения глаз (горизонтальные и вертикальные движения, а также мигания), а также регистрацию психофизиологического эксперимента, связанного с восприятием сложных визуальных стимулов с пространственным восприятием. Параллельно с ЭЭГ проводилась регистрация окулограмм (ЭОГ) человека.

В работе показано, что сигналы ЭЭГ, регистрируемые в эксперименте, являются линейной комбинацией ЭОГ и сигнала, связанного с электрической активностью головного мозга. Удаление глазодвигательных артефактов выполнялось с помощью метода ортогонализации Грамма-Шмидта [6]. Показано, что для центральных и передних отведений удаление глазодвигательных артефактов приводит к наиболее выраженному росту качества регистрируемых данных. На 25 добровольцах показано, что удалить выраженные на ЭОГ артефакты удастся для 97% случаев, в оставшихся 3% происходит или частичное сохранение помехи или она не удаляется.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 16-29-08221.

1. Островский М.А. Актуальные направления современной науки о мозге. М.: Изд-во МГУ, 2010.
2. Farah M.J., et al. *J. Cogn. Neuroscience* **21**(1) (2009) 119-127
3. Jasper H.H. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* **10** (1958) 371-375
4. Chatfield C., Collins A. J. Introduction to multivariate analysis. London: Chapman & Hall, 1980.
5. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польск. И.Д.Рудинского. - М.: Финансы и статистика, 2004.
6. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Физматлит, 2005.

Управление хаотической динамикой магнитоакустического генератора за счет упругих деформаций

Литвиненко А.Н., Химин Р., Тиберкевич В., Славин А.Н., Гришин С.В.

СарГу, Саратов, Россия; Оклендский университет, Мичиган, Рочестер, США

Известно, что хаотические генераторы микроволнового диапазона находят применение в системах скрытой передачи информации и хаотической радиолокации [1,2]. Их чувствительность к начальным условиям и параметрам динамической системы позволяет осуществлять секретную передачу данных на хаотической несущей, чей спектр неотличим от широкополосного шума. В последние годы в качестве нелинейных элементов в кольцевых генераторах хаоса стали использоваться пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), которые обладают богатым спектром нелинейных явлений [3,4]. Одним из основных преимуществ использования пленок ЖИГ является возможность перестройки по частоте хаотического сигнала и управление режимами генерации с помощью прикладываемого внешнего постоянного магнитного поля. Изменение величины магнитного поля приводит к перестройки области частот существования магнитостатических волн (МСВ), которые участвуют в формировании хаотического сигнала. Другой не менее интересной возможностью управления режимами генерации является использование деформаций, возникающих в результате магнитоупругого взаимодействия МСВ со звуковой волной. Такие упругие деформации образуются при наложении либо постоянного (статические деформации), либо переменного (динамические деформации) магнитного поля.

В докладе приводятся экспериментальные результаты, демонстрирующие возможность управления режимами генерации магнитоакустического генератора (МАГ) с помощью внешнего низкочастотного переменного магнитного поля. МАГ, работающий в диапазоне 500 МГц-1 ГГц, построен на базе высокочастотного конвертора отрицательного сопротивления и высокодобротного магнитоакустического резонатора (МАР) [5], который представляет собой пленку ЖИГ, выращенную на подложке из высокодобротного акустического кристалла гадолиний галлиевого граната (ГГГ). За счет эффекта магнитострикции разнородные колебательные системы (пленка ЖИГ и кристалл ГГГ) являются взаимосвязанными. Колебания в магнитной пленке возбуждают стоячие акустические сдвиговые волны в кристалле ГГГ, которые за счет влияния динамической деформации через обратный эффект магнитострикции меняют резонансные свойства МАР. В зависимости от амплитуды и частоты внешнего воздействия, МАГ демонстрирует ряд динамических режимов, таких как одночастотный режим генерации с низким уровнем фазовых шумов, мультимодальный режим и режим динамического хаоса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант ϵ 16-29-14021-офи-м)

1. Dmitriev A.S. et al. *Int. J. Bifurcation Chaos* **13** (2003) 1495.
2. Leung H. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **20** (1995) 56.
3. Wu M., Kalinikos B.A., Patton C.E. *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 237202.
4. Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П. *ЖТФ* **78** (2008) 89.
5. Litvinenko A.N., Sadovnikov A.V., Tikhonov V.V., Nikitov S.A. *IEEE Magnetics Letters* **6** (2015).

Анизотропное распространение медленных и быстрых волн намагниченности в микроволновом и терагерцовом диапазонах частот

Гришин С.В.

СарГУ, Саратов

Известно, что в гиромангнитных средах распространение волн намагниченности является, в общем, случае анизотропным. Это проявляется в том, что вектора фазовой и групповой скоростей становятся неколлинеарными [1]. В рамках данной проблемы, основное внимание исследователей было направлено на изучение углового расхождения между векторами фазовой и групповой скоростей медленных волн намагниченности или магнито-статических волн (МСВ), а также особенностей вращения вектора групповой скорости поверхностной МСВ и обратно объемных МСВ при изменении направления фазового фронта волны или внешнего постоянного магнитного поля в плоскости ферромагнитной пленки. Помимо медленных волн намагниченности, фазовая скорость которых намного меньше скорости света в свободном пространстве, в гиромангнитных средах существуют и быстрые ("обыкновенная" и "необыкновенная") волны намагниченности, фазовая скорость которых сравнима или превышает скорость света в свободном пространстве. В случае тонких пленок, имеющих микронные размеры, спектр быстрых волн приходится на ТГц-ый диапазон частот, в котором магнитную проницаемость гиромангнитной среды, при исследовании магнитооптических эффектов, принято считать скалярной величиной, а анизотропию здесь связывают с тензорной величиной диэлектрической проницаемости. В связи с этим анизотропное распространение быстрых волн намагниченности, обусловленное магнитными свойствами среды, до сих пор не рассматривалось.

В настоящем докладе приводятся результаты теоретического исследования анизотропного распространения медленных и быстрых волн намагниченности в произвольно намагниченном полосковом тонкопленочном ферромагнитном волноводе. Демонстрируется возможность управления законами дисперсии волн намагниченности за счет изменения направления внешнего постоянного магнитного поля. Основное внимание уделяется случаю наклонного намагничивания, при котором дисперсионные кривые медленных и быстрых волн "расщепляются" на две ветви. Установлено, что групповые скорости, соответствующие указанным дисперсионным ветвям, которые находятся в одной области частот и обладают нормальным законом дисперсии, поворачиваются в противоположные стороны при отклонении магнитного поля от оси симметрии волновода. Показано, что аналогичное поведение групповых скоростей наблюдается у быстрых "обыкновенной" и "необыкновенной" волн при касательном намагничивании, когда "расщепление" их дисперсионных характеристик отсутствует. На основе проведенных расчетов предложено устройство в виде ответвителя энергии по волновым числам, работающего на эффекте анизотропного распространения волн.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (задание € 2014/203) и РФФИ (грант € 16-29-03120-офи-м)

1. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитоэлектрические волны в электронике сверхвысоких частот. СГУ, Саратов, 1993.

Нелинейные магнитные колебания и волны в магнитных микро- и наноструктурах

^{1,2}Высоцкий С.Л., ^{1,2}Дудко Г.М., ¹Кожевников А.В., ¹Павлов Е.С.,
¹Сахаров В.К., ^{1,2}Хивинцев Ю.В., ^{1,2}Филимонов Ю.А.,
²Садовников А.В., ^{2,3}Никитов С.А.

¹СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, РФ;

²СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, РФ;

³ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, РФ

Приводятся результаты исследований нелинейных магнитных колебаний и волн в микро- и наноструктура на основе пленок железоитттриевого граната (ЖИГ) и пермаллоя. Обсуждаются результаты исследования влияния параметрической неустойчивости спиновых волн на формирование спектра спиновых волн в магнетонных кристаллах. Показано, что в условиях параметрической неустойчивости первого порядка рост надкритичности накачки приводит к разрушению резонанса Брэгга на длине нелинейности спиновых волн. В магнетонных кристаллах со структурным дефектом исследовано влияние параметрических процессов на формирование дефектной моды. Показано, что за порогом параметрической неустойчивости в амплитудных и фазовых характеристиках сигнала спиновых волн наблюдаются эффекты бистабильности, которые также сопровождаются гистерезисными явлениями в спектре параметрических спиновых волн. Обсуждаются результаты экспериментов по исследованию параметрических процессов на распространение спиновых волн в плёнках с субволновой поверхностной микроструктурой. Рассмотрено влияние параметрических процессов на резонансы Фано в пленках с метаповерхностью. Рассмотрены эффекты нелинейной фильтрации сигнала спиновых волн в магнетонных кристаллах и решетках ортогональных микроволноводов спиновых волн. Обсуждаются особенности развития процессов параметрической неустойчивости в пленках ЖИГ на полупроводниковых подложках, обусловленные большой скоростью релаксации намагниченности в таких пленках. Обсуждаются результаты микромагнитного моделирования нелинейных колебаний намагниченности в магнитных решетках.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ €16-57-00135, 16-07-01092, 16-02-01073, 16-37-60052, 14-07-00896, 16-29-14058.

Построение простейших примеров трёхмерных потоков с двумя гетероклиническими циклами

Гринес Е.А., Осипов Г.В.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

Широко известно, что гетероклинические циклы не есть структурно-устойчивое явление в пространстве всех динамических систем. Однако если некоторое семейство систем обладает дополнительными свойствами, то гетероклинические циклы оказываются структурно устойчивы в н.ч.м. Например, семейства эквивариантных систем [1] или обобщённых систем Вольтерра-Лотке [2] обладают структурно-устойчивыми гетероклиническими цик-

лами.

Несмотря на то, что в литературе есть работы, предлагающие методы построения систем с гетероклиническими сетями с заданной топологией [3], для их реализации обычно требуется вложение в пространство более высокой размерности. В данной работе предлагается метод построения простейших примеров $Z_3 \times (Z_2)^3$ -эквивариантных трехмерных систем с несколькими гетероклиническими циклами, где группа $Z_3 \times (Z_2)^3$ порождается циклическими перестановками координат и отражениями относительно координатных плоскостей. Для конкретного примера с двумя гетероклиническими циклами приведен приблизительный анализ глобальной динамики.

1. Guckenheimer J., Holmes P. *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.* **103** (1988)
2. May R., Leonard W. *SIAM Journal on Applied Mathematics* **29** (1975)
3. Ashwin P., Postlethwaite C. *Physica D: Nonlinear Phenomena* **265** (2013)

Странные нехаотические автоколебания в системе трех механических ротаторов

Жалнин А.Ю., Кузнецов С.П.

СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

Странный нехаотический аттрактор (СНА) - фундаментальный тип аттрактора динамических систем, сочетающий противоречивые свойства порядка и хаоса. Он обладает негладкой, фрактало-подобной геометрической структурой, при отсутствии экспоненциальной неустойчивости траекторий и положительного показателя Ляпунова. СНА введены в рассмотрение в 1984 году [1] и с тех пор широко изучались применительно к нелинейным системам, динамика которых совершается в присутствии квазипериодического воздействия (например, в виде совокупности двух и более сигналов с иррациональным соотношением частот). В то же время, попытки наблюдать странные нехаотические автоколебания, где составляющие с несоизмеримыми частотами были бы обязаны своим появлением не внешнему воздействию, а генерировались в самой системе натуральным образом, успешными не были [2,3]. Таким образом, вопрос о существовании странных нехаотических автоколебаний до сих пор остается открытым.

В настоящей работе рассматривается пример автоколебательной диссипативной системы механической природы, в которой странные нехаотические автоколебания реализуются благодаря приложенному к одному из элементов постоянному во времени моменту сил, т.е. внешнее воздействие не является колебательным, а появление составляющих движения с несоизмеримыми частотами обусловлено иррациональным соотношением размеров вовлеченных в движение вращающихся элементов. Модельная система представляет собой три установленных в вертикальной плоскости диска (1,2,3), из которых диски 1 и 3 сосны и испытывают взаимное вязкое трение, пропорциональное относительной угловой скорости, а диск 2 соединен с диском 1 посредством фрикционной передачи вращения без проскальзывания. Кроме того, диск 1 испытывает вязкое трение при вращении, пропорциональное его угловой скорости. Движение системы обеспечивается постоянным, не изменяющимся во времени моментом силы, приложенным к диску 1.

Показано, что, при выходе системы из устойчивого равновесия, в ней могут реализовываться режимы двух- и трехчастотных квазипериодических, хаотических, а также странных нехаотических колебательно-вращательных движений. Выводы работы подтверждаются результатами численного анализа: расчета Ляпуновских показателей, спектров мощности, фрактальных размерностей и показателей фазовой чувствительности. В частности, показано, что СНА характеризуется нулевым старшим ляпуновским показателем (и отрицательными остальными), положительным показателем фазовой чувствительности, близкой к “2” емкостной размерностью и сингулярно-непрерывным спектром мощности. Таким образом, новый феномен, квалифицируемый как странные нехаотические автоколебания, представляет в новом свете вопрос о реализуемости СНА в автономных системах.

1. Grebogi C., Ott E., Pelikan S., Yorke J.A. *Physica D* **13**(1-2) (1984), 261.
2. Anishchenko V.S., Vadivasova T.E., Sosnovtseva O. *Phys. Rev. E* **54**(4) (1996) 3231.
3. Pikovsky A.S., Feudel U. *Phys. Rev. E* **56**(6) (1997) 7320.

Томсоновские АКС в нелинейной динамике с дискретным временем

Зайцев В.В., Шилин А.Н.

Самарский университет, Самара

Современная нелинейная динамика рассматривает эволюцию динамических систем как в непрерывном (НВ), так и дискретном времени (ДВ). В области дискретного времени она смыкается с цифровой обработкой сигналов и объекты ДВ-динамики могут служить основой алгоритмов обработки. Для выполнения этих функций необходим широкий круг ДВ-систем, обеспечивающий возможность выбора заданной характеристики преобразования сигналов. ДВ-системы в большинстве случаев возникают в результате дискретизации времени в математических моделях НВ-систем. При этом конкретная форма процесса дискретизации существенным образом влияет на характеристики спроектированной (синтезированной) ДВ-системы. В сообщении описаны ДВ автоколебательные системы (ДВ-АКС) томсоновского типа, спроектированные с использованием принципа инвариантности импульсной характеристики линейного резонатора, дополненного формулой квадратурного преобразования дискретных гармонических функций.

В качестве базовой математической модели томсоновской АКС выбрано дифференциальное уравнение второго порядка для осциллирующей переменной $x(t)$:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \omega_0 \gamma F(x) \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

где ω_0 и Q – собственная частота и добротность резонатора АКС, $F(x)$ – функция нелинейностей в цепи обратной связи и γ – параметр ег глубины.

При дискретизации времени в НВ-осцилляторе (1) на основе принципа импульсной инвариантности ДВ-осциллятор задается разностным уравнением для осцилляций $x[n]$ в дискретном времени

$$x[n] - 2\alpha \cos(2\pi\Omega_0)x[n-1] + \alpha^2 x[n-2] = g \sin(2\pi\Omega_0)F(x[n-1])y[n-1]. \quad (2)$$

Здесь введены обозначения $y[n] = y(n\Delta) = \dot{x}(n\Delta)\Delta$, $g = 2\pi\Omega_0\gamma$. Параметр диссипации $\alpha = \exp(-\pi\Omega_0/Q)$ в (2) определяется добротностью Q резонансного каскада; Ω_0 – собственная частота резонатора, измеряемая в единицах частоты дискретизации.

Уравнение (2) дополняется связью между сигналами $x[n]$ и $y[n]$. Для дискретных гармонических колебаний $x[n] = A \cos(2\pi\Omega_0 n + \varphi)$ и $y[n] = -2\pi\Omega_0 A \sin(2\pi\Omega_0 n + \varphi)$ с частотой Ω_0 , амплитудой A и фазой φ эта связь имеет вид

$$\sin(2\pi\Omega_0)y[n] = \cos(2\pi\Omega_0)x[n] - x[n-1]. \quad (3)$$

Предлагается распространить ее на произвольные сигналы. В таком случае томсоновская ДВ-АКС задается уравнениями движения (2) и (3). В частности ДВ-осциллятор Ван дер Поля – это рекуррентный алгоритм генерации ДВ-автоколебаний [1]:

$$x[n] - 2\alpha \cos(2\pi\Omega_0)x[n-1] + \alpha^2 x[n-2] = g(1 - x^2[n-1])(\cos(2\pi\Omega_0)x[n-1] - x[n-2]).$$

Для приближенного аналитического исследования ДВ-АКС предложен вариант метода усреднения.

1. Зайцев В.В. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, **17** (2014), N 1, 35.

Локальная динамика системы с двумя большими пропорциональными запаздываниями

Кащенко И.С.

ЯрГУ, Ярославль

Рассмотрим уравнение с двумя запаздываниями

$$\dot{x} + x = ax(t-T) + bx(t-T_1) + f(x, x(t-T), x(t-T_1)), \quad T_1 > T > 0.$$

Здесь $x(t)$ скалярная функция, a и b некоторые постоянные. Нелинейная функция $f = f(x, y, z)$ имеет в нуле порядок малости выше первого, т. е. $f(0, 0, 0) = f'_x(0, 0, 0) = f'_y(0, 0, 0) = f'_z(0, 0, 0) = 0$. Таким образом, уравнение имеет нулевое решение. Основное предположение работы состоит в том, что оба запаздывания T и T_1 пропорциональны друг другу и достаточно велики. Положим

$$T = \varepsilon^{-1}, \quad T_1 = T(k_0 + \varepsilon^\alpha k_1), \quad 0 < \varepsilon \ll 1, \quad k_0 \geq 1, \quad \alpha > 0.$$

Поставим задачу исследовать поведение решений в некоторой малой (но не зависящей от ε) окрестности нулевого состояния равновесия фазового пространства $C_{[-T_1, 0]}$.

Как показано, важную роль играют алгебраические свойства числа k_0 . Принципиально различными будут случаи рационального и иррационального k_0 . Кроме того, даже на результаты об устойчивости нуля существенное влияние оказывает значения α . Поэтому случаи $\alpha < 1$, $\alpha = 1$ и $\alpha > 1$ будут рассмотрены отдельно.

Локальная динамика определяется расположением корней характеристического квазиполинома

$$\varepsilon\lambda + 1 = a \exp(-\lambda) + b \exp(-(k_0 + \varepsilon^\alpha k_1)\lambda).$$

Показано, что все критические случаи (т.е. ситуации, когда состояние равновесия теряет устойчивость) имеют бесконечную размерность. В случае рационального k_0 дальнейшее исследование [1, 2] велось с помощью метода квазинормальных форм: строится специальная замена, с помощью которой исходное уравнение сводится к задаче, которая не содержит малых параметров (либо зависит от них регулярно). Такая задача (квазинормальная форма) в отличие от исходного уравнения легко может быть исследована численно.

Во всех случаях приведены квазинормальные формы, предъявлены явные формулы, связывающие решения исходной задачи и квазинормальной формы. Оказалось, что в роли нормализованных задач выступают нелинейные уравнения параболического типа. В случае $\alpha > 1$ пространственная переменная в этих уравнениях одномерная, а при $\alpha \leq 1$ – двумерная.

Важным фактом является наличие в квазинормальных формах произвольных параметров (отсутствующих в исходном уравнении). При изменении этих параметров мы получаем другие нормализованные задачи, другие их решения, а значит и другие решения исходного уравнения. Это свидетельствует о наличии явления гипермультистабильности в уравнении с двумя запаздываниями.

1. Кащенко И.С. Нелинейная динамика **6:1** (2010) 169–180
2. Kashchenko I.S. *IJBC* **24:8** (2014) 1440021

Мультистабильные биения в автоколебательных системах с импульсной запаздывающей обратной связью

Клиньшов В.В.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В работе теоретически и экспериментально изучена динамика автогенератора с петлей запаздывающей обратной связи импульсного типа. При превышении выходным сигналом автогенератора определенного порога на линию задержки подается импульс, который через некоторое время поступает на вход генератора. Базовым режимом системы является строго периодическая генерация импульсов с периодом, близким к собственному периоду автоколебаний. Обнаружен новый механизм дестабилизации такого регулярного режима, сопровождающейся возникновением сложных нерегулярных (длиннопериодических) колебаний. Возникающие режимы характеризуются наличием неравных межимпульсными интервалами, что обусловило применение по отношению к ним термина кбиениянь, или кдрожаениень. Наблюдались устойчивые биения, или кдрожащиень режимы, состоящих из длинных и коротких интервалов, чередование которых формирует периодическую бинарную последовательность.

Теоретически и экспериментально показано, что для любой такой последовательности произвольного периода существует область параметров, в которой устойчив соответствующий дрожащий режим. Построенная теория позволяет находить область устойчивости любого такого режима, а экспериментальные результаты на электронных аналогово-цифровых схемах подтверждают адекватность теории. Продемонстрирована высокая мультистабильность дрожащих режимов, число которых возрастает экспоненциально с ростом величины запаздывания. Такие свойства позволили назвать открытый сценарий

к бифуркацией мультидрожания. Полученные результаты применимы к автогенераторам любой природы и дают простой критерий возникновения и развития в них неустойчивости типа мультидрожания.

1. Klinshov et al. *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 178103
2. Klinshov et al. *Phys. Rev. E* **92** (2015) 042914
3. Klinshov et al; *Phys. Rev. E* **94** (2016) 012206

Аттракторы релаксационных отображений с хаотической динамикой на быстром временном масштабе

Масленников О.В., Некоркин В.И.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

Релаксационные колебания, т.е. процессы с несколькими различными временными масштабами, достаточно широко распространены во многих природных и технических системах. Особенностью большинства ранее изучавшихся релаксационных систем является то, что они демонстрируют колебания с фазами медленных регулярных движений, между которыми происходят быстрые переходы [1]. Даже если эти колебания хаотические, механизм хаоса состоит в случайных переходах между фазами медленных движений. В настоящем докладе рассматривается новый тип релаксационных систем, отличительной чертой которых является наличие двух характерных стадий – медленные регулярные и быстрые хаотические движения [2]. В отличие от традиционно изучаемых быстро-медленных систем, в фазовом пространстве которых имеются гладкие многообразия медленных движений и быстрые перескоки между ними, в данном новом типе, помимо тех же объектов, наблюдаются области переходного (транзитивного) хаоса [3,4]. Чередующиеся фазы медленных регулярных движений и быстрых хаотических, а также короткие переходы между ними, приводят к появлению специфического хаотического аттрактора с хаосом на быстром временном масштабе. Мы формулируем базовые свойства таких аттракторов в рамках динамических систем с дискретным временем (точечных отображений) и рассматриваем ряд примеров. В качестве важного приложения таких систем приводится модель электрической активности нейрона в форме хаотических спайк-бчрстовых колебаний.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант € 15-02-04245).

1. Desroches M., Guckenheimer J., Krauskopf B., Kuehn C., Osinga H. M., Wechselberger M., *SIAM Rev.* **54** (2012) 211П288.
2. Maslennikov O.V., Nekorkin V.I. *Chaos* **26** (2016) 073104.
3. Maslennikov O.V., Nekorkin V.I. *Chaos* **23** (2013) 023129.
4. Lai Y.-C., Tél T., *Transient Chaos: Complex Dynamics on Finite Time Scales*, Applied Mathematical Sciences (Springer, Berlin, 2011).

Эволюция шума в плазменных средах в постоянном магнитном поле

Рящиков Д.С., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И.

Самарский национальный исследовательский университет, Самара
СФ ФИАН, Самара

Существует широкий класс сред, в которых важную роль играют неадиабатические процессы нагрева и охлаждения, зависящие от температуры и плотности. Примерами таких сред являются межзвездный газ, межгалактические туманности и солнечная корона. В этих средах наблюдаются различные пространственно-временные структуры, появление которых связывают с тепловой неустойчивостью, вызванной неадиабатическими процессами.

В данной работе рассматривается эволюция шума в плазменных проводящих средах при наличии тепловой неустойчивости изоэнтропического типа, то есть неустойчивости волновых мод. Ранее в одномерной геометрии было показано, что в подобных средах возможно формирование серии ударноволновых импульсов, обладающих свойствами солитонов и автоволн [1]. Аналитически были определены параметры таких импульсов в зависимости от параметров среды и источника тепловыделения, который описывает неадиабатические процессы нагрева и охлаждения среды [2, 3]. Также, было произведено численное моделирование аналогичных структур, которые могут формироваться в колебательно-возбужденном газе с отрицательной второй вязкостью [1, 4].

В рамках текущего исследования было проведено двумерное численное моделирование возникающих пространственно-временных шумоиндуцированных магнитогидродинамических (МГД) структур в плазменной среде при условиях изоэнтропической неустойчивости. Показано, что при слабых магнитных полях образующиеся структуры не имеют четко выраженной симметрии, а их свойства качественно совпадают со свойствами полученных ранее структур в колебательно-возбужденном газе с отрицательной второй вязкостью. Однако, при достаточно сильных магнитных полях происходит упорядочивание МГД структур относительно направления вектора магнитной индукции, и в среде формируются так называемые страйп-структуры, направленные перпендикулярно полю.

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013-2020 гг. и Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проекты € 102, 608 и 1451 ГР 114091840046 и грантом РФФИ 14-02-97030 р_поволжье_a.

1. Molevich N.E., Zavershinsky D.I., Galimov R.N., Makaryan V.G. *Astrophys. Space Sci.* **334** (2011) P. 35-44.
2. Molevich N.E., Zavershinskiy D.I., Ryashchikov D.S. *Magnetohydrodynamics* **52** (2016) P. 191-198.
3. Zavershinsky D.I., Molevich N.E. *Technical Physics Letters* **39:8** (2013) P. 676-679.
4. Makaryan V.G., Molevich N.E. *Plasma Sources Sci. Technol.* **16** (2007) P. 124-131.

Странные аттракторы в динамике твердого тела

Казаков А.О.

НИУ Высшая школа экономики, Нижний Новгород

В работе будут приведены основные результаты исследования хаотической динамики в двух задач динамики твердого тела: неголономной модели движения волчка Чаплыгина [1,2] и неголономной модели движения кельтского камня [3,4,5].

Хорошо известно (см., например, [6]), что движение таких неголономных систем описывается четырехмерным потоком и, при подходящем выборе секущей, может быть исследовано с помощью построения трехмерных отображений Пуанкаре.

Недавно в работах [7,8,9] были приведены сценарии рождения и классификация гомоклинических аттракторов. Показано, что в зависимости от мультипликаторов неподвижной точки, на базе которой рождается странный аттрактор могут возникать аттракторы различных типов (напр., дискретный аттрактор Лоренца, восьмерочный аттрактор или дискретный аттрактор Шильникова).

С помощью построения карт показателей Ляпунова и анализа поведения сепаратрис седловых точек в рассматриваемых системах были обнаружены следующие странные аттракторы (в соответствии с классификацией [9]):

- В неголономной модели кельтского камня: дискретный аттрактор Лоренца [4,5] и другие;
- В неголономной модели волчка Чаплыгина: восьмерочный аттрактор [1], дискретный аттрактор Шильникова [2] и другие;

В докладе будут представлены сценарии рождения указанных аттракторов, а также их свойства.

[1] Borisov A. V., Kazakov A. O., Sataev I. R. The reversal and chaotic attractor in the nonholonomic model of Chaplygin's top //Regular and Chaotic Dynamics. - 2014. - vol. 19. - no. 6. - pp. 718-733.

[2] Сатаев И. Р., Казаков А. О. Сценарии перехода к хаосу в неголономной модели волчка Чаплыгина //Нелинейная динамика. - 2016.- Т. 12. - N. 2. - С. 235-250.

[3] Гонченко А. С., Гонченко С. В., Казаков А. О. О некоторых новых аспектах хаотической динамики кельтского камня //Нелинейная динамика. - 2012. - Т. 8. - N. 3. - С. 507-518.

[4] Гонченко А. С., Гонченко С. В. О существовании аттракторов лоренцевского типа в неголономной модели кельтского камня //Нелинейная динамика. - 2013. - Т. 9. - N. 1. - С. 77-89.

[5] Gonchenko A. S., Gonchenko S. V., Kazakov A. O. Richness of chaotic dynamics in nonholonomic models of a Celtic stone //Regular and Chaotic Dynamics. - 2013. - Т. 18. - N. 5. - С. 521-538.

[6] Борисов А. В., Мамаев И. С. Динамика твердого тела. - М : РХД, 2001.

[7] Гонченко А. С., Гонченко С. В., Шильников Л. П. К вопросу о сценариях возникновения хаоса у трехмерных отображений //Нелинейная динамика. - 2012. - Т. 8. - N. 1. - С. 3-28.

[8] Gonchenko A. et al. Simple scenarios of onset of chaos in three-dimensional maps //International Journal of Bifurcation and Chaos. - 2014. - Т. 24. - N. 08. - С. 1440005.

[9] Gonchenko A., Gonchenko S. Variety of strange pseudohyperbolic attractors in three-dimensional generalized H'enon maps //arXiv preprint arXiv:1510.02252. - 2015.

Аналитическое решение спектральной задачи для оператора Перрона-Фробениуса кусочно-линейных хаотических отображений с произвольным наклоном полных ветвей без "щелей"

Аникин В. М., Аркадакский С. С., Купцов С. Н., Ремизов А. С.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

Развивается метод аналитического решения задачи на полиномиальные собственные функции и собственные значения оператора Перрона-Фробениуса для произвольных кусочно-линейных отображений с полными ветвями без "щелей" конечных областей нулевого значения итеративной функции. В качестве метода решения используется комбинированный подход, основанный на методе производящей функции для собственных функций оператора и методе неопределенных коэффициентов[1]. Определен также общий вид функций, составляющих ядро оператора. Результаты верифицируются на примере сдвигов Бернулли.

1. Аникин В.М., Голубенцев А. Аналитические модели детерминированного хаоса. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 328 с.

Затягивание частоты и возникновение хаоса в генераторе Ван дер Поля с дополнительным контуром

Астахов О.В.¹, Астахов С.В.², Селезнев Е.П.^{1,3}, Астахов В.В.²

1. СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов
2. СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
3. СФ ИРЭ РАН имени Котельникова В.А., Саратов

В данной работе рассматривается один из простейших примеров двухмодовых генераторов - классический генератор Ван дер Поля с дополнительным контуром [1,2,3]. Для данной системы хорошо известен эффект затягивания частоты колебаний, однако остается открытым вопрос о том, как влияет на динамику двухмодового генератора Ван дер Поля способ включения дополнительного контура. В соответствии с работой [4] выделяют схему включения обратной связи к ближнему от усилителя контуру (это, так называемый, генератор с нагрузкой) и к дальнему от усилителя контуру (генератор с перекрестной связью [4]). Кроме того, требует дополнительных исследований вопрос о влиянии типа связи между контурами на характерные режимы системы и их бифуркации, на бифуркационный механизм формирования бистабильности, приводящей к эффектам гистерезиса и затягивания частоты.

Показано, что в генераторе с нагрузкой и с чмкостной связью между контурами эффект затягивания частоты связан не с седло-узловыми бифуркациями предельных цик-

лов, что считается типичным сценарием формирования мультистабильности, а является следствием двух суперкритических бифуркаций Андронова-Хопфа для состояния равновесия и субкритической бифуркации Неймарка - Сакера для седлового предельного цикла. Бифуркационный механизм в этом случае является точно таким же как и в случае индуктивной связи между контурами [5]. Установлено, что при ином способе включения обратной связи, в генераторе с перекрестной связью, субкритическая бифуркация Неймарка $\cap$ Сакера меняется на суперкритическую, что исключает мультистабильность и эффект затягивания частоты, но приводит к более сложному поведению системы: появлению квазипериодических и хаотических колебаний. Переход к хаосу происходит через разрушение тора. Также показано, что способ связи между контурами не вносит изменения в поведение системы.

1. Van der Pol B. On oscillation hysteresis in a triode generator with two degrees of freedom. – Philos. Mag., ser.6, 1922, vol. 43, No. 256, p.700 - 719.
2. Андронов А.А., Витт А.А. К математической теории автоколебательных систем с двумя степенями свободы. Журнал технической физики, 1934, т.4, вып.1, с.122. (А.А. Андронов. Собрание трудов. Москва: Издательство Академии Наук СССР. 1956 год, с.161-182.)
3. Скибарко А.П., Стрелков С.П. Качественное исследование процессов в генераторе со сложной схемой. Журнал технической физики, 1934, т.4, вып.1, с. 158.
4. Teodorchik-1952 Теодорчик К.Ф. Автоколебательные системы. - М.: Гостехиздат, 1952.
5. S. Astakhov, O. Astakhov, V. Astakhov, and J. Kurts. Bifurcational mechanism of the multistability formation and the frequency entrainment in a van der Pol oscillator with an additional oscillatory circuit. International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 26, No. 7 (2016) 1650124 (10 pages).

On the global bifurcation analysis of low-dimensional polynomial dynamical systems

Gaiko V.A.

UIIP NAS Belarus, Minsk

We continue the global bifurcation analysis of low-dimensional polynomial dynamical systems. To control all of their limit cycle bifurcations, especially, bifurcations of multiple limit cycles, it is necessary to know the properties and combine the effects of all of their rotation parameters. It can be done by means of the development of new bifurcational and topological methods based on the well-known Weierstrass preparation theorem and the Perko planar termination principle stating that the maximal one-parameter family of multiple limit cycles terminates either at a singular point which is typically of the same multiplicity (cyclicity) or on a separatrix cycle which is also typically of the same multiplicity (cyclicity) [1]. This principle is a consequence of the principle of natural termination which was stated for higher-dimensional dynamical systems by A. Wintner who studied one-parameter families of periodic orbits of the restricted three-body problem and used Puiseux series to show that in the analytic case any one-parameter family of periodic orbits can be uniquely continued through any bifurcation except a

period-doubling bifurcation. Such a bifurcation can happen, e. g., in a three-dimensional Lorenz system. This cannot happen for planar systems. That is why the Wintner–Perko termination principle is applied for studying multiple limit cycle bifurcations of planar polynomial dynamical systems [1].

If we do not know the cyclicity of the termination points, then, applying canonical systems with field rotation parameters, we use geometric properties of the spirals filling the interior and exterior domains of limit cycles. Applying this method, we solve first *Hilbert’s Sixteenth Problem* on the maximum number of limit cycles and their distribution for the planar general Liénard polynomial system [2] and Holling-type quartic dynamical system [3]. Then, applying a similar approach, we study three-dimensional polynomial systems and complete the strange attractor bifurcation scenario for the Lorenz system connecting globally the homoclinic, period-doubling, Andronov–Shilnikov, and period-halving bifurcations of its limit cycles which is related to *Smale’s Fourteenth Problem* [4]. We discuss also how to apply our approach for studying global limit cycle bifurcations of discrete polynomial dynamical systems which model the population dynamics in biomedical and ecological systems.

1. Gaiko V.A. Global bifurcation theory and Hilbert’s sixteenth problem. Kluwer, Boston, 2003.
2. Gaiko V.A. *Adv. Dyn. Syst. Appl.* **10** (2015), 177–188.
3. Gaiko V.A. *Int. J. Dyn. Syst. Differ. Equ.* **6** (2016), 161–172.
4. Gaiko V.A. *J. Nonlinear Sci. Appl.* **7** (2014), 429–434.

Бифуркация голубого неба и неклассические релаксационные колебания в моделировании кардиоритмов

Глызин С.Д.*, Колесов А.Ю.*, Розов Н.Х.**

* ЯрГУ им. П.Г. Демидова, Ярославль; ** МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Рассматривается специальный класс сингулярно возмущенных систем обыкновенных дифференциальных уравнений с одной быстрой и двумя или более медленными переменными, для которого реализуется известная бифуркация типа катастрофы голубого неба. Характерной особенностью рассматриваемых систем является наличие в них так называемых неклассических релаксационных колебаний, отличительная черта которых состоит в том, что их медленные компоненты асимптотически близки к некоторым разрывным по времени функциям, а быстрая компонента δ -образна. Наличие указанной бифуркации удастся обосновать с помощью построения отображения, отвечающее за аттрактор системы (отображение Пуанкаре вдоль траекторий на специальном образом выбранном сечении). Разбираются случаи, когда в результате катастрофы голубого неба возникает устойчивый релаксационный цикл или устойчивый двумерный инвариантный тор. Рассматривается также вопрос о появлении в системе гиперболического аттрактора (аттрактора Смейла Ц Вильямса). Сделана попытка применения обсуждаемых систем к моделированию кардиоритмов.

В работе [1] проиллюстрирована реализуемость упомянутой выше бифуркации в сингулярно возмущенных системах с одной медленной и m , $m \geq 2$ быстрыми переменными.

В свою очередь, в статье [2] катастрофа голубого неба изучалась в системе

$$\dot{x} = f(x, y, \mu), \quad \varepsilon \dot{y} = g(x, y), \quad (1)$$

где $x \in \mathbf{R}^m$, $m \geq 2$, $y \in \mathbf{R}$, $0 < \varepsilon \ll 1$, $|\mu| \ll 1$, а на функции $f, g \in C^\infty$ были наложены стандартные ограничения, обеспечивающие существование так называемых классических релаксационных колебаний. (В этом случае при $\varepsilon \rightarrow 0$ медленные компоненты x стремятся к некоторым непрерывным по t функциям, а быстрая компонента y близка к разрывной функции.)

В настоящей работе результаты из [2] распространяются на систему вида (1), в которой функции $f(x, y, \mu) \in C^\infty(\mathbf{R}^2 \times \mathbf{R} \times [-\mu_0, \mu_0]; \mathbf{R}^2)$, $g(x, y) \in C^\infty(\mathbf{R}^2 \times \mathbf{R})$ удовлетворяют специальным условиям, гарантирующим реализуемость неклассических релаксационных колебаний. В этом случае при $\varepsilon \rightarrow 0$ медленные компоненты асимптотически близки к некоторым разрывным по времени функциям, а быстрая компонента δ -образна. Указанные свойства решений позволяют использовать некоторые варианты системы (1) для феноменологического моделирования кардиоритмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-21-00158)

1. Shilnikov A., Shilnikov L., Turaev D. *Moscow Mathematical Journal*. 2005. **5**. № 1. P. 269–282.
2. Глызин С. Д., Колесов А. Ю., Розов Н. Х. *Диф. уравн.* 2008. **44**. № 2. С. 158–171.

Запаздывающее взаимодействие пары сингулярно возмущенных осцилляторов

Глызин С. Д., Марушкина Е. А.

ЯрГУ им. П. Г. Демидова, Ярославль

В моделировании биофизических процессов и явлений большую роль играют сингулярно возмущенные уравнения с запаздыванием и их системы. При описании взаимодействия между элементами системы важно учитывать запаздывание в цепи связи между генераторами. В качестве исходной рассмотрим модель электрического взаимодействия пары импульсных нейронов (см. [1])

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= \lambda[-1 + \alpha f(u_1(t-1)) - \beta g(u_1)]u_1 + d(u_2 - u_1), \\ \dot{u}_2 &= \lambda[-1 + \alpha f(u_2(t-1)) - \beta g(u_2)]u_2 + d(u_1 - u_2), \end{aligned} \quad (1)$$

в которой элемент связи не содержит запаздывания. Здесь $u_j(t) > 0$, $j = 1, 2$ — мембранные потенциалы нейронов, параметр $\lambda > 0$ предполагается большим, $d = \text{const} > 0$, а параметры $\alpha, \beta > 0$, имеющие порядок единицы, удовлетворяют условиям

$$\alpha > 1 + \beta, \quad \alpha < 2(1 + \beta). \quad (2)$$

Будем считать, что функции $f(u)$ и $g(u)$ принадлежат классу $C^2(\mathbf{R}_+)$, $\mathbf{R}_+ = \{u \in \mathbf{R}: u \geq 0\}$ и обладают следующими свойствами:

$$\begin{aligned} f(0) &= g(0) = 1, \quad 0 < \beta g(u) + 1 < \alpha \quad \forall u \in \mathbf{R}_+; \\ f(u), g(u), u f'(u), u g'(u), u^2 f''(u), u^2 g''(u) &= O(1/u) \quad \text{при } u \rightarrow +\infty. \end{aligned} \quad (3)$$

В [1] доказано существование и устойчивость при различных значениях параметра связи d релаксационных периодических движений этой системы.

В настоящей работе диффузионная связь принятая в системе (1) заменена нелинейной запаздывающей связью

$$\begin{aligned}\dot{u}_1 &= \lambda[-1 + \alpha f(u_1(t-1)) - \beta g(u_1)]u_1 + d(u_2 r(u_2(t-h)) - u_1), \\ \dot{u}_2 &= \lambda[-1 + \alpha f(u_2(t-1)) - \beta g(u_2)]u_2 + d(u_1 r(u_1(t-h)) - u_2),\end{aligned}\quad (4)$$

при этом считается, что выполнены условия (2), (3), величина запаздывания удовлетворяет неравенству $0 < h < 1$, а на функцию $r(u) \in C^2(\mathbb{R}_+)$ накладываются следующие ограничения:

$$r(0) = 1, \quad r(u) = r_0 + O(1/u) \quad \text{при} \quad u \rightarrow +\infty.$$

Асимптотические методы, развитые в [1,2], позволяют свести систему (4) при $\lambda \gg 1$ к скалярному дифференциальному уравнению с импульсным воздействием и доказать теорему о соответствии между устойчивыми неподвижными точками оператора сдвига за период этой задачи и устойчивыми решениями системы (1). Показана зависимость динамики системы (4) от параметра запаздывания h и величины r_0 .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта ϵ 16-31-60039 мол_а_дк.

1. Глызин С. Д., Колесов А. Ю., Розов Н. Х. *Диф. уравн.* 2011. **47**. № 12. С. 1675–1692.
2. Глызин С. Д., Колесов А. Ю., Розов Н. Х. *Диф. уравн.* 2013. **49**. № 10. С. 1227–1244.

Теорема Гленсдорфа-Пригожина в описании треморограмм при физических возмущениях

Горбунов Д. В., Стрельцова Т. В., Пахомов А. А., Самсонов И. Н.

БУ ВО «Сургутский государственный университет», Сургут

В психологии и биомедицинских науках сейчас активно изучается статистическая неустойчивость различных выборок параметров гомеостаза. Например, любой интервал треморограммы (ТМГ) будет уникальным и невоспроизводимым, что и составляет эффект Еськова-Зинченко не только для статистических функций $f(x)$ выборок ТМГ, но и их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), автокорреляционных функций $A(t)$ и фрактальных размерностей [1]. Любой участок ТМГ, АЧХ, $A(t)$ будет уникальным, а любой анализ этого участка с позиции стохастического подхода будет применим только для конкретного интервала времени Δt_1 . В следующий момент времени Δt_2 все статистические параметры будут другими, и будут другие результаты стохастического анализа для ТМГ (на других интервалах времени $\Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_n$). В этой связи с позиций теории эффекта Еськова-Зинченко в биомеханике рассмотрена динамика поведения значений энтропий для ТМГ в режиме многократных ($N=225$) повторений опытов у одного испытуемого. Доказывается статистически достоверное совпадение E по 15-ти выборкам в каждой из 15-ти серий треморограмм. Стрессовое воздействие (5 мин. охлаждение конечности в воде при $t = 5^\circ\text{C}$) или физическая нагрузка не вызывают существенного изменения параметров

энтропий E для ТМГ в группах испытуемых при их сравнении с исходным (спокойным) состоянием. Высказывается необходимость применения других критериев оценки состояния гомеостаза [2, 3].

Из полученных результатов значений энтропии Шеннона E следует, что изменения значений E происходят обычно в сотых долях. Это доказывает ограниченность использования теоремы Гленсдорфа-Пригожина для измерения параметров гомеостаза биосистем complexity. Базовую теорему термодинамики неравновесных систем И.Р. Пригожина невозможно применять в биомеханике для оценки реакций гомеостаза на физические воздействия. Оценка изменений гомеостаза по параметрам треморограмм с помощью энтропии E не даст существенных результатов, теорема Гленсдорфа-Пригожина для биомеханических систем не применима, скорость P изменения энтропии $P = dE/dt = 0$ при любых изменениях гомеостаза (в разных состояниях равновесия).

1. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия* **2** (2015)
2. Еськов В.М., Еськов В.В., Вохмина Ю.В., Гавриленко Т.В. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия* **2** (2016)
3. Филатов М.А., Веракса А.Н., Филатова Д.Ю., Поскина Т.Ю. *Сложность. Разум. Постнеклассика* **1** (2016)

Нелинейные атомные колебания и фазовые переходы в растянутых углеродных цепочках

Чечин Г.М., Сизинцев Д.А., Усольцев О.А.

физический факультет ЮФУ, Ростов-на-Дону

Моноатомные углеродные цепочки могут существовать в двух различных структурных формах, карбина- α (полиина) и карбина- β (кумулена). В цепочках кумулена атомы углерода связаны друг с другом двойными химическими связями - $(=C=C=)_n$, а в цепочках полиина имеет место чередование одинарных и тройных связей - $(-C\equiv C-)_n$. Карбин обладает многими уникальными физическими свойствами (в частности, он является самым прочным из известных в настоящее время веществ), в силу чего считается перспективным материалом для создания различных нанотехнологических устройств.

В связи с экспериментальными трудностями получения карбина и исследования его физических свойств, большую роль при изучении этого материала играют методы математического моделирования.

В настоящей работе исследуются нелинейные атомные колебания в цепочках кумулена, подвергнутого однородному растяжению, с помощью первопринципного моделирования на основе теории функционала плотности. В процессе исследования нами [1], как и в работе [2], был обнаружен новый физический эффект, который заключается в том, что при растяжении кумулена (который является проводником) более 11 % происходит фазовый переход Пайерлса, который сопровождается удвоением примитивной ячейки и переходом его в состояние полиина (который является диэлектриком или полупроводником). В отличие от работы [2], этот результат был нами получен при анализе нелинейных атомных колебаний в режиме π -моды, которая является одной из трчх возможных в одномерных

цепочках с группой симметрии D_n нелинейных нормальных мод (ННМ) Розенберга [3]. При анализе амплитудно-частотных характеристик было обнаружено явление смягчения π -моды в определенном интервале еч амплитуд и вышеуказанный фазовый переход типа смещения является результатом конденсации этой мягкой моды. Физическое объяснение данного явления оказалось возможным дать в рамках простой модели точечных масс, взаимодействие между которыми описывается потенциалом Леннарда-Джонса. Такой подход позволяет проанализировать возможность конденсации при достаточно больших растяжениях кумулена и двух других симметрично-обусловленных ННМ Розенберга (им отвечает утроение и учетверение примитивной ячейки). В свою очередь, такая конденсация позволяет предположить, что в природе могут существовать и две другие модификации карбина, которые отличаются от полиина характером чередования коротких и длинных межатомных связей.

1. G. Chechin, D. Sizintsev, O. Usoltsev. *Letters on materials* **6** (2) (2016) 146
2. V.I. Artyukhov, M. Liu, and B.I. Yakobson. *Nano Lett.* **14** (2014) 4224
3. G.M. Chechin, D.S. Ryabov, K.G. Zhukov. *Physica D* **203**(3) (2005) 121

Буши нелинейных нормальных мод в монослойном графене

Щербинин С.А., Чечин Г.М., Рябов Д.С.

НИИ физики ЮФУ, Ростов-на-Дону

В работе исследуются нелинейные атомные колебания в монослое графена, подвергнутого однородному растяжению, которые отвечают специфическим динамическим режимам - нелинейным нормальным модам Розенберга [1] и бушам (кустам) таких мод [2-4]. Обычные линейные нормальные моды (ЛНМ) в гамильтоновой системе являются точными решениями лишь в гармоническом приближении. При учете в гамильтониане малых ангармонических членов между ЛНМ возникают взаимодействия, в результате чего они перестают быть точными решениями соответствующих динамических уравнений. В работах [2-4] была развита общая теория нелинейных колебаний в системах с дискретной симметрией, в рамках которой введена концепция бушей нелинейных нормальных мод (ННМ) и развиты теоретико-групповые методы их построения и исследования.

Каждый буш является *точным* решением динамических уравнений и представляет собой линейную комбинацию некоторого числа ННМ (это число m определяет размерность буша). Одномерные буши ($m=1$) суть индивидуальные нелинейные нормальные моды Розенберга [1], описывающие некоторые периодические динамические режимы, а буши большей размерности ($m>1$) определяют квазипериодические режимы с m базисными частотами в соответствующих спектрах Фурье. Каждый буш обладает своей собственной группой симметрии, которая является подгруппой пространственной группы равновесного состояния системы. Энергия начального возбуждения буша и состав входящих в него ННМ сохраняются в процессе временной эволюции, в то время как их амплитуды осциллируют в соответствии с характером взаимодействия между этими модами. В работах [2-4] с помощью теоретико-групповых методов было доказано, что только конечное число бушей ННМ каждой конкретной размерности может существовать в любой данной физической системе с дискретной симметрией.

Нами показано [5], что в однослойном графене (пространственная группа $P6mm$) могут существовать только 4 одномерных буша (симметрично-обусловленных ННМ Розенберга), 14 двумерных, 1 трехмерный и 6 четырехмерных бушей колебательных ННМ. С помощью первопринципного компьютерного моделирования на основе теории функционала плотности, нами исследованы динамические свойства бушей ННМ малой размерности в монослоях графена, подвергнутого однородным растяжениям различной величины.

1. R.M. Rosenberg. *J.Appl. Mech.* **29** (1962) 7
2. В.П. Сахненко, Г.М. Чечин. *ДАН* **330** (1993) 308
3. В.П. Сахненко, Г.М. Чечин. *ДАН* **338** (1994) 42
4. G.M. Chechin, V.P. Sakhnenko. *Physica D* **117** (1998) 43
5. G.M. Chechin, D.S. Ryabov, S.A. Shcherbinin. *Letters on materials* **6** (1) (2016) 9

Нелинейные волновые процессы в магнитных микроструктурах и функциональные элементы магноники

Шараевский Ю.П.¹, Бегинин Е.Н.¹, Морозова М.А.¹, Никитов С.А.^{1,2}, Садовников А.В.^{1,2}, Романенко Д.В.¹

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского; ² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Представлены результаты исследований нелинейных спин-волновых процессов в актуальной быстроразвивающейся области спинэлектроники и магнитоэлектроники-магноники [1].

Обсуждаются экспериментальные методы исследований, в частности, метод спектроскопии Бриллюэна-Мандельштама, и теоретические подходы для описания нелинейных процессов, связанных с распространением спиновых волн в магнитных микроструктурах, в том числе широко используется метод связанных волн и численное моделирование. Рассмотрены особенности нелинейных явлений и механизмы образования солитонов в распределенных периодических системах, в нерегулярных волноведущих системах и в активных кольцевых схемах на основе магнитных микроструктур. В частности, подробно теоретически и экспериментально исследованы такие структуры как одномерные магнонные кристаллы, связанные периодические структуры, решетка латерально-связанных волноводов и др. Рассмотрены перспективы создания на основе указанных структур нелинейных устройств с широкими функциональными возможностями (нелинейных переключатель, многоканальный делитель мощности, шумоподаватель и др.)

Приводятся результаты исследования управляемых волноведущих структур на основе мультиферроидных систем (магнонный кристалл-сегнетоэлектрик) и ферромагнитных волноводов сложной конфигурации. Обсуждаются возможности применения таких структур для создания новой элементной базы на принципах магноники для систем обработки и передачи информации.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ (грант 16-19-10283), РФФИ (гранты 14-02-00577-а, 16-29-14201-офи-м).

1. Никитов С.А., Калябин Д.В., Лисенков И.В. и др., *УФН* **185** (2015) 1099Ц1128

Алфавитный указатель

- Fuks M., 8
- Schamiloglu E., 8
- Smyk M.K., 6
- van Luijtelaar G., 6
- Адилова А.Б., 10
- Алешин К.Н., 6, 9
- Алиев А.А., 10
- Алиев Н.Ш., 12
- Андреев А.В., 13
- Андреев Ю.В., 5
- Аникин В.М., 15
- Анищенко В.С., 5
- Антоновская О.Г., 10
- Анчиков Д.А., 13
- Аркадакский С.С., 15
- Астахов В.В., 6, 10, 11, 14, 15
- Астахов О.В., 15
- Астахов С.В., 6, 10, 11, 15
- Бадарин А.А., 10
- Байкенов Е.Ж., 11
- Бакунин В.Л., 7
- Балакин М.И., 10
- Башкатова Ю.В., 10
- Бегинин Е.Н., 11–13, 16
- Безручко Б.П., 12
- Белякин С.Т., 10
- Берестин Д.К., 10
- Бичурин М.И., 11
- Богаевская В.Г., 10
- Болдырева Н.В., 10
- Болотов М.И., 10
- Большаков Д.И., 11
- Бух А.В., 5
- Вадивасова Т.Е., 5
- Ван Рейн К.М., 11
- Веларде М.Г., 5
- Вершинина О.С., 11
- Вилков М.Н., 7
- Волобуев Д.М., 6
- Волощук С.С., 10
- Вохмина Ю.В., 10, 11
- Высоцкий С.Л., 8, 14
- Габриелян Г.А., 11
- Гавриленко Т.В., 11
- Гайко В.А., 15
- Герасимов М.Ю., 8
- Герасимова С.А., 10
- Гинзбург Н.С., 7, 8, 11
- Глызин С.Д., 16
- Глявин М.Ю., 7
- Гонченко А.С., 7
- Гонченко С.В., 7
- Горбунов Д.В., 16
- Горюнов В.И., 10
- Грачев А.А., 11
- Григоренко В.В., 10
- Григорьев А.В., 6
- Гринес Е.А., 15
- Гришин С.В., 7, 8, 14
- Грищенко А.А., 11
- Грубов В.В., 13, 14
- Гулай А.П., 6
- Гурия Г.Т., 10, 15
- Дворак А.А., 10, 11
- Денисов Г.Г., 7
- Денисов С.В., 11
- Дмитриев А.С., 8, 9
- Дмитриев Б.С., 8
- Дорошенко В.М., 11
- Дрогайцева О.В., 13
- Дубинов А.Е., 12
- Дубовик М.Н., 7
- Дудко Г.М., 14
- Дыкин В.С., 13
- Еськов В.В., 11, 12
- Еськов В.М., 5, 11
- Ефремова Е.В., 8
- Жалнин А.Ю., 15
- Журавлев М.О., 13, 14
- Завершинский Д.И., 15

- Зайцев В.В., 6, 15
Захаров Д.Г., 5
Захаров С.А., 11
Захарова А.С., 5
Зверев В.В., 7, 11
Зинченко Ю.П., 5
Зотова И.В., 7, 8
- Иванченко М.В., 4, 10, 11
Изможеров И.М., 11
Изможеров И.М., 11
Иовин Д.Е., 5
Исаева О.Б., 11, 12
Исков В.В., 8
- Казаков А.О., 13, 15
Калякулина А.И., 9
Караваев А.С., 9, 13
Каткова О.С., 11
Кашенко И.С., 15
Кирсанов Д.В., 9, 10
Клиньшов В.В., 15
Клюс И.В., 10
Ковалев Н., 8
Кожевников А.В., 8, 14
Козлов С.П., 7
Колесов А.Ю., 16
Колоскова А.Д., 11
Копылов Ф.Ю., 10
Кораблина Т.В., 5
Корнилов М.В., 6
Короновский А.А., 8, 10, 13
Коротков А.Г., 13
Костюк А.В., 13
Кочанов А.А., 10
Кочаровская Е.Р., 11
Краузин П.В., 11
Краузина М.Т., 11
Кренц А.А., 13
Круглов В.П., 11
Крылов С.Н., 12
Кузнецов А.П., 11–13
Кузнецов М.Б., 9
Кузнецов С.П., 10–12, 14, 15
Кузнецова Г.Д., 11
Кульминский Д.Д., 9
Купцов П.В., 10
Купцов С.Н., 15
- Курилович А.А., 6
Куркин С.А., 10, 12
Курманов И.Г., 10
Курушина С.Е., 13
- Леванова Т.А., 13
Литвиненко А.Н., 14
- Майстренко Ю.Л., 5
Макаренко Н.Г., 7
Макаров В.В., 9, 10
Мантуров А.О., 6, 13
Мартышкин А.А., 12
Марушкина Е.А., 16
Масленников О.В., 15
Матвеев О.В., 7
Матросов В.В., 6, 9, 10
Медведева Т.М., 7, 8, 12
Мельникова М.М., 7
Мишагин К.Г., 6
Мищенко М.А., 6, 11
Молевич Н.Е., 15
Морозова М.А., 7, 16
Москаленко О.И., 11, 13
Мусатов В.Ю., 13
Мясин Е.А., 7
- Недайвозов В.О., 9, 10
Некоркин В.И., 9, 15
Непеина К.С., 6
Нерети А.А., 5
Никитов С.А., 7, 14, 16
Новожилова Ю.В., 7
- Обычев М.А., 11
Одинцов С.А., 12
Осипов Г.В., 9, 10, 13, 15
- Павлов Е.С., 7, 14
Панкратова Е.В., 9
Пахомо А.А., 16
Петрик А.Г., 12
Петров Р.В., 11
Петровский С.А., 5
Полежаев А.А., 9
Пономаренко В.И., 6, 9, 13
Пономаренко В.П., 12
Прохоров М.Д., 9, 13
Пчелинцева С.В., 13, 14

- Ревин И.Е., 13
Ремизов А.С., 15
Розенталь Р.М., 8
Розов Н.Х., 16
Романенко Д.В., 7, 8, 12, 16
Романец И.А., 10
Руннова А.Е., 13, 14
Рыскин Н.М., 7, 10
Рябов Д.С., 16
Рящиков Д.С., 15

Савин А.В., 12, 13
Савин Д.В., 11, 12
Савкин Л.В., 12
Садовников А.В., 13
Садовников А.В., 7, 11–14, 16
Садовников С.А., 8
Самсонов И.Н., 16
Санин А.Л., 4
Сафин А.Р., 11
Сахаров В.К., 8, 14
Седова Ю.В., 12
Селезнев Е.П., 7, 12, 15
Сельский А.О., 12
Семенов В.В., 5
Семенова Н.И., 5
Сергеев А.С., 7, 8
Сидак Е.В., 12
Сизинцев Д.А., 16
Ситникова Е.Ю., 13, 14
Скакун А.А., 6
Скороходов В.Н., 8
Славин А.Н., 14
Слепнев А.В., 5
Смагина Е.С., 5
Смирнов Д.А., 12
Смирновский А.А., 4
Станкевич Н.В., 11
Стогний А.И., 8
Стрельцова Т.В., 12, 16
Сулов И.В., 6
Сысоев И.В., 6–8, 11, 12
Сысоева М.В., 6, 12

Татаренко А.С., 11
Тиберкевич В., 14
Титов А.В., 8, 15
Трубецков Д.И., 4
Трубецкова Е.Г., 4
Усольцев О.А., 16

Фельк Е.В., 12
Филатова Д.Ю., 10, 12
Филатова О.Е., 5
Филимонов Ю.А., 7, 8, 14
Филиппов Б.Н., 7, 11
Флейшман А.Н., 5
Фокин А.П., 7
Фролов Н.С., 8, 12

Хадарцев А.А., 5
Хаджиева Л.М., 11
Харченко А.А., 13
Хивинцев Ю.В., 8, 14
Химин Р., 14
Хорев В.С., 9, 13
Храмов А.Е., 8–10, 13, 14
Хутиева А.Б., 13

Царев В.А., 4

Чекмарева А.Ж., 13
Чертовских Р.А., 13
Четвериков А.П., 5
Чечин Г.М., 16

Шабунин А.В., 5
Шакиров А.Р., 13
Шалфеев В.Д., 6
Шаповалова Е.А., 13
Шаповалова Ю.А., 13
Шараевская А.Ю., 12, 13
Шараевская Ю.П., 12
Шараевский Ю.П., 11, 16
Шель Э., 5
Шепелев И.А., 5
Шилин А.Н., 15

Щербинин С.А., 16

Эбелинг В., 5
Юсипов И.И., 10

Научное издание

XI МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ

“ХАОТИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР”

ХАОС-2016

МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ