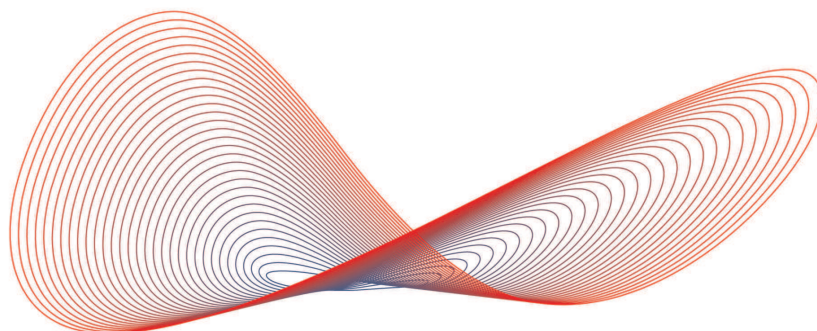


ХІІ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ  
“ХАОТИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР”  
12TH INTERNATIONAL SCHOOL ON “CHAOTIC OSCILLATIONS AND PATTERN  
FORMATION”

**ХІІ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ**  
**ХАОС – 2019**  
01.10.2019  
06.10.2019  
**ХАОТИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР**



МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ  
ПРЕДПРИЯТИЕ «АЛМАЗ»



1 – 6 октября 2019

САРАТОВ

УДК 517.9, 530.1

М34 Материалы XII Международной школы-конференции “Хаотические автоколебания и образование структур” (ХАОС-2019), 1–6 октября 2019, Саратов. Саратов: ООО “Издательский центр “Наука” ISBN 978-5-9999-1023-3

**Редакционная коллегия:**

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

Ответственный за выпуск – доцент Е.Н. Егоров

Оригинал–макет подготовлен в пакете  $\text{\LaTeX}$

Е.Н. Егоров, А.О. Сельский

**Организаторы:**

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Факультет нелинейных процессов

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

**При финансовой поддержке:**

АО “НПП “Алмаз”

АО “НПП “Исток” им. Шокина

АО “НПП “Торий”

---

**ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**

---

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

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

Борисов А.А., ген. директор АО “Росэлектроника”, Москва, 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., профессор, 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 (заместитель председателя);

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

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь;

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

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

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

Храмов А.Е., д.ф.-м.н., профессор, Университет Иннополис, Иннополис, Россия.

---

**ПРОГРАММА**  
**XII МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ**  
**“ХАОТИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР”**  
**ХАОС-2019**  
 (Саратов, пансионат “Волжские дали”, 1 – 6 октября 2019 года)

*Посвящается 110-летию Саратовского университета  
и 25-летию факультета нелинейных процессов*

1 октября 2019 г., вторник

---

09.00 – 13.00    **РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ**

15.30 – 16.00    **ОТКРЫТИЕ ШКОЛЫ**

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**

**Фундаментальные проблемы нелинейной динамики**

---

16.00 – 16.50    **Аникин В.М.** (СГУ, Саратов) Нелинейная физика на шестом съезде Рос-сийской ассоциации физиков (К 100-летию Российской ассоциации физиков) 13

17.00 – 17.50    **Трубецков Д.И.**, Вдовина Г.М. (СГУ, Саратов). Хаос и фракталы в идеях, лицах и судьбах. Лекция 1. 15

2 октября 2019 г., среда

---

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**

**Фундаментальные проблемы нелинейной динамики**

---

09.00 – 09.50    **Гонченко С.В.** (ННГУ, Н. Новгород) О некоторых новых результатах в теории многомерного хаоса 16

10.00 – 10.50    **Анищенко В.С.**, Бух А.В. (СГУ, Саратов) Автоволновые структуры, включая химерные, в двумерных ансамблях связанных осцилляторов. 17

11.00 – 11.50    **Кузнецов С.П.** (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Автоколебательные системы, генерирующие гиперболический хаос. 18

12.00 – 12.50    **Храмов А.Е.** (Университет Иннополис, Иннополис) Планирование моторной деятельности человека: от нейроинтерфейсов к нейрореабилитации. 19

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:****Нелинейная динамика живых систем, окружающей среды и общества**

- 14.20 – 15.10 **Трубецков Д.И.**, Вдовина Г.М. (СГУ, Саратов). Хаос и фракталы в идеях, лицах и судьбах. Лекция 2. 15
- 15.20 – 16.10 **Малков С.Ю.** (МГУ, Москва) Использование методов хаотической динамики для анализа и моделирования социально-политических процессов. 19

16.30 – 19.00 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ****СЕКЦИЯ 1.****Нелинейная динамика живых систем, окружающей среды и общества**

- 1 **Сельский А.О.**, Емельянова Е.П., Руннова А.Е., Журавлев М.О. (СГУ, Саратов) Рекуррентный анализ для обработки МЭГ данных головного мозга человека. 22
- 2 **Сысоева М.В.**, Сысоев И.В., С.М. van Rijn (СГТУ, Саратов) Перестройка осцилляторных сетей в мозге у крыс под воздействием агонистов эндоканнабиноидных рецепторов. 23
- 3 **Короновский А.А. мл.** (СГУ, Саратов) Корреляционный анализ нестационарных физиологических временных рядов. 24
- 4 Алимпиева М.А., **Морозова С.В.**, Завьялова Е.В. (СГУ, Саратов) Дисперсионный анализ как метод оценки нелинейных взаимодействий между элементами земной климатической системы. 25
- 5 **Большаков Д.И.**, Мищенко М.А., Матросов В.В. (ННГУ, Н. Новгород) Нейроноподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимом. 26
- 6 **Емельянова Е.П.**, Руннова А.Е., Журавлев М.О., Сельский А.О. (СГУ, Саратов) Использование математических методов при обработке ЭЭГ данных головного мозга. 27
- 7 **Рожнова М.А.**, Казанцев В.Б., Панкратова Е.В. (ННГУ, Н. Новгород) Влияние вне-клеточной среды на статистические характеристики нейронной активности. 28
- 8 **Сапега Т.С.**, Гурия Г.Т. (НМИЦ, Москва) Нестабильности в динамике каскада внутриклеточной сигнализации PI3K-Akt-mTOR. 29
- 9 **Флейшман А.Н.** (НИИ КППЗ, Новокузнецк) Вариабельность ритма сердца как универсальный инструмент анализа в медицине, психологии и экологии. Прогностические и социальные аспекты. 30
- 10 **Чернец Е.П.**, Боровкова Е.И., Караваев А.С. (СГУ, Саратов) Сравнение сигналов дыхания, зарегистрированных датчиком рекурсии дыхания и датчиком потока дыхания по давлению. 30
- 11 **Якупов Э.О.**, Полежаев А.А., Губернов В.В. (ФИ РАН, Москва) Исследование механизма формирования структур на фронте горения. 31

---



---

 3 октября 2019 г., четверг
 

---



---

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**

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

---

- |               |  |    |
|---------------|--|----|
| 09.00 – 09.50 | <b>Глявин М.Ю.</b> , Денисов Г.Г. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Гиротроны: от прошлого к настоящему и будущему.   | 32 |
| 10.00 – 10.50 | <b>Гинзбург Н.С.</b> , Зотова И.В., Сергеев А.С. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Микроволновые солитоны.  |    |
| 11.00 – 11.50 | Адилова А.Б., Балакин М.И., Герасимова С.А., <b>Рыскин Н.М.</b> (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Синхронизация генераторов, связанных с задержкой.  | 34 |
| 12.00 – 12.50 | Дудко Г.М., Кожевников А.В., Сахаров В.К., Высоцкий С.Л., Павлов Е.С., Никулин Ю.В., Селезнев М.Е., Хивинцев Ю.В., <b>Филимонов Ю.А.</b> (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Нелинейные магнитные колебания и волны в магнитных микро- и наноструктурах. | 36 |
| <hr/>         |  |    |
| 14.00 – 14.50 | <b>Царев В.А.</b> (СГТУ, Саратов) Фрактальная геометрия, многомодовые двухзачорные резонаторы и мощные многолучевые клистроны.   | 36 |
| 15.00 – 15.50 | <b>Гришин С.В.</b> , Бир А.С., Москаленко О.И., Романенко Д.В., Скороходов В.Н., Дмитриев Б.С. (СГУ, Саратов) Хаотические диссипативные солитоны и многосолитонные комплексы в спин-волновых и вакуумных генераторах.                      | 37 |

16.00 – 18.00 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

---

**СЕКЦИЯ 2.**

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

---

- |   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | <b>Бакунин В.Л.</b> , Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Захват частоты многомодового гиротрона квазимонохроматическим внешним сигналом.  | 38 |
| 2 | <b>Бир А.С.</b> , Гришин С.В. (СГУ, Саратов) Генерация темных многосолитонных комплексов в магнетронном кольцевом резонаторе с управлением дисперсией и конкурирующими нелинейными спин-волновыми взаимодействиями.     | 40 |
| 3 | Царев В.А., <b>Мучкаев В.Ю.</b> (СГТУ, Саратов) Исследование эффективности отбора энергии от электронного потока в четырехзачорном фотонно-кристаллическом резонаторе, установленном на выходе многолучевого клистроны. | 41 |

- 
- |   |   |    |
|---|---|----|
| 4 | Ростунцова А.А., <b>Рыскин Н.М.</b> (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Автомодельные режимы усиления и генерации коротких импульсов электронными потоками.   | 42 |
| 5 | <b>Шалаев П.Д.</b> (АО “НПП “Алмаз”, Саратов) Уменьшение нелинейных искажений сигналов в ЛБВ О-типа методом замещения сигналов.   | 42 |
| 6 | <b>Мартышкин А.А.</b> , Одинцов С.А., Губанова Ю.А., Бегинин Е.Н., Шешукова С.Е., Никитов С.А., Садовников А.В. (СГУ, Саратов) Пространственно- и частотно-селективные режимы спин-волнового транспорта в магнитных микроструктурах.                | 43 |
| 7 | <b>Фунтов А.А.</b> (СГУ, Саратов) О нелинейной теории двухрезонаторного клистрона с пространством дрейфа в виде среды с комплексной диэлектрической проницаемостью.   | 44 |
| 8 | <b>Садовников А.В.</b> , Грачев А.А., Одинцов С.А., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П. (СГУ, Саратов) Обработка информационных сигналов в реконфигурируемых многоуровневых магнитных сетях на основе трехмерных решеток магнитных микро- и наноструктур. | 45 |

18.00 – 19.00 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

---

### СЕКЦИЯ 3.

#### Фундаментальные проблемы нелинейной науки

---

- |   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | Кузнецов С.П., <b>Тюрюкина Л.В.</b> (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Модель Рабиновича-Фабриканта и ее обобщение на общий случай.                                 | 46 |
| 2 | <b>Кащенко И.С.</b> (ЯрГУ, Ярославль) Некоторые особенности динамики уравнения с двумя запаздываниями.   | 48 |
| 3 | <b>Купцов П.В.</b> , Кузнецов С.П. (СГТУ, СФ ИРЭ РАН, Саратов) Сценарий перехода к гиперболическому гиперхаосу в неавтономной системе с запаздыванием. | 49 |
| 4 | Аникин В.М., Аркадакский С.С., <b>Ремизов А.С.</b> (СГУ, Саратов) Об условиях топологической сопряженности одномерных хаотических отображений.         | 50 |
| 5 | <b>Санин А.Л.</b> (СПБПУ, Санкт-Петербург) Ангармонические осцилляторы в контексте квантового уравнения Ланжевена.                                     | 51 |

4 октября 2019 г., пятница

---

#### **ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**

#### **Распределенные системы и ансамбли связанных элементов со сложной динамикой, синхронизация**

---

- |               |  |    |
|---------------|--|----|
| 09.00 – 09.50 | <b>Волков Е.И.</b> (ФИ РАН, Москва) Что может дать механизм взаимодействия бактерий (quorum sensing) для генерации разнообразия и мультистабильности динамики взаимодействующих одинаковых осцилляторов. | 52 |
| 10.00 – 10.50 | <b>Мазуров М.Е.</b> (РЭУ, Москва) Нелинейные вогнутые спиральные автоволны, переносящие энергию и их приложения.   |    |

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:****Нелинейная динамика и информационные технологии**

- 11.00 – 11.50 **Макаренко Н.Г.** (ГАО РАН, Санкт-Петербург) Графодинамика распределенных систем. 53

**Фундаментальные проблемы нелинейной науки**

- 12.00 – 12.50 **Семенов М.Б.,** Роцин С.Ю., Кревчик В.Д., Кусмарцев Ф.В., Шорохов А.В. (ПГУ, Пенза) Экономическая физика сегодня: проблемы и перспективы. 55

14.30 – 16.30 **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ****СЕКЦИЯ 4.****Распределенные системы и ансамбли связанных элементов со сложной динамикой, синхронизация**

- 1 **Глызин С.Д.,** Колесов А.Ю. (ЯрГУ, Ярославль) Релаксационные колебания в моделях генных сетей. 56
- 2 **Горюнов В.Е.** (ЯрГУ, Ярославль) Сложные пространственно неоднородные режимы одного класса распределенных биофизических моделей. 57
- 3 **Ивановский Л.И.** (ЯрГУ, Ярославль) Бифуркационные особенности одной краевой задачи с нелинейным отклонением в краевом условии. 58
- 4 **Круглов В.П.,** Кузнецов С.П. (СФ ИРЭ РАН, Саратов; УдГУ, Ижевск) Цепочка локально связанных консервативных осцилляторов с инволюцией Топажа - Пиковского 59
- 5 **Кульминский Д.Д.,** Пономаренко В.И., Сысоев И.В., Прохоров М.Д. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Экспериментальная установка для исследования больших ансамблей электронных генераторов с большим количеством связей. 60
- 6 **Панкратова Е.В.,** Калякулина А.И., Стасенко С.В., Гордлеева С.Ю., Лазаревич И.А., Казанцев В.Б. (ННГУ, Н. Новгород) Особенности нейронной синхронизации в нейрон-астроцитарных сетях. 61
- 7 **Смирнов Д.А.** (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Краткосрочные и долгосрочные характеристики направленных связей. 62
- 8 **Сысоев И.В.,** Сысоева М.В., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Реконструкция модельных нейроосцилляторов при наличии неизвестных собственных нелинейных функций и функций связи. 63

17.00 – 19.00 **Стендовые доклады**

- 1 **О.Г. Антоновская** (ННГАСУ, Н. Новгород). О качественном исследовании системы синхронизации с комбинированным управлением. 64
- 2 **Астахов О.В.,** Селезнев Е.П., Станкевич Н.В. (СГУ, Саратов) Исследование синхронизации многоконтурных генераторов: схмотехническое моделирование. 65



- 3 **Голоколенов А.В.**, Савин Д.В. (СГУ, Саратов) Устройство фазового пространства слабодиссипативного осциллятора Ван дер Поля под внешним импульсным воздействием специального вида. 65
- 4 **Грачев А.А.**, Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Сердобинцев А.А., Шешукова С.Е., Никитов С.А. (СГУ, Саратов) Управляемая локальными деформациями спин-волновая связь в латеральных магнонных кристаллах. 67
- 5 **Грищенко А.А.**, Медведева Т.М., van Rijn С.М., Сысоева М.В., Сысоев И.В. (СГУ, СФ ИРЭ РАН, Саратов) Определение времени запаздывания для моделирования спайк-волновых разрядов по экспериментальным данным. 68
- 6 **Губанова Ю.А.**, Мартышкин А.А., Одинцов С.А., Бегинин Е.Н., Садовников А.В. (СГУ, Саратов) Пространственно-частотная селекция и направленное ответвление спиновых волн в магнотно-кристаллической структуре. 68
- 7 **Губанов В.А.**, Одинцов С.А., Шешукова С.Е., Садовников А.В. (СГУ, Саратов) Исследование динамики распространения спиновых волн в градиентной мультиферро-идной структуре на основе нерегулярного ферритового микроволновода с изменяющейся шириной. 69
- 8 **Гулай А.П.**, Астахов С.В., Астахов В.В. (СГТУ, Саратов) Особенности формирования режима бистабильности в системе осцилляторов ван дер Поля с запаздывающим взаимодействием. 70
- 9 **Евстифеев Е.В.**, Москаленко О.И. (СГУ, Саратов) Определение характеристик пере-межающейся обобщенной синхронизации при помощи непрерывного вейвлет-преобразования. 71
- 10 **Елистратов А.А.**, Савин Д.В. (СГУ, Саратов) Динамика неявного отображения, ассоциирующегося с применением методов Ньютона и Эйлера для решения уравнений на комплексной плоскости. 72
- 11 **Емелин Е.А.**, Мищенко М.А. (ННГУ, Н. Новгород) Исследование эффекта дрейфа в зрительной рабочей памяти в нейронной сети с кольцевой архитектурой. 73
- 12 **Исаева О.Б.**, Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С., Рожнев А.Г. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Анализ неустойчивости сложной динамики по временным рядам на примере приборов СВЧ. 74
- 13 **Исаева О.Б.**, Кузнецов С.П. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Исследование путей перехода к ги-перболическому и почти гиперболическому хаосу. 75
- 14 **Истомина Н.Л.** (МУГиК, Москва) Современные подходы к синтезу МЭМС методом трехмерной нанопечати (обзор технологий). 76
- 15 **Ковалева Н.С.**, Мищенко М.А., Матросов В.В. (ННГУ, Н. Новгород) Конкурентная динамика кластеров в сети нейроподобных генераторов. 77
- 16 **Круглов В.П.**, Сатаев И.Р. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Соленоиды Смейла Ч Вильямса в автономной модели связанных осцилляторов с гомоклинической бифуркацией “восьмерки”. 78
- 17 **Крылов С.Н.**, Смирнов Д.А., Безручко Б.П. (СГУ, Саратов) Эффект ложных связей между осцилляторами в зависимости от длины временного ряда и измерительного шума. 79
- 18 **Крылосова Д.А.**, Селезнев Е.П., Станкевич Н.В. (СарГУ, СФ ИРЭ РАН, СарГТУ, Саратов) Вынужденные колебания диссипативного осциллятора при управлении фазой и частотой внешнего воздействия. 80

- 
- 19 **Лобанов Н.Д.**, Матвеев О.В., Морозова М.А. (СГУ, Саратов) Управление характеристиками запрещенных зон в слоистой структуре Металлоповерхность-Магнетонный кристалл. 81
  - 20 **Мартышкин А.А.**, Грачев А.А., Шешукова С.Е., Садовников А.В. (СГУ, Саратов) Исследование спин-волнового транспорта в индуцированных локальными деформациями магнитных структурах с нарушением трансляционной симметрии. 82
  - 21 Морозова М.А., Романенко Д.В., **Матвеев О.В.**, Шараевская А.Ю., Шаравский Ю.П. (СГУ, Саратов) Управление запрещенными зонами в композитной структуре магнетонный кристалл - полупроводник. 84
  - 22 Морозова М.А., **Матвеев О.В.** (СГУ, Саратов) Эффекты нелинейного переключения в структуре магнетонный кристалл - ферромагнитная пленка. 85
  - 23 Морозова М.А., **Матвеев О.В.** (СГУ, Саратов) Мультиферроидный спин-волновой мемристор на основе структуры магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик - магнетонный кристалл. 86
  - 24 Морозова М.А., **Матвеев О.В.** (СГУ, Саратов) Спектр гибридных электромагнитно-спиновых волн в нелинейной структуре магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик. 87
  - 25 **Обычев М.А.**, Исаева О.Б., Пономаренко В.И. (СГУ, Саратов) Конструирование радиофизической системы в виде сети связанных колебательных элементов, демонстрирующей комплексную аналитическую динамику. 88
  - 26 **Одинцов С.А.**, Бегинин Е.Н., Садовников А.В. (СГУ, Саратов) Спин-волновой транспорт в системе с кольцевым магнетонным микроволноводом. 89
  - 27 **Плотникова А.Д.**, Москаленко О.И. (СГУ, Саратов) Влияние времени запаздывания на установление обобщенной синхронизации в системах с отклоняющимся аргументом. 90
  - 28 Кузнецов А.П., **Попова Е.С.**, Станкевич Н.В. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Хаос с нулевым показателем Ляпунова в трехмерных дискретных осцилляторах. 91
  - 29 **Преображенская Н.В.**, Рыскин Н.М., Глявин М.Ю., Новожилова Ю.В. (СГУ, Саратов) Влияние внешнего сигнала на процессы установления колебаний в многомодовом гиротроне. 92
  - 30 **Саломатова Е.И.**, Одинцов С.А., Садовников А.В. (СГУ, Саратов) Динамика спиновых волн в многослойной структуре YIG-FeRh. 93
  - 31 **Сатаев И.Р.**, Исаева О.Б. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Отображение Бернулли с "дыркой" и седло-узловой сценарий рождения гиперболического аттрактора Смейла-Вильямса. 94
  - 32 **Седова Ю.В.**, Кузнецов С.П., Круглов В.П. (СФ ИРЭ РАН, Саратов; УдГУ, Ижевск) Грубый гиперболический хаос в системах на основе маятника Фруда. 95
  - 33 Хивинцев Ю.В., Никулин Ю.В., Сахаров В.К., **Селезнев М.Е.**, Высоцкий С.Л., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А., Павлов Е.С. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Детекторы спиновых волн на основе структур ЖИГ/n-InSb и ЖИГ/Pt. 95
  - 34 Алмаев И.А., Данилов А.Б., Золотых Д.Н., Роговин В.И., **Симонова Ю.В.** (АО "НПП "Алмаз", Саратов) Особенности проектирования сверхширокополосной ( $\Delta f = 100\%$ ) ЛБВ средней мощности С-Ку диапазона. 96
  - 35 **Фадеева Н.С.**, Астахов С.В., Астахов В.В. (СГТУ, Саратов) Установление режима синхронизации в генераторе Ван дер Поля с дополнительным колебательным контуром в цепи обратной связи. 96

- 
- 36 **Фильченков И.О.**, Одинцов С.А., Садовников А.В. (СГУ, Саратов) Микромагнитное моделирование спин-волнового Фано-резонанса в нерегулярной волноводной структуре. 97
- 37 Курушина С.Е., Шаповалова Е.А., **Шаповалова Ю.А.** (СНИУ, Самара) Перемежаемость упорядоченной и разупорядоченной фаз в стохастической пространственно распределенной системе. Зарождение беспорядка. 98
- 38 Кузнецов А.П., Станкевич Н.В., **Щеголева Н.А.** (СГУ, Саратов) Классификация хаотических аттракторов в связанных квазипериодических генераторах. 99
- 39 Навроцкая Е.В., **Мартынов А.Д.**, Сафаров Е.Г., Поварова Т.В. (СГУ, Саратов) Исследование взаимодействия подсистем вегетативной регуляции сердечного ритма и сосудистого тонуса при выполнении функциональных проб. 100
- 40 Савин А.В., **Любченко Д.О.** (СГУ, Саратов) Динамика системы “гофрированный волновод” с осциллирующей границей. 102
- 41 **Изможеров И.М.**, Байкенов Е.Ж., Зверев В.В. (УрФУ, Екатеринбург) Типы сложной динамики трехмерных вихревых структур в движущихся доменных границах в магнитных плчнках. 103
- 42 **Балакин М.И.**, Блохина Е.В., Коськин Е.В., Рыскин Н.М. (СГТУ, Саратов) Синхронизация в ансамблях систем с ФАПЧ в присутствии шума. 104
- 43 **Мартынов А.Д.**, Сафаров Е.Г., Навроцкая Е.В., Безручко Б.П. (СГУ, Саратов) Анализ связанности фаз низкочастотных ритмов нервной регуляции системы кровообращения у здоровых испытуемых при выполнении функциональных проб. 104
- 44 **Дворцов А.А.**, Савин А.В. (СГУ, Саратов) Иллюстрации скорости диффузии в фазовом пространстве стандартного отображения. 106
- 45 **Храмков А.Н.**, Мартынов А.Д., Ежов Д.М., Навроцкая Е.В., Поварова Т.В. (СГУ, Саратов) Исследование влияния функциональной дыхательной пробы на структуру взаимодействия низкочастотных ритмов ЭЭГ и контуров вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы здоровых испытуемых. 107
- 46 **Храмков А.Н.**, Навроцкая Е.В., Синкин М.В., Безручко Б.П. (СГУ, Саратов) Применение метода оценки связности основанного на моделировании фазовой динамики для анализа взаимодействия ритмов ЭЭГ пациентов с пониженным уровнем сознания, страдающих эпилепсией. 108
- 47 **Савельев С.В.**, Морозова Л.А. (ФИРЭ РАН, Фрязино) Хаос в активных твердотельных системах. 109
- 48 **Кашенко С.А.** (ЯрГУ, Ярославль) Динамика системы из двух простейших автогенераторов с релейными запаздывающими обратными связями. 110
- 49 **Голубенец В.О.** (ЯрГУ, Ярославль) Релаксационные решения логистического уравнения с запаздыванием, зависящим от состояния. 110
- 50 Коротков А.Г.<sup>1</sup>, Казаков А.О.<sup>1,2</sup>, **Леванова Т.А.**<sup>1</sup> (<sup>1</sup>ННГУ, Н. Новгород; <sup>2</sup>НИУ ВШЭ, Н. Новгород) Влияние мемристорной связи на динамику ансамбля элементов ФитцХью-Нагумо. 111
- 51 **Журавлев М.О.**, Руннова А.Е. (СГУ, Саратов) Методы анализа электрической активности головного мозга человека для оценки объективных численных критериев колебательной активности на ЭЭГ сигналах. 112

- 
- 52 **Журавлев М.О.**, Сельский А.О., Руннова А.Е. (СГУ, Саратов) Исследование особенностей частотно-временной динамики данных ЭЭГ при двигательной активности пациента в постинсультном периоде. 113
- 53 **Ежов Д.М.**, Хамбеков Р.С., Навроцкая Е.В., Зеулина Е.Е., Безручко Б.П. (СГУ, Саратов) Изменение связности контуров симпатической регуляции сердечно-сосудистой системы человека во время спинальной и общей анестезии при урологических операциях. 114
- 54 **Ежов Д.М.**, Навроцкая Е.В., Безручко Б.П. (СГУ, Саратов) Анализ взаимодействия медленных ЭЭГ и контуров вегетативной регуляции кровообращения у больных в состоянии комы. 115

---

5 октября 2019 г., суббота

---

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**

**Нелинейная динамика живых систем, окружающей среды и общества**

---

- 09.00 – 09.50 **Гурия Г.Т.** (НМИЦ, Москва) Образование макроскопических структур в динамике свертывания крови.
- 10.00 – 10.50 **Слюняев А.В.** (ИПФ РАН, Н. Новгород) Волны-убийцы: в море и не только. 116

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**

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

---

- 11.00 – 11.50 **Некоркин В.И.** (ИПФ РАН) Частичная синхронизация и подавление колебаний в мультиплексных колебательных сетях с адаптивными связями. 117
- 12.00 **Щапин Д.С.**, Дмитричев А.С., Некоркин В.И. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Химерные состояния в сети двухчастотных автогенераторов. (доклад) 118

---

6 октября 2019 г., воскресенье

---

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ:**

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

---

- 09.00 – 09.50 **Кураев А.А.**, Матвеев В.В. (БГУИР, Минск) Несинхронное взаимодействие свободных электронов с электромагнитным полем излучения. Сферотрон.

## Нелинейная физика на шестом съезде Российской ассоциации физиков (К 100-летию Российской ассоциации физиков)

Аникин В. М.

*СарГУ, Саратов*

4-7 февраля 1919 г. в Петрограде по инициативе О.Д. Хвольсона, А.Н. Крылова и А.Ф. Иоффе состоялся организационный съезд послереволюционной Российской ассоциации физиков (РАФ). В докладе “О задачах съезда” Абрам Федорович Иоффе, говоря об открытых в 1918-1919 гг. новых физических институтах (Оптическом, Рентгенологическом и радиологическом, Биофизическом), выразил надежду, что эти институты “дадут возможность стать в уровень с мировой наукой”. Председатель съезда О. Д. Хвольсон отметил, что научная работа России не прервалась, несмотря на тяжелые условия, экономические трудности и блокаду. В резолюции съезда отмечалось, что организация новых научных учреждений “покрыла почти все поле физики”.

В течение 10 лет Ассоциация провела шесть съездов (они именовались съездами русских физиков): первый - в сентябре 1920 г. в Москве, второй - в 1921 г. в Киеве, третий - 17-21 сентября 1922 г. в Нижнем Новгороде (на базе Нижегородской лаборатории, созданной осенью 1918 г.), четвертый - 15-20 сентября 1924 г. в Ленинграде, пятый - 15-20 декабря 1926 г. в Москве, последний шестой съезд, - 4-15 августа 1928 г. в Москве и в поволжских университетских городах - Нижнем Новгороде, Казани и Саратове.

Шестой съезд выделялся широким представительством зарубежных участников (свыше 20 физиков из стран Европы и Америки), высокой научной значимостью представленных докладов (шесть участников съезда впоследствии были удостоены Нобелевской премии, а 22 человека избраны в Академию наук СССР), принятой и реализованной концепцией о развитии научных исследований в СССР на базе новых научных центров, создаваемых в географически провинциальных городах.

“Изюминкой” съезда стал “нелинейный формат” проведения съезда (так в современной терминологии именуют отличающуюся “перемежаемостью” организацию познавательного процесса). Во-первых, стационарные заседания съезда были разнесены по разным городам; во-вторых, активные научные дискуссии продолжались на палубе и каютах парохода “Алексей Рыков”, на котором по Волге путешествовал съезд (за границей его назвали Volga Congress); в третьих, форма дискуссий на пароходе, будучи одновременно полезной и непринужденной, перемежалась шутивными розыгрышами и купанием в Волге, гостеприимными и хлебосольными приветствиями “на местах”; в-четвертых, съезд завершила поездка на Кавказ. Все отзывы о съезде в зарубежных и отечественных журналах, а также в письмах к организаторам были исключительно положительны и носили восторженный характер. Поль Дирак, например, назвал поездку в СССР “pleasant holiday”.

В период съезда было сделано, по подсчетам секретаря съезда С. И. Вавилова, около 200 докладов. В Москве работало 10 секций: молекулярная физика, оптика, электромагнетизм, теоретическая физика, физическая химия, рентгеновские лучи, акустика, биофизика, геофизика, техническая физика. Многие доклады на съезде носили пионерский характер и касались фундаментальных и практически значимых проблем. Так, доклад П.А.М. Дирака “О квантовой механике электронов” представлен как раз в год создания им релятивистской квантовой теории электрона (Нобелевская премия 1933 г.); доклад Н. Н. Семенов “Взрывные реакции в газах” сделан в самый разгар построения отмеченной в 1956 г. Нобелевской премией теории разветвленных цепных реакций; доклад М. Борна “О

статистической интерпретации квантовой механики” сделан лишь два года спустя после открытия им этой интерпретации (Нобелевская премия 1954 г.).

С большим интересом на Шестом съезде был встречен доклад профессоров Московского университета Г. С. Ландсберга и Л. И. Мандельштама “Новое явление, сопровождающее рассеяние света” об открытии в феврале 1928 г. комбинационного рассеяния света кристаллами кварца и исландского шпата. Едва ли не главную причину, по которой наши физики остались тогда без Нобелевской премии, хотя и наблюдали эффект первыми, сформулировал Н. Д. Папалекси. По его словам, Л. И. Мандельштам “никогда не добивался внешних почестей, не стремился играть какой-либо роли, ему совершенно чужды были честолюбие и славолюбие”. Явление комбинационного рассеяния света нашло широчайшее применение в спектроскопических методах исследования в физике, химии, биологии и других науках. Обнаруженное в начале 1960-х годов вынужденное комбинационное рассеяние обладает явными признаками нелинейного физического эффекта. Термин “нелинейная оптика” в 1920-х годах ввел С. И. Вавилов, который на съезде представил доклад с красноречивым названием: “О возможных пределах применения оптического принципа суперпозиции”. И еще ряд докладов съезда относился к оптике и был посвящен вопросам взаимодействия излучения с веществом и определением характеристик вещества спектроскопическими и фотоэлектрическими методами.

Акцент доложенных на съезде радиофизических работ был сделан на решении проблем генерации, распространения и “действия” “ультракоротковолнового” (в терминологии того времени) излучения, или “кратчайших Гертцевых волн”, как было сказано в названии одного доклада (А. А. Глаголева-Аркадзева, М. Т. Грехова, Н. А. Капцов, М. А. Левитская, Г. В. Потапенко, Д. А. Рожанский, В. И. Романов). Шла “борьба” за сантиметровый диапазон. Можно отметить, что в конце XIX столетия корифей отечественной физики Петр Николаевич Лебедев создал установку для генерирования и приема излучения с длиной волны 6 и 4 мм, а также исследовал явления отражения, преломления, поляризации и интерференции этих волн.

А.А. Андронов, аспирант Л. И. Мандельштама, представил на съезде доклад о подготовленной им диссертации “Предельные циклы Пуанкаре и теория колебаний”, где им была впервые установлена связь между проблемами нелинейных колебаний и качественной теорией дифференциальных уравнений А. Пуанкаре. В этой работе А.А. Андронов ввел термин “автоколебания” (в оригинале - ауто-колебания). Автор отмечает: “Стационарные движения, которые устанавливаются в приборах, способных к ауто-колебаниям, соответствуют некоторым предельным циклам. Соображения, связанные с поведением интегральных кривых на плоскости, позволяют дать качественную теорию рассматриваемых процессов и высказывать относительно конкретных физических проблем некоторые общие заключения. С этой точки зрения рассмотрены вопросы “самовозбуждения”, “срыва” и “устойчивости” ауто-колебаний. В качестве реальных примеров рассмотрены катодный генератор и некоторые другие устройства. В заключение рассматриваются приближенные методы количественного решения задачи о ауто-колебаниях и устанавливается связь с работами других авторов, исследовавших частные случаи этих колебаний”. В 1929 г. работа А. А. Андропова “Предельные циклы Пуанкаре и теория колебаний” была опубликована в Докладах Парижской (Французской) академии наук. Последующая деятельность Л.И. Мандельштама и А. А. Андропова обеспечила им статус классиков нелинейной динамики.

Первым из участников Шестого съезда Нобелевскую премию в 1929 г. (за 1928 год!) получил О. У. Ричардсон за исследование явлений термоэмиссии и открытие закона, носящего его имя. В 1936 г. премией отмечен лектор съезда П. Й. В. Дебай за исследования

молекулярных структур и дифракции рентгеновских лучей и электронов в газах. Нобелевский лауреат 1962 г. Л. Д. Ландау на съезде в ранге аспиранта (помимо совместных докладов с Д. Д. Иваненко об “основаниях квантовой статистики” и принципе причинности в современной физике) представил доклад “Магнитный электрон в волновой механике”. Из этого доклада вскоре “родились” статья, в которой Ландау определил квантованные значения энергии электронов при их движении в плоскости, перпендикулярной магнитному полю (уровни Ландау), что позволило объяснить диамагнетизм электронов проводимости в металлах. Учет уровней Ландау “работает” при рассмотрении физических свойств систем заряженных частиц в сильных магнитных полях при низкой температуре в квантовых задачах физики твердого тела, физики плазмы и астрофизики. В этом контексте значение квантования Ландау, по крайней мере, дважды демонстрировалось в нобелевских лекциях, посвященных открытиям (и их объяснениям): в 1980 г. - квантованного эффекта Холла, в 1981 г. - дробного квантового эффекта Холла!

Активное участие в работе съезда принял Я. И. Френкель. Он максимально плодотворно использовал формат съезда: выступал с докладами и на пароходе, и в городах его следования, причем с учетом уровня подготовки слушателей, принимал участие в дискуссиях, обдумывал свою книгу, возглавил поездку молодежи на Кавказ, оставил в письмах родным свои впечатления о съезде. После съезда в 1931 г. Я. И. Френкель теоретически обосновал идею о существовании нейтральной частицы, способной поглощать свет, которую назвал экситоном (от английского слова excitation - возбуждение). В 1951 г. существование экситона было подтверждено экспериментально Е. Ф. Гроссом, до войны некоторое время работавшим в Саратовском университете. В современной наноэлектронике экситоны рассматривают как “работающие” квазичастицы в новых полупроводниковых лазерах со структурой нанометровых размеров. Открытие экситона в 1978 г. занесено в Государственный реестр открытий за № 105. Доклады на Шестом съезде образуют некоторое мозаичное “зеркало”, в котором отразился достойный уровень отечественной физики к началу 1930-х годов.

В 1930 г. была создана Всесоюзная ассоциация физиков, и с 19 по 24 августа того же года в Одессе (на базе Физического института) прошел Первый Всесоюзный физический съезд. По его завершении участники совершили круиз на пароходе “Пестель” по Черному морю по маршруту Одесса - Батуми - Одесса. Этот съезд стал первым и последним мероприятием в СССР такого рода.

## Хаос и фракталы в лицах и судьбах

Трубецков Д. И., Вдовина Г. М.

*СарГУ, Саратов*

Цель настоящей лекции состоит в анализе развития теории хаоса и фрактальной геометрии от “доисторической” эпохи хаоса до наших дней. Изложение основано на анализе оригинальных работ на фоне судеб создателей данного направления с использованием фактов, разбросанных в литературе, близкой к рассматриваемому вопросу.

Представляется разумным основные результаты изложить как оглавление к работе.

1. О моделях Вселенной древних
2. К истокам теории хаоса: от механики Ньютона к Лейбницу и от Лейбница к анали-

тической механике Лапласа

3. Конкурс короля Норвегии Оскара II и задача трчх тел. Великое открытие Анри Пуанкаре - результат понятой ошибки

4. Жак Адамар, Пьер Дюгем, Яков Синай и бильярды

5. Крылов, Макс Борн, неустойчивость и осмысленное понятие детерминированности

6. Соленоид и подкова Смейла. "Отображение пекаря" "Возвращение Пуанкаре" Группа студентов ("Эвдемонисты" - будущие известные специалисты в области исследований хаоса) и рулетка в Лас-Вегасе

7. Колмогоров, Арнольд, Мозер (теория КАМ). Островки регулярности в море хаоса

8. Эдвард Нортон Лоренц и второе открытие хаоса в результате понятой ошибки. "Бабочка Лоренца"

9. Роберт Мэй - барон Оксфордский и решение динамики популяции с обратной связью. "Период три порождает хаос"

10. Турбулентность: Ландау (1908-1968), Рюэль (род. 1935) и Такенс (1940-2010)

11. Митчелл Фейгенбаум и сценарий удвоения периода

12. Броуновское движение и великое предвидение Жана Перрена

13. Обзор, определивший направление исследований в 1980 годы

14. О гиперболическом хаосе

15. Бенуа Мандельброт и новый взгляд на мир

16. На пути к фрактальной размерности

17. Жизнь и трагическая судьба Феликса Хаусдорфа. "Умри вовремя!"

18. Папоротник Майкла Барнсли

19. Гастон Жюлиа (1893-1978) и Пьер Фату (1878-1929). Исследования итерируемых комплексных функций; "пленники", "беглецы" и "охранники"

Содержание лекции не является последовательным изложением истории темы: это собрание небольших эссе, совокупность которых складывается в единую картину.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант No 18-02-00666).

Ключевые слова: Теория хаоса, фракталы, турбулентность, задача трчх тел, бильярды, КАМ - теория, сценарий, удвоения периода, странный аттрактор, гиперболический хаос.

## О некоторых новых результатах в теории многомерного хаоса

Гонченко С.В.

*ННГУ, Нижний Новгород*

В докладе будет представлен краткий обзор новых результатов в области многомерного динамического хаоса (когда размерность фазового пространства  $\geq 4$  в случае потоков и  $\geq 3$  в случае отображений), полученных недавно в основном в работах нижегородской школы по динамическим системам, руководимой долгое время Л.П. Шильниковым. Основные темы доклада:

1) Три формы хаоса: консервативный, диссипативный (странные аттракторы) и смешанная динамика;

2) Гомоклинические аттракторы (содержащие только одно состояние равновесия в случае потоков или одну неподвижную точку в случае отображений) и универсальные фено-



менологические сценарии их возникновения;

3) Дискретные гомоклинические аттракторы трехмерных ориентируемых и неориентируемых диффеоморфизмов, примеры таких аттракторов (дискретные аттракторы Лоренца, восьмерочные аттракторы, аттракторы Шильникова и др.) в трехмерных обобщенных отображениях Эно.

## **Автоволновые структуры, включая химерные, в двумерных ансамблях связанных осцилляторов**

**Анищенко В.С., Бух А.В.**

*СГУ, Саратов*

В лекции представлены результаты исследований спиральных и концентрических автоволновых структур в двумерных ансамблях нелокально связанных нелинейных осцилляторов. Рассмотрены решетки из дискретных систем и систем с непрерывным временем. Показано, что введение нелокальной связи является главной причиной усложнения волновых режимов, включая возникновения химерных пространственно-временных структур на основе как спиральных, так и концентрических волн. Исследования автоволн в системах, описываемых уравнениями типа “реакция-диффузия” имеют многолетнюю историю. Однако, в силу того, что указанные уравнения моделируют динамику ансамблей с локальной связью, исследования последних лет с введением нелокальной связи открыли новые эффекты, включая реализацию автоволновых химерных структур. В лекции детально обсуждаются режимы спирально-волновых структур, обнаруженных авторами впервые в решетках нелокально связанных дискретных осцилляторов Некоркина. Полученные результаты сравниваются с литературными данными по ансамблям из дифференциальных осцилляторов. Приводятся оригинальные результаты по анализу эффектов синхронизации спирально-волновых структур в системе двух связанных ансамблей из дискретных отображений. Представлены оригинальные результаты реализации нового типа химерной структуры: “targetwavechimera” структуры на основе концентрических волн. Результаты получены моделированием динамики двумерного ансамбля нелокально связанных генераторов Ван дер Поля. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ “Аспиранты” No 19-32-90005.

По содержанию лекции опубликованы следующие основные научные статьи:

1. Andrei Bukh, Galina Strelkova, Vadim Anishchenko Spiral wave patterns in a two-dimensional lattice of nonlocally coupled maps modeling neural activity. *Chaos, Solitons & Fractals*, 120, 2019, p.75-82.

2. A. V. Bukh, E. Schöll, and V. S. Anishchenko. Synchronization of spiral wave patterns in two-layer 2D lattices of nonlocally coupled discrete oscillators. *Chaos* 29, 053105 (2019); doi.org/10.1063/1.5092352

3. А.В. Бух, В.С. Анищенко. Спиральные, концентрические и химерные волновые структуры в двумерном ансамбле нелокально связанных генераторов Ван дер Поля. *Письма в ЖТФ*, 2019, том 45, вып. 13, стр. 40-43. DOI: 10.21883/0000000000.

**Автоколебательные системы, генерирующие гиперболический хаос****Кузнецов С.П.***СФИРЭ РАН, Саратов*

Динамический хаос обладает значительным потенциалом для таких приложений как скрытая коммуникация, шифрование данных, генерация псевдослучайных чисел, создание радаров и сонаров. Для практических применений важно, чтобы хаос был робастным [1], то есть не разрушался при вариации параметров системы. Наиболее фундаментальный подход к получению такого хаоса состоит в привлечении систем с гиперболическими аттракторами, что позволяет опираться на результаты глубокой математической теории. Возможность присутствия подобных аттракторов в физических системах установлена [2], но большинство примеров относится к системам, требующим присутствия вспомогательных периодических сигналов. Для приложений более интересны автономные системы, как полноценные генераторы хаоса. В лекции представлен обзор автономных систем, использующих для получения гиперболического хаоса различные подходы. Для каждого примера приводятся и сопоставляются результаты численного решения уравнений и моделирования схемы в среде Multisim.

Первым трем примерам отвечает аттрактор Смейла–Вильямса в отображении Пуанкаре, которое производит трансформацию области тороидальной формы с поперечным сжатием и продольным растяжением в  $M \geq 2$  раз, и вложение образа в виде  $M$ -кратной петли внутрь исходного тора. В первой системе роль угловой переменной, отсчитываемой вдоль витков, играет фаза колебаний двух попеременно активируемых осцилляторов ван дер Поля. Система аналогична [3], но реализована как автономное устройство благодаря специальной обратной связи. Во второй системе угловой переменной служит аргумент комплексного числа, у которого действительная и мнимая часть отвечают двум относящимся к системе переменным. Такая система была реализована в виде лабораторного макета [4]. В третьем примере в качестве угловой переменной выступает пространственная фаза паттернов, возбуждающихся в пространственно протяженной системе [5]. Конкретно, это клеточная нейросеть (CNN) в виде одномерной решетки из  $N$  ячеек [6]. Благодаря специальной симметрии удастся обеспечить функционирование схемы уже при  $N = 6$ .

Четвертый пример характеризуется другим типом аттрактора, на котором динамика траекторий близка к потоку Аносова на поверхности отрицательной кривизны [7]. Схема строится как аналог модифицированной механической системы МакКея–Ханта и реализует приблизительно равномерное растяжение и сжатие векторов возмущений в непрерывном времени, что улучшает важные для приложений свойства генерируемого хаоса в сравнении с предыдущими вариантами.

1. Elhadj Z., Sprott J.C. Robust Chaos and Its Applications. WS, Singapore, 2011
2. Кузнецов С.П. *УФН* **181**(2) (2011) 121
3. Кузнецов С.П., Селезнев Е.П. *ЖЭТФ* **129** (2006) 400
4. Кузнецов С.П., Пономаренко В.И., Селезнев Е.П. *ПНД* **21**(5) (2013) 17
5. Kuptsov P.V., Kuznetsov S.P., Pikovsky A. *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 194101
6. Kuznetsov S.P. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics* **15** (2019) 109
7. Кузнецов С.П. *Нелинейная динамика* **12**(1) (2019) 121

## **Планирование моторной деятельности человека: от нейроинтерфейсов к нейрореабилитации**

**Храмов А.Е.**

*Университет Иннополис, Иннополис*

Проблема изучения планирования моторной деятельности головным мозгом человека в настоящее время привлекает значительное внимание исследователей в связи с рядом актуальных задач нейротехнологий, медицины, спорта и т.д. В частности, для спорта высоких достижений актуальным является правильная последовательность действий спортсмена, например, для спортсмена - прыгуна с трамплина - определяющим для длительности прыжка является момент отрыва от трамплина, который возможно тренировать с использованием биологической обратной связи, учитывая активность мозга, связанную с планированием подобного специфического движения. Другая задача - это управление экзоскелетом, которая также требует умения в автоматическом режиме расшифровки паттернов активности мозга (обычно совместно с мышечной активностью), соответствующих тем или иным специфическим формам двигательной активности. Отдельным типом анализируемой двигательной активности являются воображаемые движения, которые широко используются при создании интерфейсов мозг-компьютер в качестве управляющих команд, так и в практике нейрореабилитации после травм мозга, приводящих к парезам конечностей.

В представленной лекции рассматриваются вопросы исследования планирования движений, в частности:

- Классические представления о паттернах двигательной активности мозга, связанное с наблюдением синхронизации/десинхронизации ЭЭГ;
- Методы классификации активности головного мозга по различным данным нейровизуализации при воображаемых движениях; проблема ккинестетиковъ и квизуаловъ;
- Рекуррентный анализ паттернов двигательной активности;
- Приложения в интерфейсах мозг-компьютер;
- Приложения к нейрореабилитации пациентов после инсульта.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 16-29-08221).

## **Использование методов хаотической динамики для анализа и моделирования социально-политических процессов**

**Малков С.Ю.**

*ВШЭ, Москва*

Современная международная ситуация характеризуется высоким уровнем нестабильности. Начало XXI века ознаменовалось чередой "цветных революций" которые привели к смене политических режимов в множестве стран и которые стали по этой причине

предметом пристального изучения различного рода аналитиков. Однако, несмотря на большой интерес к этой теме, ее исследование ограничивается в основном политологическим и статистическим анализом, методы математического моделирования используются весьма ограниченно. Это связано со сложностью моделирования процессов социально-политической дестабилизации, связанной, в частности, с их принципиальной нелинейностью, с пороговым характером наблюдаемых явлений (эту специфику отражают сами термины: “революция”, “переворот”, “социальный взрыв” и т.п.). В работах [1, 2] была предложена и обоснована концепция базовой динамической модели для анализа политических процессов с учетом их нелинейности. В основе модели лежит представление о том, что социальные системы как на микроуровне (например, малые коллективы), так и на макроуровне (государства и их союзы) являются объединением социальных субъектов (физических и юридических лиц), которые, с одной стороны, имеют различающиеся интересы (именно поэтому мы можем говорить о них как о различных субъектах), с другой стороны, они вынуждены учитывать интересы друг друга при принятии решений, согласовывать и взаимно координировать свои действия (только в этом случае можно говорить о существовании единой социальной системы). Механизмы влияния одних субъектов на другие могут быть очень различными: через систему правил и норм, посредством двусторонних и многосторонних договоров, путем силового принуждения и т.п. В результате взаимодействия принимаемые решения могут сближаться, синхронизироваться (в то время как интересы остаются различными); в этом случае субъекты будут действовать согласованным образом, а социальная система будет функционировать как единый организм. Однако если синхронизации решений не будет, то произойдет рассогласование субъектов и дестабилизация функционирования системы.

В такой постановке математическим аналогом процесса стабилизации/дестабилизации общества является процесс синхронизации/десинхронизации динамических систем при наличии связей между их элементами. Подобного типа процессы рассматривались в большом количестве исследований (см., например, обзор литературы в [3]). Наибольший интерес представляют исследования, в которых рассматривается синхронизация/десинхронизация динамических систем, имеющих положительные ляпуновские показатели [3], поскольку нас прежде всего интересуют ситуации взаимодействия субъектов, которые имеют изначально разнонаправленные интересы. На основе этой аналогии предложен подход, позволяющий определить условия синхронизации/десинхронизации субъектов социальных систем [4].

Для того чтобы предложенный подход можно было трансформировать в расчетный математический алгоритм, прежде всего необходимо введение количественной меры различия интересов субъектов. Это было сделано на основе теории “информационного поля” [5–8]. Согласно этой теории каждого социального субъекта (которым может быть физическое или юридическое лицо, СМИ, социальная группа, государственный орган, страна в целом и т.п.) в заданный момент времени можно позиционировать в многомерном информационном пространстве ценностей (убеждений). При этом ценностное позиционирование социальных субъектов в таком пространстве отображается точками (на бытовом языке их можно назвать “точками зрения” рассматриваемых субъектов). Введение системы координат позволяет определить расстояние  $g_{ij}$  между “точками зрения” субъектов в информационном пространстве. При этом, чем меньше это расстояние, тем ближе ценностные позиции субъектов, тем проще им прийти к согласию и тем выше их уровень доверия друг к другу. Чем больше расстояние, тем сильнее расходятся точки зрения субъектов, тем сложнее им договориться и согласовать свои позиции. Таким образом, величина  $g_{ij}$

может быть количественной мерой различия интересов социальных субъектов.

В качестве эмпирической базы для определения координат позиционирования социальных субъектов в информационном пространстве ценностей предложено использовать данные Европейского социального исследования ESS (<http://www.ess-ru.ru>). Это многолетнее сравнительное эмпирическое (основанное на социологических опросах) исследование изменения установок, взглядов, ценностей и поведения населения различных стран Европы. В основу опросника положена модифицированная методика Ш.Шварца, для изучения ценностей личности, измеряющая 10 типологических ценностных индексов. Данные этого исследования позволяют проследить динамику ценностных установок населения большого числа стран по различным возрастным и социальным группам.

Введение информационного поля и расстояния  $g_{ij}$  между субъектами позволяет ввести индекс рассогласованности  $S_{ij}$  поведения двух субъектов  $A_i$  и  $A_j$ , который учитывает не только различие точек зрения субъектов, но и степень заинтересованности субъектов в их сближении и выработке согласованных решений (такая заинтересованность возникает: а) из соображений безопасности, б) если между субъектами имеются взаимовыгодные связи). Разработано программное обеспечение [4, 9, 10], позволяющее проводить исследования по влиянию структуры связей между субъектами на возможность синхронизации их действий. На основе моделирования показано, что синхронизация действий субъектов возможна только в том случае, если существуют цепочки связей, охватывающих всех субъектов, причем интенсивность связей должна превышать определенное пороговое значение. В целом, при увеличении количества связей между субъектами порог синхронизации снижается. Однако возможны ситуации, когда введение новых связей в дополнение к имеющимся не улучшает, а ухудшает синхронизацию динамики систем. Оказывается, что связи не равнозначны, а результат их взаимодействия существенным образом зависит как от общей структуры связей в системе, так и от расстояния  $g_{ij}$  между субъектами в информационном поле.

Описанная выше базовая модель была адаптирована к анализу социально-политической устойчивости государств с различными политическими режимами [4]. На основе численных экспериментов было выявлено два наиболее устойчивых к дестабилизации типа обществ - так называемые X- и Y-структуры (автократии и демократии). Показано, что политические режимы промежуточного типа (имитационные демократии, возникающие ходе перехода от автократии к демократии) обладают существенно меньшей устойчивостью и более подвержены дестабилизации методами "мягкой силы" или "цветных революций" (что хорошо согласуется с результатами исследований С.В.Циреля, J.Goldstone и других ученых). С помощью модели рассмотрена ситуация влияния внешних факторов на устойчивость социально-политических систем различного типа. Показано, что в зависимости от характера влияния и от структуры возникающих связей это влияние может как улучшать, так и ухудшать устойчивость систем к дестабилизации. Рассмотрены различные типичные случаи, на основе численных экспериментов определены типичные зависимости характеристик устойчивости.

Данная модель использовалась для анализа конкретных социально-политических ситуаций в различных странах мира.

1. Малков С. Ю. *Стратегическая стабильность* **3** (1998) 90-99.
2. Малков С. Ю. *Информационные войны* **2** (2007) 11-20.
3. Дмитриев А. С., Старков С. О., Широков М. Е. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика* **4(5)** (1996) 40.

4. Малков С. Ю., Билюга С. Э. *Информационные войны* **1(33)** (2015) 7-18.
5. Бухарин С. Н., Ковалев В. И., Малков С. Ю. *Информационные войны* **4(12)** (2009) 2-9.
6. Бухарин С. Н., Малков С. Ю. *Информационные войны* **2(14)** (2010) 14-20.
7. Бухарин С. Н., Малков С. Ю. *Информационные войны* **2(18)** (2011) 36-45.
8. Бухарин С.Н., Малков С.Ю. Эволюция элиты. Материалы и исследования. - М.: Академический проект, Гаудеамус, 2014.
9. Малков С.Ю., Билюга С.Э., Малков Д.С., Тимофеева М.С. Революции как объект математического моделирования // Первая российская конференция "Социофизика и социоинженерия" (МГУ им.М.В.Ломоносова, 8-11.06.2015 г.) - М.: МГУ, 2015, с.43.
10. Малков С.Ю., Билюга С.Э., Малков Д.С. Моделирование социально-политической нестабильности // Межнародное соглашение - социальный приоритет государственности. - Владикавказ: ИПП СОГУ, 2018, с.298-310.

## Рекуррентный анализ для обработки МЭГ данных головного мозга человека

Сельский А.О., Емельянова Е.П., Руннова А.Е., Журавлев М.О.

СарГУ, Саратов

Настоящая работа посвящена исследованию с помощью рекуррентного анализа МЭГ данных головного мозга при выполнении испытуемыми воображаемых движений. В настоящий момент существует большое число методов визуализации работы головного мозга человека [1], МЭГ (магнитоэнцефалография) выделяется высокой точностью и разрешением по времени, оставаясь в тоже время неинвазивным и сравнительно дешевым методом. Ключевым недостатком метода, при этом, можно назвать отсутствием возможности двигаться во время эксперимента. В целом, МЭГ является эффективным способом исследования работы головного мозга при выполнении различных задач, включая воображаемые движения [2].

Важно при этом отметить, что анализ МЭГ данных (как и ЭЭГ или фМРТ данных) требует применения методов математической обработки [3]. В основном применяется либо частотные методы, к примеру, вейвлетный анализ, которые позволяют исследовать изменение во времени частоты колебаний ЭЭГ или МЭГ, либо методы направленные на исследование связей между каналами. Рекуррентный анализ, как правило, используется именно для установления связей между каналами данных МЭГ и ЭЭГ [4]. Однако, в рамках данной работы рассматривался другой способ применения рекуррентного анализа для изучения МЭГ данных головного мозга.

В рамках эксперимента с совершением воображаемых движений испытуемый должен был по сигналу представить движение правой/левой рукой/ногой. В ходе эксперимента набиралась большая статистика подобных воображаемых движений, которые можно было после проанализировать. Основная идея рекуррентного анализа заключается в подсчете событий когда система возвращается в исходное состояние. Далее число таких возвратов анализируется для получения представления о динамике системы. В работе высказано предположение, что можно использовать рекуррентный анализ для определения значимости каналов, если проверять возвращаемость системы при одинаковых типах движений.

Число возвратов при этом будет зависеть от частоты колебаний в канале (при большей частоте в среднем больше число возвратов), а так же формировании в канале определенного паттерна при выполнении данного типа движения. Если паттерн образуется, то число возвратов при одном типе будет существенно выше, чем во время фоновой записи. Таким образом, при обработке данных можно наблюдать какие из каналов более важны при совершении каждого типа движений, а какие менее важны.

1. Brody S. J., Demanuele C., Debener S. et. al. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* **33** (2009) 279-296
2. Hamalainen M., Hari R., Ilmoniemi R. J. et. al. *Rev. Mod. Phys.* **65** (1993) 413
3. Acharya R. U., Faust O., Kannathal N. et. al. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* **80** (2005) 37-45
4. Acharya R. U., Sree S. V., Chattopadhyay S. et. al. *Int J Neural Syst* **21** (2011) 199-211

## Перестройка осцилляторных сетей в мозге у крыс под воздействием агонистов эндоканнабиноидных рецепторов

Сысоева М.В.<sup>1</sup>, Сысоев И.В.<sup>2</sup>, van Rijn С.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,

<sup>3</sup>Donders Centre for Cognition, Radboud University, Nijmegen, the Netherlands

Данная работа посвящена исследованию изменений функциональной связности в кортико-гиппокампальной сети мозга, вызванные введением агониста эндоканнабиноидных рецепторов WIN55,212-2 крысам с генетической абсансной эпилепсией. В работе ставились задачи выявить перестройки в сети, могущие предшествовать или соответствовать усилению, ослаблению или качественному изменению эпилептиформной активности; исследовать изменения связности со временем, сопровождающие инициацию и прекращение приступа в зависимости от того, был ли этот приступ спонтанным или протекал на фоне введения WIN55,212-2.

В работе были рассмотрены экспериментальные 8-часовые записи сигналов локальных потенциалов мозга двадцати четырех взрослых самцов линии WAG/Rij (от 8 до 10 месяцев). Для анализа всю запись делили на четыре эпохи: 2 часа до введения препарата (фон), первые 2 часа после введения (ранние эффекты), период с 3-го по 4-й часы после введения препарата, период с 5-го по 6-й часы после введения препарата. Восемнадцати животным вводился препарат WIN55,212-2 - агонист эндоканнабиноидных рецепторов (шесть животным по 3мг/кг, шести животным по 6мг/кг, шести по 12 мг/кг), еще шесть животных представляли собою контрольную группу, им вводился растворитель (арахисовое масло подкожно).

Для исследования перестройки сетей в мозге использовался метод причинности по Грейнджеру [1], адаптированный к изучаемым в работе физиологическим данным в соответствии с рекомендациями, данными в [2]. Чтобы оценить статистическую значимость изменения взаимодействия между четырьмя эпохами записи, был проведен статистический анализ усредненных по 5-секундным интервалам значений улучшения прогноза для каждой пары отведений.

Только при введении 12 мг/кг препарата наблюдается значимое (по сравнению с первой эпохой записи) усиление воздействия со стороны затылочной коры на теменную в фоне и преиктальном периоде для второй эпохи, во время разряда для третьей эпохи и в постиктальный период для третьей и четвертой эпохи. Также для этой дозы препарата наблюдается значимое увеличение воздействия со стороны лобной коры на гиппокамп в преиктальный период для третьей эпохи и во время разряда и для второй, и для третьей эпох. Суммируя, можно утверждать, что введение WIN55,212-2 приводит к активизации затылочной доли коры (или структур под ней), а также к увеличению проводимости сигналов к гиппокампу (лимбической системе).

*Данная работа была выполнена при поддержке Стипендии Президента РФ для молодых ученых СП-3605.2018.4.*

1. Granger C.W.J. Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods. *Econometrica*. 1969. **37(3)**: 424-438.
2. Sysoeva M.V., Sitnikova E., Sysoev I.V., Bezruchko B.P., van Luijtelaar G. Application of adaptive nonlinear Granger causality: Disclosing network changes before and after absence seizure onset in a genetic rat model. *J Neurosci Methods*. 2014. **226**: 33-41.

## Корреляционный анализ нестационарных физиологических временных рядов

Короновский А.А.(мл.)

СарГУ, Саратов

В функционировании многих систем в природе важную роль играют одновременно как детерминированные, так и случайные факторы, поэтому наблюдаемая сложная динамика может быть обусловлена сочетанием самых разных механизмов. Характерные временные масштабы этих систем часто варьируются в широком диапазоне значений, что может приводить к такому явлению как неэкспоненциальный закон спада автокорреляционной (или автоковариационной) функции [1].

Для случайных процессов достаточно типичны степенные зависимости в поведении АКФ или функции спектральной плотности [2]. Точная характеристика закономерностей потери корреляций важна при проведении анализа различных систем, так как она позволяет делать выводы о наличии и особенностях длительной памяти в их динамике. Например, такой анализ является математической основой для решения задач диагностики функциональных нарушений в структуре сердечного ритма.

Так, сердечный ритм является важным физиологическим показателем, отражающим процессы вегетативной, нейрогуморальной и центральной регуляции в сердечно-сосудистой системе и организме в целом [3]. Исследование параметров сердечного ритма позволяет решать задачи диагностики различных функциональных нарушений. При этом использование специальных методов анализа временных рядов расширяет возможности диагностики по сравнению со стандартным инструментарием статистических методов цифровой обработки сигналов.

Для исследования факторов, влияющих на показатели сердечного ритма, был использован метод DFA (detrended fluctuation analysis) - один из вариантов корреляционного



анализа экспериментальных данных. DFA позволяет проводить изучение структуры различных процессов или сигналов, в том числе и нестационарных, с точки зрения статистического самоподобия. Таким образом, если рассматривать сердечный ритм как фрактальную структуру, то для ее количественного описания можно определить характеристику самоподобия (показатель скейлинга) [4].

В работе приводятся результаты применения метода DFA для анализа последовательностей RR-интервалов электрокардиограмм, а также обсуждаются возможности и ограничения данного подхода.

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989.
2. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982.
3. Баевский Р.М., Иванов Г. Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения М.: Медицина, 2000.
4. С.К. Peng et al. *Chaos* 5 (1995) 82

## **Дисперсионный анализ как метод оценки нелинейных взаимодействий между элементами земной климатической системы**

**Алимпиева М.А., Морозова С.В., Завьялова Е.В.**

*СарГУ, Саратов*

Земная климатическая система (ЗКС) представляет собой открытую неравновесную термодинамическую систему, управляемую и внешними процессами, и внутренними нелинейными взаимодействиями между ее компонентами.

Расчеты, проводимые по различным климатическим моделям, показывают неуклонный монотонный рост средней приповерхностной температуры воздуха, в большинстве случаев объясняемый антропогенным влиянием парниковообразующих газов, в первую очередь, указывается диоксид углерода [1].

Однако, изменения средней приповерхностной температуры воздуха происходят циклически. Авторами выделены естественные климатические периоды состояния земной климатической системы, к которым в последнее время, безусловно, добавилась антропогенная составляющая [2].

Важной научной задачей остается выяснение роли и относительного вклада антропогенного фактора [1].

Авторы настоящего исследования считают, что к решению поставленной задачи можно применить дисперсионный анализ, позволяющий оценить значимость влияния одной величины на другую [3].

В качестве исследуемого фактора взяты аномалии приповерхностной температуры воздуха Северного полушария, взятые с сайта (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/#datdow>). В качестве фактора, оказывающего влияние на изменения приповерхностной температуры – содержание углекислого газа в атмосфере (<https://climate.copernicus.eu/>).

Сравнение дисперсий проводилось по формулам:

$$\sigma_f^2 = \frac{S_f}{K_f}, \quad (1)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{S_z}{K_z}, \quad (2)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{S_x}{K_x}, \quad (3)$$

где  $S_x$  - общая сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений от общей средней;  $S_f$  - факторная сумма квадратов отклонений групповых средних;  $S_z$  - остаточная сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений группы от своей групповой средней;  $K_f = q-1$ ,  $K_z = K_x - K_f$ ,  $K_x = N-1$  - числа степеней свободы,  $q$  - число уровней (градаций) исследуемого фактора;  $N$  - общее число наблюдений.

Расчеты проводились с 2002 по 2010. Согласно расчетам, проведенным по формулам 1-3, на исследуемом временном интервале вклад углекислого газа в изменчивость средней полушарной температуры оценен 7,21 %.

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 1535.
2. Morozova S.V. et. al. Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental. 2018. Volume 107.2018.P.1-8.
3. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Высшая школа, Москва, 1972. С. 345- 349.

## Нейроподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимами

Большаков Д.И., Матросов В.В., Мищенко М.А.

*ННГУ, Нижний Новгород*

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных задач междисциплинарной науки является проектирование и исследование нейроморфных устройств. Такие устройства чаще всего применяются для создания систем обработки разного рода информации, с алгоритмами, схожими с алгоритмами обработки данных человеческим мозгом или мозгом животных. В отличие от классических ЭВМ, нейронные сети являются непрерывными во времени системами, что позволяет получить серьезное преимущество в скорости и качестве обработки графической и акустической информации, а также в скорости реакции на импульсное воздействие.

Ранее в работах [1,2] было проведено детальное исследование математической модели нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с полосовым RC-CR фильтром. Показана возможность реализации различных колебательных режимов, качественно повторяющих динамику мембранного потенциала биологического нейрона, а также проведено разбиение пространства параметров на области существования данных режимов. Кроме того, показано отсутствие режима покоя во всем пространстве параметров, обусловленное отсутствием постоянной составляющей

сигнала управления в петле обратной связи системы ФАПЧ. В [3] было проведено экспериментальное исследование модели нейроподобного генератора на основе системы ФАПЧ с полосовым фильтром, в рамках которого, были получены результаты качественно похожие на результаты численного моделирования.

В рамках данной работы предложена концепция модификации ранее описанной системы таким образом, чтобы сохранить уже известную динамику в области положительных значений параметра  $\gamma$  и при этом добавить в систему область существования состояния равновесия в области отрицательного параметра  $\gamma$ , тем самым сделать невозможным генерацию колебаний с отрицательной амплитудой, а так же добавить в систему возбудимый режим.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-29-23001 мк.

1. Мищенко М.А., Шалфеев В.Д., Матросов В.В. *Изв. вузов. ПНД* **20(4)** (2012) 122
2. Matrosov V.V., Mishchenko M.A., Shalfeev V.D. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **222(10)** (2013) 2399
3. Mishchenko M.A., Bolshakov D.I., Matrosov V.V. *Tech. Phys. Lett.* **43(7)** (2017) 596

## Использование математических методов при обработке ЭЭГ данных головного мозга

Емельянова Е.П., Руннова А.Е., Журавлев М.О., Сельский А.О.

СарГУ, Саратов

Работа посвящена исследованию ЭЭГ данных головного мозга человека при выполнении им воображаемых и действительных движений конечностей. На сегодняшний день существует множество методов исследования головного мозга [1]. Электроэнцефалография (ЭЭГ) – это один из наиболее дешевых и простых в осуществлении методов, обладающий одновременно с этим неинвазивностью. Важным преимуществом является также то, что, в отличие от многих других методов изучения головного мозга, ЭЭГ не ограничивает движения человека, что дает нам возможность изучать работу мозга непосредственно во время движений [2].

Стоит отметить, что данные ЭЭГ головного мозга не используются в чистом виде сразу после их снятия с прибора. Для изучения ЭЭГ применяются математические методы обработки данных [3]. Чаще всего используются частотные методы, которые позволяют изучать изменения во времени частоты колебаний ЭЭГ, или методы, ориентированные на установление связей между каналами, одним из таких методов является рекуррентный анализ, который использовался в работе с ЭЭГ данными [4].

В рамках эксперимента испытуемый по сигналу должен был поднять одну из конечностей (правая или левая рука или нога) или представить себе это движение. Рекуррентный анализ позволяет подсчитать количество возвратов системы в исходное состояние. В ходе работы было высказано предположение о том, что эту информацию можно использовать для определения наиболее и наименее значимых каналов ЭЭГ при проверке одинаковых движений. Чем большее число возвратов было получено на канале, тем более значимым

он является, так как оно зависит от частоты колебаний и образовании паттерна в канале, если образуется определенный паттерн, то количество возвратов системы в исходное состояние будет больше, чем при его отсутствии. Таким образом, при обработке данных возможно выделить более важные и менее важные каналы ЭЭГ при определенном типе движений.

1. Brody S. J., Demanuele C., Debener S. et. al. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* **33** (2009) 279-296
2. Maris E., Oostenveld R. *J Neurosci Methods* **164** (2007) 177-190
3. Acharya R. U., Faust O., Kannathal N. et. al. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* **80** (2005) 37-45
4. Acharya R. U., Sree S. V., Chattopadhyay S. et. al. *Int J Neural Syst* **21** (2011) 199-211

## Влияние внеклеточной среды на статистические характеристики нейронной активности

Рожнова М.А., Казанцев В.Б., Панкратова Е.В.

ННГУ, Нижний Новгород

Информация о любых воздействиях внешней среды, воспринимаемая живыми организмами, передается в центральную нервную систему посредством различных паттернов активности нервных клеток. Сигналы различной амплитуды/модальности формируют определенные изменения мембранного потенциала структурных элементов нейронной сети. При этом, как показывают многочисленные экспериментальные данные, несмотря на наличие целого ряда естественных источников фонового шума, повторяющиеся идентичные сигналы формируют определенный нейросетевой отклик, обладающий схожими характеристиками [1]. Таким образом, анализ экспериментальных данных по нейросетевой обработке внешних сигналов показывает высокие показатели как надежности, так и точности передачи информации. К сожалению, сложные процессы, вовлеченные в формирование нейросетевой шуморезистентности, на данный момент плохо изучены и поэтому представляют значительный интерес.

В работе [2], на основе экспериментальных наблюдений была введена математическая модель, учитывающая влияние внеклеточного матрикса мозга (ВКМ) на нейросетевую активность и позволяющая продемонстрировать роль ВКМ в поддержании гомеостатического баланса и в реализации функции памяти. В данном исследовании в рамках этой модели обсуждается один из возможных механизмов регуляции активности нейронов, позволяющий повысить надежность и точность передачи внешнего информационного сигнала при наличии фонового шума. В качестве модели эволюции во времени мембранного потенциала нервных клеток рассмотрена модель Ходжкина-Хаксли, возмущаемая различными синаптическими токами, учитывающими наличие фонового шума и воздействие ВКМ. На основе анализа различных статистических характеристик, вычисляемых для межимпульсного интервала на выходе модели Ходжкина-Хаксли, показана существенная роль цепи обратной связи рассматриваемой модели, благодаря которой механизмы взаимного влияния нейронной активности и изменения концентрации молекул ВКМ определяют возможность получения шуморезистентной генерации.

---

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 14.Y26.31.0022, разработка модели) и РФФИ (проект 17-02-01103а, анализ модели).

1. Rodriguez-Molina V.M., Aertsen A., Heck D.H. *PLoS ONE* **2(3)** (2007) 319.
2. Kazantsev V., Gordleeva S., Stasenko S., Dityatev A. *PLoS ONE* **7(7)** (2012) 41646.

## Нестабильности в динамике каскада внутриклеточной сигнализации PI3K-Akt-mTOR

Сапега Т.С., Гурия Г.Т.

*ФГБУ НМИЦ гематологии, МФТИ (НИУ), Москва*

Внутри клетки функционирует система биохимических каскадов, передающих информацию от микроокружения внутрь клетки. Таким образом, сигнальные пути регулируют клеточное деление, дифференцировку, апоптоз и другие процессы, нарушения в ходе которых приводят к злокачественному перерождению клетки [1]. Поэтому представляется важным исследование устойчивости таких информационных каналов.

В данной работе была проанализирована упрощенная граф-схема биохимического каскада PI3K-Akt-mTOR, предложенная сотрудниками лаборатории молекулярной гематологии [2]. Наличие в структуре сигнального пути петли положительной обратной связи указывает на принципиальную возможность взрывного поведения системы [3]. Целью данного исследования было отыскание условий динамической и параметрической потери устойчивости данного сигнального пути. Феноменологическая модель активации каскада была описана системой ОДУ. Исследование фазового портрета стационарных состояний системы в отсутствие внешней стимуляции позволило судить об условиях параметрической потери устойчивости. Анализ случая ненулевой экзогенной стимуляции позволил получить явное выражение для величины порога динамической дестабилизации каскада PI3K-Akt-mTOR. На основе общедоступных данных о биохимических последствиях ряда генетических мутаций была дана классификация этих мутаций по их влиянию на величину порога дестабилизации. Кроме того, составлена таблица, содержащая оценки возможного влияния ряда известных терапевтических агентов на величину порога потери устойчивости каскада PI3K-Akt-mTOR.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ, грант 19-11-00260.

Литература:

1. Hanahan D. Hallmarks of Cancer: The Next Generation / Hanahan D, Weinberg RA // *Cell* - 2011. - 144(5): pp 646-74.
2. Якутик И. А. и др. Мутации в генах MAP-киназ при волосатоклеточном лейкозе и лимфоме из клеток красной пульпы селезенки // *Гематология и трансфузиология*. - 2018. - Т. 63. - No. S1. - С. 112-112.
3. Brandman O., Meyer T. Feedback loops shape cellular signals in space and time // *Science*. - 2008. - Т. 322. - с. 5900. - С. 390-395.

---

**Вариабельность ритма сердца как универсальный инструмент анализа в медицине, психологии и экологии. Прогностические и социальные аспекты.****Флейшман А.Н.***НИИ КППЗ, Новокузнецк*

Доклад посвящен 20 летию Всероссийских симпозиумов “Медленные колебательные процессы в организме человека. Теоретические и прикладные аспекты нелинейной динамики в физиологии и медицине”.

Медленноволновые процессы кардиодинамики получившие наибольшую популярность под названием Heart rate variability сегодня исследуется в десятках странах мира. Это срез функционирования человека во всех его проявлениях. Накопленный опыт теоретических и прикладных аспектов анализа показал перспективность исследований ВРС в таких актуальных темах, как “внезапная кардиальная смерть”. В частности, сочетание линейных и нелинейных показателей ВРС в динамическом исследовании у лиц молодого и старшего возраста ведущих активный образ жизни в прогнозе внезапной кардиальной смерти достигает 96-98%. В лаборатории физиологии медленноволновых процессов НИИ КППЗ за последние 20 лет разработаны новые методические подходы в анализе ВРС с использованием нагрузочного тестирования, классификация волновых процессов, выявления места нелинейных показателей (энтропии, фрактальных свойств, временных, структурных и реактивных показателей), которые дополняют традиционные временные и спектральные характеристики. Дан обзор практических приложений использования ВРС в клинических условиях, физиологии труда, в экологии, спорте, а также как индикатор эффективности нефармакологических методов коррекции функционального состояния человека: ишемического прекондиционирования, транскраниальной магнитной стимуляции.

**Сравнение сигналов дыхания, зарегистрированных датчиком рекурсии дыхания и датчиком потока дыхания по давлению****Чернец Е.П., Боровкова Е.И., Посненкова О.М.***СарГУ, Саратов*

Системы биологической природы являются ярким примером сложных динамических систем. Одним из способов исследования таких систем является постановка специального активного эксперимента с воздействием на исследуемую систему известным внешним сигналом, который вызывает изменения в динамике системы. В ряде подобных исследований [1-3] контуров регуляции сердечно-сосудистой системы внешним сигналом воздействия выступает сигнал дыхания, который требует отдельного изучения.

В работе исследовался сигнал дыхания, зарегистрированный датчиком потока дыхания по давлению (ПДд) и датчиком рекурсии дыхания (РД) в трех сериях активного эксперимента. В эксперименте приняли участие 17 испытуемых. В первой и второй серии эксперимента частота вдохов испытуемых линейно нарастала от 0.05 до 0.25 Гц в течение 25 минут, следуя за звуковыми сигналами. В первой серии эксперимента испытуемым предлагалось поддерживать комфортную глубину дыхания. Во второй серии испытуемые

осуществляли форсированные более глубокие вдохи. В третьей серии в течение 20 минут сигналы регистрировались при спонтанном дыхании. Для оценки характерной частоты дыхания был проведен спектральный анализ сигналов, зарегистрированных в третьей серии эксперимента. Средняя частота дыхания оказалась равной  $0.2308 \text{ Гц} \pm 0.0485 \text{ Гц}$  (среднее  $\pm$  стандартное отклонение). Был проведен сравнительный анализ амплитуды сигналов дыхания, в котором выявлено, что амплитуда увеличивается во время эксперимента с форсированным дыханием на  $50.1 \pm 26.9$  процентов по сравнению с комфортным. Также оказалось, что в рамках одной серии эксперимента амплитуда не остается постоянной, она меняется на  $27.7 \pm 22.0$  процентов при комфортном дыхании и на  $28.0 \pm 18.6$  процентов при форсированном дыхании. Кроме того, исследование показало, что в некоторых случаях (29.4 процентов) удается выявить линейную зависимость между сигналами, зарегистрированными датчиками ПДд и РД в 1 и 2 серии экспериментов. В результате исследования проведено сравнение сигналов дыхания, зарегистрированных датчиком рекурсии дыхания и датчиком потока дыхания по давлению.

Работа выполнена при поддержке гранта МД-2202.2019.8.

1. Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ishbulatov Yu.M., Posnenkova O.M., Bezruchko B.P. *Russian Open Medical Journal* **5** (2016) 0101
2. Borovkova Y.I., Karavaev A.S., Bezruchko B.P., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **75** (2011) 1601-1604
- 4 Karavaev A. S., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. *Human Physiology* **39** (2013) 93-104

## Исследование механизма формирования структур на фронте горения

Якупов Э.О., Полежаев А.А., Губернов В.В.

ФИАН, Москва

В ряде реакций, распространяющихся в виде фронта, например, при распространении волны горения или в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), можно наблюдать возникновение различных пространственных структур. Такие структуры на фронте есть результат различных неустойчивостей. Относительно недавно экспериментально было продемонстрировано, что на фронте пламени могут возникать ячеистые, а так же спиральные и концентрические автоволновые структуры. Механизм их формирования до сих пор не понят. В настоящем исследовании мы предлагаем качественное объяснение механизма формирования таких структур на основе построения и численного исследования соответствующий математической модели.

Предполагается, что структуры на фронте реакции образуются в результате взаимодействия двух подсистем: первая ответственна за формирование фронта, а вторая, параметрически зависящая от первой, – за формирование самих структур. Соответствующая феноменологическая модель состоит из двух взаимосвязанных блоков, при этом процесс

образования и поведения волны на фронте реакции описывается системой двух нелинейных дифференциальных параболических уравнений (модель типа ФитцХью - Нагумо), а за возникновение самого фронта отвечает уравнение Фишера - КПП. В данной работе представлены результаты моделирования и численных расчетов в трехмерной области, по которой движется фронт пламени. Расчет проводился с использованием RHOС ADI метода и разностной схемы Кранка-Николсона. В численных экспериментах продемонстрировано, что данный механизм способен качественно объяснить возникновение на фронте реакции как спиральных, так и концентрических автоволновых структур. Кроме того, показана зависимость появления и вида структур от его ширины и скорости движения фронта.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ: гранты 17-01-00070 и 18-31-00411.

1. G. Jomaas, J.K. Bechtold, C.K. Law. *Proceedings of the Combustion Institute* **31** (2007) 1039-1046
2. Э. О. Якупов, А. А. Полежаев. *Краткие сообщения по физике ФИАН* **6** (2018) 3-10
3. Yakupov E.O., Polezhaev A.A., Gubernov V.V., Miroshnichenko T.P. *Phys. Rev. E* **99** (2019) 042215

## Гиротроны: от прошлого к настоящему и будущему

Глявин М.Ю., Денисов Г.Г.

*ИПФ РАН, Нижний Новгород*

За последние годы произошел качественный скачок в разработке мощных генераторов миллиметрового диапазона – гиротронов: созданы и испытаны приборы с мегаваттным уровнем мощности, работающие практически в непрерывном режиме (с длительностями “импульса” генерации порядка часа) [1]. Благодаря достигнутым результатам, в установках УТС с магнитным удержанием электронно-циклотронный (ЭЦ) нагрев плазмы стал одним из основных, наряду с ионно-циклотронным и нейтральной инжекцией. Наряду с использованием в установках УТС, гиротроны с умеренным уровнем мощности (до 15-20 кВт) применяются в десятках мировых лабораторий для перспективных технологий. В последние годы методами вакуумной электроники активно осваивается терагерцовый диапазон.

Гиротроны представляют собой разновидность мазеров на циклотронном резонансе (МЦР), в которых используется резонансное взаимодействие электронов, движущихся по винтовым траекториям в магнитостатическом поле, с волнами, распространяющимися почти поперек направления магнитного поля. Основным механизмом, обеспечивающим преобладание в гироприборах стимулированного СВЧ-излучения над поглощением, является азимутальная группировка электронов на ларморовских окружностях, обусловленная релятивистской зависимостью циклотронной частоты от энергии частиц. Поскольку в электронных мазерах электронный пучок взаимодействует с СВЧ-полем электродинамических систем, характерные размеры которых значительно превышают длину волны, обеспечивается очень высокий уровень электронной и электродинамической селекции мод, что позволяет реализовать режим одномодовой генерации и высокого КПД при очень больших рабочих токах.



По непрерывной и средней мощности, а также по энергии излучения в длинных импульсах гироприборы значительно, на несколько порядков, превосходят другие источники излучения в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн. Для проекта ИТЭР изготавливаются гиротроны с частотой излучения 170 ГГц, выходной мощностью 1 МВт и КПД 52-54 % в импульсах порядка 1000 с. Россия является поставщиком более трети всех гиротронов для ЭЦ-системы. На сегодняшний день Россия является единственной страной, получившей официальное подтверждение ITER о соответствии источников излучения требованиям технического задания, и с 2017 года кооперацией ИПФ Ч ГИКОМ ежегодно изготавливается по одному микроволновому комплексу, включая гиротрон, сверхпроводящий магнит, согласующую СВЧ-оптику, систему охлаждения, вспомогательные источники питания и систему управления. Для перспективных установок УТС (DEMO) в ИПФ обоснованы возможности и определены пути создания сверхмощных (1,5-2 МВт) непрерывных гиротронов с рабочими частотами до 250 ГГц.

Возможности гиротронных комплексов значительно расширяются, если обеспечить возможность перестройки частоты генерации. В ИПФ разработан, изготовлен и испытан гиротрон мегаваттного уровня выходной мощности со ступенчатой перестройкой частоты в диапазоне 100-150 ГГц. Для долговременной работы на мегаваттном уровне мощности, система формирования узконаправленных волновых пучков была оптимизирована до содержания гауссовой компоненты 97-98%. Волновые пучки выводятся через алмазное окно, технология изготовления которого также освоена в ИПФ РАН. Хотя при разработке гиротронов кооперации ИПФ Ч ГИКОМ приходится конкурировать в международных тендерах с самыми известными мировыми производителями электронных ламп, большинство современных установок типа токамак и стелларатор оснащены именно российскими гиротронами, что позволило получить ряд важных результатов, например: подавление неустойчивостей в плазме (токамак ASDEX-Up, Германия), поддержание разряда в течение часа (стелларатор LHD, Япония); рекордные параметры плазмы в экспериментах на сверхпроводящих токамаках KSTAR (Корея) и EAST (Китай).

В ИПФ РАН достигнут значительный прогресс в развитии методов преобразования волн, создании волновых трансформаторов, систем ввода управляющего сигнала в рабочее пространство, создании высокоэффективных линий транспортировки СВЧ излучения. Благодаря разработке новых компонентов и оптимальным методам диагностики с использованием анализа модового состава излучения созданы линии передачи мощного для установок T-10, TEXTOR, LHD, Aditia, ASDEX, W7-AS, ускорителей (ЦЕРН), технологических комплексов СВЧ-обработки материалов, источников многозарядных ионов и радарных систем.

Наряду с гиротроном в ИПФ РАН предложена и доведена до высокого технического уровня усилительная разновидность гироприборов Ч гироклистрон, который по своему принципу действия аналогичен обычным клистроном с прямолинейными пучками. Современные гироклистроны, обеспечивают импульсную выходную мощность 0,7 МВт на частоте 35 ГГц и до 0,4 МВт на частоте 95 ГГц при коэффициенте усиления до 30 дБ, электронном КПД до 30 % в полосе до 0,5 %.

Другая разновидность гироусилителей, гиро-ЛБВ, способна обеспечить на порядок более широкую, чем у гироклистронов, полосу усиления, что существенно расширяет область возможных приложений данных приборов. Для гироЛБВ в ИПФ РАН предложена оригинальная концепция, основанная на использовании волноводов с винтовой гофрировкой поверхности, что позволило, например, получить импульсную выходную мощность до 160 кВт на частоте около 34 ГГц при ширине полосы более 7 % и коэффициенте усиления

около 20 дБ.

В рамках совершенствования специализированных гиротронных комплексов, предназначенных для решения технологических задач, в ИПФ создан непрерывный гиротрон на второй гармонике гирочастоты с рекордным КПД 60% при уровне выходной мощности 10 кВт. Достигнутое значение КПД обеспечивается использованием одноступенчатой рекуперации энергии и оптимизацией распределения продольного магнитного поля соленоида. Исследованиями установлено, что применение микроволнового нагрева позволяет добиться заметного сокращения продолжительности процессов высокотемпературной обработки и снижения температуры, требуемой для их завершения. Получены образцы высокоплотных керамических материалов с однородной микроструктурой, в том числе с размером зерна в нанометровом диапазоне, и с улучшенными механическими функциональными свойствами.

В последние годы в ИПФ РАН активно ведутся работы по созданию мощных источников ТГц излучения [2], востребованных для диагностики и спектроскопии различных сред, создания плотной плазмы и управления ее параметрами (управляемый термоядерный синтез, точечные плазменные источники рентгеновского излучения, дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения). Наряду с традиционными гироприборами, работающими при очень сильных магнитных полях на основном циклотронном резонансе, разрабатываются генераторы на высоких циклотронных гармониках с использованием оригинальных электронных и электродинамических методов селекции рабочего типа колебаний. В экспериментах достигнута мощность 5-0,5 кВт в одиночных импульсах длительностью 50 мкс на рекордных частотах 1-1,3 ТГц. Для спектроскопических приложений создан гиротронный комплекс на основе непрерывного гиротрона с частотой 0,26 ТГц мощностью до 1 кВт при долговременной стабильности частоты  $10^{-9}$  и рекордно узкой ширине спектральной линии - 1 Гц.

1. Thumm M., Denisov G., Sakamoto K. and Tran M. *Nucl. Fusion* **59(7)** (2019) 073001
2. Glyavin M., Denisov G. 20th International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2019) April 28 - May 1, 2019, Busan, South Korea.

## Синхронизация генераторов, связанных с задержкой

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

СарГУ, Саратов

Исследование синхронизации ансамблей связанных автоколебательных систем является одним из актуальных направлений современной нелинейной динамики. С практической точки зрения большой интерес представляют задачи о взаимной синхронизации связанных мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов. При этом принципиальную роль играет учет конечного времени распространения сигнала между двумя генераторами, поскольку в СВЧ диапазоне расстояние между ними, как правило, существенно превышает длину волны. Известно, что запаздывание в канале связи существенно влияет на процессы синхронизации [1]. В работах [2,3] была введена в рассмотрение модель двух автоколебательных осцилляторов с предельным циклом, связанных с задержкой, которая описывается уравнениями для медленно меняющихся комплексных амплитуд колебаний.

Было показано, что наличие запаздывания приводит к ряду принципиальных отличий от классической картины взаимной синхронизации двух генераторов с одной степенью свободы. В докладе представлены результаты подробного анализа режимов синхронизации в данной системе. Исследование проводится с помощью программных пакетов бифуркационного анализа XPPAUT [4] и DDEBifTool [5], а также с помощью численного моделирования. Картина языков синхронизации сильно зависит от набега фазы  $\psi$ . В случае, когда  $\psi \rightarrow \pi n$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ , связь носит диссипативный характер. В этом случае устанавливается синфазная синхронизация двух генераторов. При  $\psi \rightarrow \pi n + \pi/2$ ,  $n \in \mathbb{Z}$  доминирует инерционная связь, в этом случае возможна как синфазная, так и противофазная синхронизация, т.е. возможна бистабильность синхронных режимов. В работе подробно изучены механизмы возникновения и исчезновения мультистабильности, а также структура областей синхронизации на плоскости параметров частотная расстройка — коэффициент связи. Проведен анализ влияния неизохронности на режимы синхронизации. Также рассмотрены особенности синхронизации в системе связанных генераторов с жестким возбуждением. Изучаются явления, наблюдаемые при увеличении времени задержки, показано, что при этом число сосуществующих режимов увеличивается. В качестве конкретного примера рассматривается синхронизация в системе двух связанных гиротронов — мощных генераторов миллиметрового диапазона. Интерес к этой задаче обусловлен тем, что системы из нескольких гиротронов применяются для электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, и при этом важно обеспечить когерентность генерируемого сигнала.

Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований  $\epsilon$  18-02-00839.

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. Адилова А.Б., Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Бифуркационный анализ взаимной синхронизации двух генераторов с запаздыванием в цепи связи *Нелинейная динамика* **13** (2017) С. 3-12
4. <http://www.math.pitt.edu/~bard/xpp/xpp.html>
5. Engelborghs K., Luzyanina T., Roose D. Numerical bifurcation analysis of delay differential equations using DDE-BIFTOOL *CACM Trans. Math. Software* **28** (2002) P. 1-21

---

**Нелинейные магнитные колебания и волны в магнитных микро- и наноструктурах**

Высоцкий С.Л., Дудко Г.М., Кожевников А.В., Никулин Ю.В., Павлов Е.С., Сахаров В.К., Селезнев М.Е., Хивинцев Ю.В., Джумалиев А.С., Филимонов Ю.А.

*СФ ИРЭ РАН, Саратов*

Обсуждается состояние исследований нелинейных магнитных колебаний и волн в микро- и наноструктурах на основе пленок железоиттриевого граната (ЖИГ).

\*Рассмотрены результаты исследования особенностей развития параметрической неустойчивости спиновых волн в решетках на основе ортогональных микроволноводов ЖИГ. Показано влияние латерального квантования на развитие параметрической неустойчивости спиновых волн в микроволноводах. Анализируются возможности подхода к анализу процессов параметрической неустойчивости спиновых волн в микроструктурах на основе микромагнитного моделирования. Обсуждаются возможности использования процесса стимулированного возбуждения вторичных спиновых волн слабым зондирующим сигналом для нейроморфных вычислений.

\*\*Рассматриваются эксперименты по изучению механизмов формирования солитонов поверхностных спиновых волн в структурах магнетонный кристалл-диэлектрик-металл (МК-Д-М). Сравняются результаты влияния эффектов самовоздействия на распространение импульсов в структурах МК-Д-М на частотах аномальной дисперсии вызванных как металлизацией, так и резонансами Брэгга в структуре. Рассмотрены эффекты детектирования спиновых волн в структурах ЖИГ- полупроводник n-InSb и ЖИГ - платина. Показано, что развитие параметрической неустойчивости приводит к снижению чувствительности детекторов.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ - 17-19-01673. \*\*Работа выполнена при поддержке РФФИ гранты 18-57-00005-Бел, 17-07-01452, 16-29-14058, 18-57-00008-Бел, 19-37-90099.

**Фрактальная геометрия, многомодовые двухзазорные резонаторы и мощные многолучевые клистроны**

**Царев В.А.**

*СГТУ, Саратов*

В настоящее время многолучевые клистроны (МЛК) широко применяется в современных подвижных, бортовых и космических системах локации, управления движущимися объектами, навигации, связи [1]. Развитие МЛК на современном этапе сопровождается переходом на новые частотные диапазоны и требует дальнейшего увеличения мощности, повышения КПД, расширения полосы усиливаемых частот, уменьшения массы и габаритов этих приборов. Для этого необходимо переходить к многомодовому режиму взаимодействия, а также использовать новые конструкции пространственно-развитых резонаторов (ПР), обладающих улучшенным комплексом электрических и массогабаритных (КЭМ) параметров.

Новый тип колебательных ПР систем, о котором пойдет речь в этой статье - фрактальные двухзачорные резонаторы (ФДР) древовидного типа [2]. При их конструировании, так же, как и при проектировании фрактальных антенн [3] и фрактальных фильтровых систем [4], используются не подлинные древовидные фракталы [5], а лишь несколько первых их итерационных форм, получивших во фрактальной геометрии название "пре-фракталы" (pre-fractal). В докладе рассматриваются различные методы построения плоской "кроны" симметричного резонансного фрактального "дерева" такие, как метод клеточных автоматов Улама-Уорбертона [6] и метод круговых фракталов [7]. Приведены результаты трехмерного электродинамического моделирования ряда фотонно-кристаллических конструкций ФДР. Для всех типов рассмотренных колебательных систем выполнен анализ положения резонансной частоты высшей  $2\pi$  - моды и паразитных резонансов других высших мод по отношению к резонансной частоте основной  $\pi$  - моды.

Представлены результаты численного исследования поведения КЭМ этих мод при различных соотношениях поперечных размеров дополнительных ребер, установленных на внешней стенке. Даны оценки выходных параметров МЛК, имеющих ФДР, в которых реализуется высокоэффективный многомодовый режим взаимодействия с многолучевым электронным потоком на кратных резонансных частотах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта НК 19-07-00611/19 от 09.01.2019.

1. Gelvich E. A., Borisov L. M., Pugin V. I. et al. *Int. Microwave Symp. Dig. USA* **3** (1991) 251-245.
2. Царев В. А., Нестеров Д. А. *Радиотехника* **7** (2016) 87-91.
3. Слюсар В. И. *Электроника: наука, технология, бизнес* **5, 79** (2007) 78-82.
4. Jarry P. *Design and Realizations of Miniaturized Fractal Microwave and RF Filters*. Hoboken: J. Wiley & Sons: IEEE Press. 2009. p.194.
5. Mandelbrot B., Frame M. *Mathematical Intelligencer* **21** (1999) 18-27.
6. Singmaster D. *Magazine of The Open University* **195** (2003) 2-7.
7. Балханов В. К. *Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления*. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета. 2013. 224 с.

## Хаотические диссипативные солитоны и многосолитонные комплексы в спин-волновых и вакуумных генераторах

Гришин С.В., Бир А.С., Москаленко О.И., Романенко Д.В., Скороходов В.Н., Дмитриев Б.С.

СарГУ, Саратов

В теории самоорганизации солитоны и динамический хаос традиционно рассматриваются как два независимых нелинейных феномена, возникновение которых связано с отсутствием или с наличием в системе неустойчивости. Так, солитоны представляют собой асимптотически устойчивые состояния динамической системы, в то время как динамический хаос есть результат развития в системе неустойчивости по ляпунову. Первыми источниками динамического хаоса в микроволновом диапазоне были "шумотроны" - кольцевые вакуумные генераторы, выполненные на основе двух усилительных ламп бегущей

волны (ЛБВ), одна из которых работала в режиме линейного усиления сигнала, а другая - в сильно нелинейном режиме, на падающем участке амплитудной характеристики [1]. Наличие падающего участка приводило к развитию амплитудного механизма модуляции сигнала и к генерации хаотических колебаний. Первыми источниками диссипативных солитонов в микроволновом диапазоне являются спин-волновые генераторы, в которых помимо баланса между усилением и потерями устанавливался баланс между дисперсией и нелинейностью ферромагнитной среды [2]. В указанных генераторах формировались периодические последовательности как светлых, так и темных солитонов огибающей спиновых волн. В последние годы была обнаружена неустойчивость солитонных состояний, которая обусловила генерацию хаотических диссипативных солитонов [3].

В настоящем докладе приводятся результаты экспериментального исследования режимов генерации хаотических многосолитонных комплексов в кольцевых спин-волновых генераторах. Основное внимание уделяется формированию таких структур за счет одновременного использования конкурирующих трех- и четырехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий совместно с насыщающимися поглотителями [4], насыщающимися усилителями и управлением дисперсией спиновых волн [5]. Показана принципиальная возможность генерации многосолитонных комплексов, состоящих либо из светлых диссипативных солитонов, либо из связанных состояний светлых и темных диссипативных солитонов, либо только из темных диссипативных солитонов субнаносекундной длительности. Помимо этого демонстрируется возможность формирования хаотических диссипативных солитонов в виде светлых импульсов “гигантской” амплитуды [6] и темных импульсов в схемах “шумотрона” на основе пролетных клистронов и ЛБВ-усилителей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант No 19-02-00075-а).

1. Кислов В.Я., Мясин Е.А., Богданов Е.В. А.с. No 1125735 (СССР), 23.11.1984. Бюл. No 43.
2. Kalinikos V.A., Kovshikov N.G., Patton C.E. *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) 4301.
3. Beginin E. N., Grishin S.V., Sharaevsky Y.P. *JETP Lett.* **88** (2008) 647.
4. Grishin S.V., Dmitriev B.S., Moskalenko O.I. et al. *Phys. Rev. E* **98** (2018) 022209.
5. Бир А.С., Гришин С.В. *Письма в ЖЭТФ* **110** (2019) 348.
6. Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Скороходов В.Н. *Письма в ЖТФ* **45** (2019) 33.

## Захват частоты многомодового гиротрона квазимонохроматическим внешним сигналом

Бакунин В.Л., Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

Исследованы режимы генерации в многомодовом гиротроне под воздействием внешнего квазимонохроматического сигнала с частотой, близкой к частоте рабочей моды. Вычисления проводились для мощного 170-ГГц гиротрона, разработанного в ИПФ РАН для ИТЕР. Рассмотрены различные типы модуляции параметров внешнего сигнала: частотная и амплитудная модуляции, а также воздействие двух монохроматических сигналов с близкими частотами. Результаты вычислений демонстрируют возможность стабилизации частоты и контроля спектра излучения при выполнении определенных условий для

параметров сигнала, значительное влияние нелинейного взаимодействия мод на процесс захвата частоты, возможность достижения высоких КПД при умеренных токах и увеличения полосы перестройки частоты излучения.

Контроль спектра излучения гиротрона представляет интерес для таких приложений, как подавление неустойчивостей плазмы в токамаках и стеллараторах, спектроскопия, а также создание комплекса когерентно излучающих гиротронах в больших установках УТС.

Захват частоты многомодового гиротрона внешним сигналом с постоянными параметрами позволяет обходить такие проблемы, как конкуренция мод, нахождение областей высокого КПД в зоне жесткого возбуждения рабочей моды, нестабильность источника напряжения, вызывающая нестабильность частоты гиротрона и обеспечивать работу гиротрона в режиме одномодовой одночастотной генерации с высоким КПД. В ранних работах [1, 2] был рассмотрен прямой ввод/вывод излучения в гиротрон, при котором внешний сигнал имел структуру моды обратного вращения, слабо взаимодействующей с полем рабочей моды и электронным пучком.

Разработка в ИПФ РАН синтезированного квазиоптического преобразователя [3], благодаря которому внешний сигнал имеет структуру и направление вращения рабочей моды, инициировала ряд экспериментальных [4] и теоретических [5, 6] исследований захвата частоты мощных многомодовых гиротронов внешним сигналом с постоянными параметрами.

В настоящей работе теоретически исследовано воздействие на мощный многомодовый гиротрон (170 ГГц, 1.5-2 МВт, рабочая мода TE<sub>28,12</sub>) квазимонохроматического внешнего сигнала с частотной либо амплитудной модуляцией, а также двух монохроматических сигналов с близкими частотами. Результаты расчетов, показывают возможность стабилизации частоты и управления спектром в таком гиротроне, а также сильное влияние нелинейного взаимодействия мод на процесс захвата частоты. В режиме захвата частоты возможно достижение высокого КПД при умеренных токах и расширение полосы перестройки частоты излучения.

Если все спектральные компоненты внешнего частотно-модулированного сигнала остаются в полосе захвата и частота сигнала изменяется медленно в сравнении с временем захвата, то частота гиротрона отслеживает частоту внешнего сигнала. Если мгновенная частота сигнала выходит за полосу захвата, появляются биения либо возбуждаются паразитные моды.

Под воздействием внешнего амплитудно-модулированного сигнала либо двух монохроматических сигналов возникают как амплитудная, так и частотная модуляции излучения гиротрона. Если биения достаточно глубоки и их период значительно превышает время захвата частоты, возможно возбуждение паразитных мод.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект No19-79-30071)

1. Воронин Э.С. *Радиотехника* **14**, **2** (1959) 48-56.
2. Мартыненко Д.П., Хохлов Р.В. *Радиотехника и электроника* **8** (1957) 1001-1011.
3. Яковлев В.П. Синхронизация автогенератора слабомодулированной внешней силой. *Радиотехника и электроника* **10** (1961) 1609-1616.
4. N.Kharchev, A.Cappa, D.Malakhov, et. al. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **36**, **12** (2015) 1145-1156.
5. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. *Applied Physics Letters* **106** (2015) 263501.

6. Зотова И. В., Гинзбург Н. С., Денисов Г. Г., и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **58**, **9** (2015) 759-769.
7. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В. *Известия вузов. Радиофизика* **59**, **8-9** (2016) 709-719.
8. Бакунин В. Л., Гузнов Ю. А., Денисов Г. Г., и др. *Письма в ЖТФ* **44**, **11** (2018) 38-45.

## Генерация темных многосолитонных комплексов в магнотонном кольцевом резонаторе с управлением дисперсией и конкурирующими нелинейными спин-волновыми взаимодействиями

Бир А.С., Гришин С.В.

*СарГУ, Саратов*

Многосолитонные комплексы представляют собой локализованные в пространстве или во времени связанные состояния нескольких солитонов, которые активно исследуются в последние два десятилетия в нелинейной оптике [1] и спин-волновой электронике [2]. В спин-волновой электронике генерация солитонов огибающей, до настоящего времени, исследовалась в активных кольцевых резонаторах с регулярными магнотонными волноводами, в которых развивались, в основном, только четырехволновые нелинейные спин-волновые взаимодействия [3]. В случае циркуляции в кольце одного солитона формировалась периодическая последовательность импульсов, набег фазы между которыми был кратен  $2\pi$ . Если же в кольце циркулировали несколько солитонов, то набег фазы между ними был отличен от  $2\pi$  и зависел от количества солитонов. Стоит отметить, что в вышеупомянутых работах [2, 3] длительность четырехволновых солитонов была порядка десятков наносекунд.

В настоящем докладе представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие режимы генерации многосолитонных комплексов, состоящих из темных солитонов огибающей спиновых волн, в кольцевой автоколебательной системе с нерегулярным магнотонным волноводом и усилителем, работающем в режиме насыщения выходной мощности. Такой волновод одновременно поддерживает конкуренцию между трех- и четырехволновыми нелинейными спин-волновыми взаимодействиями и распространение магнитостатических волн (МСВ) с разными видами дисперсии: нормальной и аномальной. В качестве нерегулярного волновода используется ГЦобразный магнотонный волновод, в котором одновременно распространяются поверхностная МСВ (ПМСВ), обладающая нормальной дисперсией, и обратная объемная МСВ (ОМСВ), которая, в свою очередь, обладает аномальной дисперсией. Были рассмотрены две генераторные схемы: в одной из них во входном плече волновода возбуждается ПМСВ, а в другой - ОМСВ. В обеих схемах наблюдалась генерация многосолитонных комплексов, состоящих из темных параметрических импульсов, которые содержат "солитонные поезда", формирующиеся из нескольких темных четырехволновых солитонов наносекундной [4] и субнаносекундной длительности. Установлено, что темные солитоны формируются на ПМСВ, что подтверждается результатами численного исследования нелинейного уравнения Шредингера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант No 19-02-00075-а)



1. P. Grelu and N. Akhmediev. *Nature Phot.* **6** (2012) 84.
2. Grishin S.V., Dmitriev B.S., Moskalenko O.I. et al. *Phys. Rev. E* **98** (2018) 022209.
3. M. Wu. *Solid State Phys.* **62** (2010) 163.
4. Бир А.С., Гришин С.В. *Письма в ЖЭТФ* **110** (2019) 348.

## Исследование эффективности отбора энергии от электронного потока в четырехззорном фотонно-кристаллическом резонаторе, установленном на выходе многолучевого клистрона

Царев В.А., Мучкаев В.Ю.

СГТУ, Саратов

При разработке широкополосных миниатюрных многолучевых клистронов (МЛК), работающих в  $K$ -диапазоне частот (18 - 26.5 ГГц), возникает целый ряд принципиальных ограничений, связанных, в первую очередь, с малыми размерами резонаторов, что приводит к резкому падению основных параметров МЛК: выходной мощности, коэффициента полезного действия, относительной полосы усиливаемых частот. Все эти параметры напрямую зависят от эффективного характеристического сопротивления  $\rho_{eff}$ , увеличить которое можно за счет наращивания числа зазоров. Однако в резонаторах классической конструкции это приводит к уменьшению разреженности спектра, в результате чего резонатор перестанет выполнять свои функции.

Одним из путей решения данной проблемы является использование так называемых фотонно-кристаллических (PBG) резонаторов [1-2], резонансный объем которых образован дефектом в решетке из металлических стержней. Достоинствами таких резонаторов является возможность управления частями как рабочего, так и паразитных видов колебания.

В данной работе исследуется четырехззорный фотонно-кристаллический резонатор, внутренняя структура которого построена по правилам клеточного автомата "Улама-Уорбертона" на гексоганальной сетке. Была проведена оптимизация размеров рассматриваемого резонатора с учетом его использования в качестве выходного в шестилучевом усилительно клистроне с рабочей частотой 24.15 ГГц.

Оценка достижимых значений КПД  $\eta$  и выходной мощности  $P_{out}$  выполнена с помощью математической модели, основанной на решении самосогласованной системы уравнений Максвелла - Власова. Решения кинетического бесстолкновительного уравнения Власова осуществлялось традиционным для задач электроники СВЧ методом крупных частиц. Резонатор возбуждался модулированным по плотности электронным потоком, состоящим из последовательности импульсов в форме кривой Гаусса, с коэффициентом заполнения пролетных каналов 0.6.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта No 19-07-00611.

1. Sirigiri J.R., Kreischer K.E., Machuzak J., Mastovsky I. *Phys. Rev. L.* **24** (2001) 562831.
2. Shapiro M.A., Brown W.J., Mastovsky I. *Rev. of Mod. Ph.* (2001) 44017(29).

## **Автомодельные режимы усиления и генерации коротких импульсов электронными потоками**

**Ростунцова А.А., Рыскин Н.М.**

*СарГУ, Саратов*

Короткие мощные импульсы СВЧ излучения представляют интерес для ряда научных и практических задач, например, в наносекундной локации высокого разрешения. Известно, что при распространении импульсов вдоль прямолинейных электронных потоков (ЭП) возможно их усиление и одновременное уменьшение эффективной длительности. На основе ряда работ, например, [1, 2], можно сделать вывод, что эти процессы проявляют свойство самоподобия (автомодельности).

В докладе представлены результаты исследований взаимодействия прямолинейного ЭП с прямой или обратной замедленной электромагнитной волной в усилителях на основе лампы бегущей волны (ЛБВ) и генераторах на основе лампы обратной волны (ЛОВ). Рассматривалось приближение малого изменения скорости электронов (когда скорость электронов меняется мало в процессе взаимодействия) и приближение малого изменения энергии электронов (когда и скорость, и энергия электронов меняются мало).

Групповой анализ уравнений нелинейной нестационарной теории позволил выявить ряд симметрий исследуемой системы, в частности, в рамках обоих приближений были найдены автомодельные решения, которые описывают одновременно усиливающийся и сжимающийся импульс.

Сопоставление с результатами компьютерного моделирования показало, что найденное решение соответствует усилению коротких импульсов в ЛБВ и их генерации в ЛОВ, поскольку основные характеристики таких импульсов (пиковая амплитуда, ширина, координата максимума) при численных расчетах зависят от времени в соответствии с аналитическими закономерностями, полученными из анализа автомодельных решений. В частности, пиковая амплитуда импульсов растет линейно с течением времени в обоих приближениях. Также в рамках работы представлено исследование влияния других управляющих параметров (величина и форма начального возмущения, длина системы) на поведение импульсов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант No 19-72-10119).

1. Рыскин Н.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В. *Письма в ЖТФ* **39**, в.9 (2013) 86
2. Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С. и др. *Известия вузов. Радиофизика* **54**, No 8-9 (2011) 588
3. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. *ЖЭТФ* **154**, No 4 (2018) 691

## **Уменьшение нелинейных искажений сигналов в ЛБВ О-типа методом замещения сигналов**

**Шалаев П.Д.**

*АО "НПП "Алмаз", Саратов*

Для уменьшения нелинейных искажений радиосигналов в ЛБВ О-типа (далее ЛБВ) наибольшее практическое применение получили методы, основанные на принципе предварительного искажения входных сигналов. При усилении предварительно искаженных сигналов происходит компенсация предварительных и возникающих в нелинейном режиме работы ЛБВ искажений в случае отличия их по фазе на  $\pi$ . Однако, эти методы требуют точной фазировки многих сигналов на входе ЛБВ с учетом амплитудно-частотных, амплитудно-фазовых и фазо-частотных характеристик ЛБВ и их изменения на протяжении всего времени ее эксплуатации.

В докладе обсуждаются возможности применения предложенного в [1] метода уменьшения нелинейных искажений сигналов в ЛБВ за счет подачи на ее вход дополнительного сигнала. Представлены результаты экспериментальных исследований нелинейных искажений в ЛБВ с высоким КПД при подаче на ее вход дополнительного сигнала постоянной амплитуды с произвольной фазой. Полученные данные позволяют сделать вывод, что линеаризация характеристик ЛБВ с помощью дополнительного сигнала может обеспечить высокую стабильность линеаризации параметров ЛБВ при изменении ее параметров без применения сложных схем управления амплитудами и фазами входных сигналов.

Приводятся выводы о физической природе замещающего действия дополнительного сигнала при изменении мощности рабочих сигналов на входе ЛБВ. Анализируются причины, по которым этот метод уменьшения нелинейных искажений сигналов в ЛБВ не получил практического применения, и возможность их преодоления. Дается характеристика энергетической эффективности линеаризации параметров ЛБВ методом дополнительного сигнала, предлагается способ ее повышения.

1. Кац А. М., Кудряшов В. П., Трубецков Д. И. Сигнал в лампах с бегущей волной: в 2 ч. Ч.1 .Лампа с бегущей волной О-типа. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. СГУ. 1984. 144с.

## **Пространственно- и частотно-селективные режимы спин-волнового транспорта в магнитных микроструктурах.**

**Мартышкин А.А., Одинцов С.А., Губанова Ю.А., Бегинин Е.Н., Шешукова С.Е., Никитов С.А., Садовников А.В.**

*СГУ, Саратов*

Новое научное направление в физике конденсированного состояния - магноника - ставит своей целью исследование характеристик и методов управления спин-волновым транспортом в различных волноведущих и резонаторных системах в микро- и наномасштабах [1]. Управление свойствами СВ может осуществляться различными способами [2]: путем изменения локальных свойств магнонных структур; вариацией формы спин-волновых структур; путем изменения ориентации и величины поля подмагничивания; путем создания метаповерхностей для распространяющихся СВ; путем использования нелинейных спин-волновых свойств; путем создания периодических структур с периодом, сравнимым с длиной СВ - магнонных кристаллов.

В данном докладе показаны различные режимы распространения спиновых волн в системе латеральных магнитных микроволноводов с коммутационной периодической

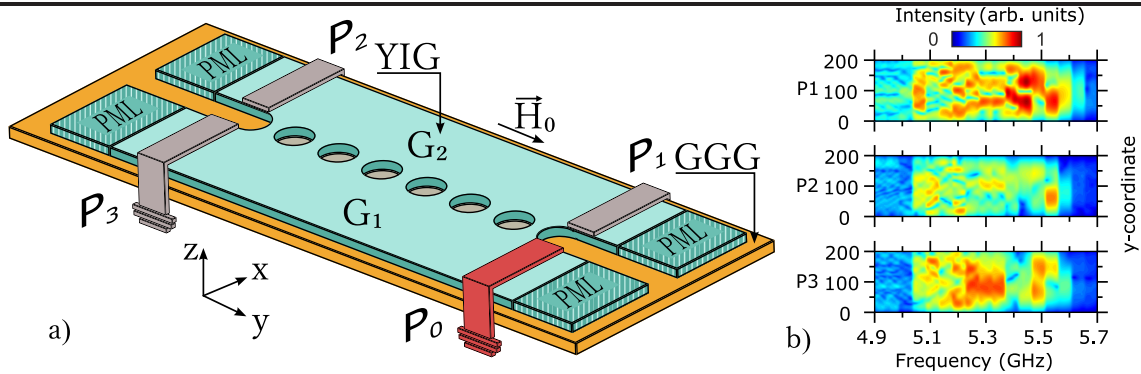


Рис. 1: (a) Схематическое изображение исследуемой структуры; (b) пространственно-частотные распределения интенсивности спиновой волны в каналах  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ .

неоднородностью в виде цилиндрических отверстий. Проведенные исследования выявили механизмы, обуславливающие характерные режимы распространения спиновых волн с пространственно-частотной селекцией в структурах с периодической системой отверстий, что может быть использовано для создания управляемых спин-волновых демультиплекторов, делителей мощности и ответвителей СВЧ-сигнала.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (19-37-80004).*

1. Kruglyak V.V., Demokrotiv S.O., Grundler D. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 264001, (2010).
2. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Odintsov S., Gubanov S.E., Sheshukova V.A., Nikitov S.A. *JETP Lett.*, **108**, 332Ц338, (2018)

## О нелинейной теории двухрезонаторного клистрона с пространством дрейфа в виде среды с комплексной диэлектрической проницаемостью

Фунтов А.А.

СарГУ, Саратов

В настоящее время в СВЧ электронике наблюдается определенный интерес к метаматериалам, о чем свидетельствует большое количество докладов на соответствующих конференциях (см., напр., [1, 2]). Как известно, метаматериалы можно описывать математическим аппаратом, развитым для диэлектриков как для сред с комплексной диэлектрической проницаемостью. Однако один из истоков такого подхода - резистивный усилитель долгое время был незаслуженно забыт. На фоне вновь вспыхнувшего интереса к этому прибору [3, 4] представляется важным создать и исследовать нелинейную теорию резистивного усилителя с объемными резонаторами как модулирующим и съемным устройствами. Цель настоящей работы построить приближенную нелинейную теорию клистрона-усилителя, в котором между входным и выходным резонатором вместо пространства дрейфа располагается среда с комплексной проводимостью или метаматериалами.

Поскольку в основе принципа работы резистивного усилителя и усилителя с комплексной проводимостью лежит именно волновой процесс, логично использовать для построения нелинейной теории метод принудительной гармонизации, основная идея которого в том, чтобы рассматривать переменную часть угла пролета электронов (периодическую функцию времени влета) с помощью ряда Фурье с небольшим количеством членов. В работе рассматривается следующая модель: ионнокомпенсированный цилиндрический электронный поток пронизывает входной резонатор, модулируется по скорости и влетает в среду с комплексной диэлектрической проницаемостью и/или с произвольной комплексной проводимостью и, пролетая выходной резонатор, наводит на сетках высокочастотное поле.

В качестве исходного использовалось уравнение движения в переменных Лагранжа для дисковой модели цилиндрического ионнокомпенсированного электронного потока с учетом метода фундаментальной частоты по методике работы [5].

Из проведенных расчетов следует, что при решении уравнения количество учтенных гармоник почти не сказывается на первой, из чего следует, что для дальнейших расчетов можно ограничиться только первой гармоникой.

Для оценки коэффициента усиления по напряжению в рассматриваемой модели была использована методика из монографии [6] (в случае резонатора, настроенного на частоту сигнала). Из проведенных расчетов следует, что наличие проводимости у пространства дрейфа может позволить уменьшить длину прибора, однако приходится выбирать между коэффициентом усиления и выходной мощностью и КПД: если увеличивается одно (по сравнению с обычным клистроном), то другое уменьшается при прочих равных. Причем показано, что при некоторых параметрах в нелинейном режиме, в отличие от режима слабых сигналов, наблюдается усиление.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 18-02-00666.

1. Lu X. et all. IVEC-2017.
2. Rowe T. et all. IVEC-2017.
3. Rowe T., Behdad N., Booske J. *IEEE Transactions on Plasma Science* **43(7)** (2015) 2123-2131.
4. Rowe T., Behdad N., Booske J. *IEEE Transactions on Plasma Science* **44(10)** (2016) 2476-2484.
5. Овчаров В. Т., Солнцев В. А. *Радиотехника и электроника* **7(11)** (1962).
6. Клинтроны. - М.: "Сов. радио", 1952, 226с.

## **Обработка информационных сигналов в реконфигурируемых многоуровневых магнитных сетях на основе трехмерных решеток магнитных микро- и наноструктур**

**Садовников А.В., Грачев А.А., Одинцов С.А., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П.**  
*СарГУ, Саратов*

В последнее время интерес представляет исследование свойств спиновых волн (СВ) при их распространении в магнитных волноведущих структурах микронных и нанометровых размеров, в случае различной конфигурации структур и параметров намагничивания. При этом основное внимание уделяется использованию СВ в качестве носителей

информационных сигналов, поскольку в этом случае удастся реализовать класс устройств обработки информационного сигнала на принципах магноники. Как известно, свойства СВ определяются дипольным и обменным взаимодействием в магнитных средах и могут значительно меняться при изменении параметров среды. В то же время путем структурирования тонких магнитных пленок удастся управлять свойствами СВ при использовании как геометрических эффектов, возникающих при волноводном распространении сигнала, так и свойств анизотропии формы магнитных структур, проявляющихся в изменении статических магнитных свойств образцов.

Одним из методов управления свойствами СВ является нарушение трансляционной симметрии в волноведущей магнитной структуре, сформированной, например, путем формирования изгиба (поворота) магнитного микроволновода. На основе данного подхода удалось реализовать целый ряд функциональных устройств магноники для мультиплексирования и демультимплексирования сигналов в частотной области, пространственно-частотного разделения сигналов, линейного и нелинейного переключения в системах магнитных микроволноводов. В настоящей работе рассмотрено применение экспериментального метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии и численных методов микромагнитного моделирования для исследования динамики спин-волновых возбуждений в планарных магнитных структурах. Приведены результаты исследования латеральных, нерегулярных и композитных магнитных микроструктур. Предложен новый класс устройств для выполнения логических операций на принципах интерференции спиновых волн в системах латеральных волноводов с локально индуцированными деформациями [1]. Показана возможность управления свойствами спиновых волн (СВ) в латеральной системе магнитных микроструктур с нарушением трансляционной симметрии. На основе выявленных закономерностей, обуславливающих установление режимов пространственной и частотной селекции спин-волнового сигнала, показана возможность использования латеральных структур для создания демультимплексоров, делителей мощности, ответвителей и устройств обработки СВЧ-сигнала на принципах магноники.

*Результаты исследования поддержаны проектом РНФ (No 18-79-00198).*

1. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Serdobintsev A.A., Mitin D.M., Nikitov S.A. *Phys. Rev. Lett.* **120** 257203 (2018)

## Система Рабиновича-Фабриканта и ее обобщение

Тюрюкина Л.В., Кузнецов С.П.

*СФ ИРЭ РАН, Саратов*

В 1979 году Рабинович и Фабрикант предложили модель, описывающую стохастичность, возникающую в результате развития модуляционной неустойчивости в неравновесной диссипативной среде [1]:

$$\dot{x} = y(z - 1 + x^2) + \gamma x, \dot{y} = x(3z + 1 - x^2) + \gamma y, \dot{z} = -2z(\nu + xy), \quad (1)$$

где  $x, y, z$  - динамические переменные,  $\gamma, \nu$  - параметры.

Модель Рабиновича - Фабриканта (1) демонстрирует сложную динамику и применима к системам различной природы, в которых имеет место трехмодовое параметрическое

взаимодействие в присутствии кубической нелинейности [2-5]. Ее можно трактовать как результат применения метода медленных амплитуд к системе трех осцилляторов, описываемой функцией Лагранжа и диссипативной функцией Релея

$$L(x_0, x_1, x_2) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^2 (m_i \dot{x}_i^2 - k_i x_i^2) - U(x_0, x_1, x_2), R(x_0, x_1, x_2) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^2 \gamma_i \dot{x}_i^2, \quad (2)$$

где потенциал взаимодействия  $U(x_0, x_1, x_2)$  задан полиномом четвертой степени, в предположении резонансного условия  $2\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ , где  $\omega_i = \sqrt{k_i/m_i}$ .

В самом общем виде, при учете членов, вносящих вклад в резонансное взаимодействие, потенциал следует взять в виде

$$U(x_0, x_1, x_2) = \frac{1}{4}(x_0^4 + x_1^4 + x_2^4) + \frac{1}{2}\beta(x_0^2 x_1^2 + x_0^2 x_2^2 + x_1^2 x_2^2) + \mu(x_0^2 x_1 x_2 + x_1^2 x_0 x_2 + x_2^2 x_0 x_1) \quad (3)$$

а классическая модель Рабиновича-Фабриканта получается при выборе  $\mu = \beta = 3$ .

В связи с этим, мы вводим в рассмотрение обобщенную модель, для которой вместо уравнений (1) имеет место система, включающая дополнительные параметры  $\mu$  и  $\beta$ , следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \left[ \left( \frac{2}{3}\mu - \frac{2}{3}\beta + 1 \right) z - 1 + \frac{1}{3}\mu x^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3}\mu - \frac{2}{3}\beta + 1 \right) (x^2 + y^2) \right] + \gamma x, \\ \dot{y} &= x \left[ \left( \frac{2}{3}\mu + \frac{2}{3}\beta - 1 \right) z + 1 - \frac{1}{3}\mu x^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3}\mu - \frac{2}{3}\beta + 1 \right) (x^2 + y^2) \right] + \gamma y, \\ \dot{z} &= -2z \left( \nu + \frac{1}{3}\mu xy \right). \end{aligned} \quad (4)$$

В докладе представлены результаты сравнительного численного исследования классической модели Рабиновича - Фабриканта (1) и ее обобщенной версии (4). Построены карты динамических режимов, графики зависимости показателей Ляпунова от параметров, аттракторы и бассейны их притяжения, проведен численный бифуркационный анализ. В обобщенной системе отмечен новый тип динамического поведения, когда в фазовом пространстве наблюдается устойчивое инвариантное множество в виде эллипса, лежащее в плоскости  $z = 0$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 17-12-01008.

1. Рабинович М. И., Фабрикант А. Л. *ЖЭТФ* **77**, **2** (1979) 617.
2. Danca M.-F., Chen G. *IJBC* **14**, **10** (2004) 3409.
3. Danca M.-F. et al. *IJBC* **26**, **2** (2016) 1650038.
4. Liu Y., Yang Q., Pang G. *Journal of Computational and Applied Mathematics* **234**, **1** (2010) 101.
5. Кузнецов А. П., Кузнецов С. П., Тюрюкина Л. В. *Известия Саратовского университета - Новая серия. Серия Физика*. **19**, **1** (2019) 4.

## Некоторые особенности динамики уравнения с двумя запаздываниями

Кащенко И.С.

ЯрГУ, Ярославль

Рассмотрим уравнение с двумя запаздываниями

$$\dot{N} = r \left[ 1 - \frac{\alpha_1 N(t - T_1) + \alpha_2 N(t - T_2)}{K} \right] N.$$

Уравнения такого вида описывают, например, численность популяции с учетом возрастной структуры. Здесь  $T_1 > T_2 > 0$ , а весовые коэффициенты  $\alpha_1 \geq 0$  и  $\alpha_2 \geq 0$  определяют вклад соответствующей возрастной группы, причем  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ .

С помощью ряда нормирующих замен приходим к уравнению

$$\dot{u} = r[au(t - 1) - u(t - H)](1 + u), \quad 0 < H < 1. \quad (1)$$

Это уравнение имеет нулевое решение, которое соответствует решению  $N \equiv K$ . Изучим поведение всех его решений с начальными условиями (в пространстве  $C_{[-1,0]}$ ) из некоторой достаточно малой окрестности нулевого состояния равновесия. Основное предположение работы состоит в том, что параметр  $r$  является достаточно большим:  $r \gg 1$ . Удобно ввести обозначение  $\varepsilon = r^{-1}$ . Тогда  $0 < \varepsilon \ll 1$ .

Показано [1], что при фиксированных  $H$  нулевое состояние равновесия (1) неустойчиво. В связи с этим полагаем, что второе запаздывание  $H$  мало:  $H = \varepsilon h$ .

При  $h > \pi/2$  изучаемое состояние равновесия неустойчиво, а при  $0 < h \leq \pi/2$  найдется такое  $a_0 = a_0(h)$ , что при  $|a| < a_0$  решение  $u \equiv 0$  асимптотически устойчиво и все решения из некоторой достаточно малой, но фиксированной при  $\varepsilon \rightarrow 0$  окрестности нулевого состояния равновесия стремятся к нулю при  $t \rightarrow \infty$ . Если же  $|a| > a_0$ , то нулевое решение при этом условии неустойчиво и задача о динамике решений становится нелокальной.

Отсюда вытекает, что в рассмотрении нуждается случай, когда параметр  $a$  близок к  $\pm a_0(h_0)$  при  $h$  близком к  $h_0 \in (0, \pi/2]$ .

В этом случае характеристическое уравнение имеет бесконечно много корней, вещественные части которых стремятся к нулю при  $\varepsilon \rightarrow 0$ , и нет корней с положительной и отделенной от нуля вещественной частью. Тем самым можно говорить о том, что реализуется критический в задаче об устойчивости нуля случай бесконечной размерности. Методика исследования такого типа задач состоит в построении квазинормальной формы – специального нелинейного комплексного уравнения типа Гинзбурга-Ландау, динамика которого определяет при малых  $\varepsilon$  структуру решений (1) из окрестности нулевого состояния равновесия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта No 18-29-10043.

1. Кащенко И.С., Кащенко С.А. *ПНД* **27** (2019) 21.



## Сценарий перехода к гиперболическому гиперхаосу в неавтономной системе с запаздыванием

Купцов П.В., Кузнецов С.П.

СГТУ, Саратов

Мы изучаем сценарий перехода к гиперболическому гиперхаосу в неавтономной системе, предложенной в статье [1]:

$$\ddot{x} - [A \cos(2\pi t/T) - x^2]\dot{x} + \omega_0^2 x = \epsilon x(t - \tau)\dot{x}(t - \tau) \cos \omega_0 t. \quad (1)$$

Параметр, отвечающий за возбуждение, меняется с периодом  $T$ , что приводит к поочередному возникновению и затуханию колебаний. Запаздывание длительностью  $\tau$  обеспечивает передачу с малой амплитудой  $\epsilon$  затравки возбуждения от одной стадии возбуждения к другой, а нелинейность в линии запаздывания обеспечивает удвоение фазы передаваемого возбуждения. Если рассматривать систему стробоскопически с периодом  $T$  то для фазы получается отображение Бернулли, а в целом стробоскопическое отображение демонстрирует гиперболический хаос [1,2]. Как было показано в работе [3], при выполнении соотношения  $\tau = (k - 1/2)T$  система функционирует как  $k$  слабо связанных гиперболических подсистем так что наблюдается гиперболический гиперхаос с  $k$  положительными показателями Ляпунова.

В настоящей работе уменьшая  $T$  при фиксированном  $\tau = 12$  мы исследуем сценарий перехода к гиперболическому гиперхаосу с двумя положительными показателями Ляпунова. При  $T = 10$  гиперболический хаос с одним положительным показателем уже разрушен, и система демонстрирует регулярные колебания. При уменьшении  $T$  мы наблюдаем рождение режима с двумя положительными показателями Ляпунова, который представляет собой перемежаемость: пребывания около неподвижной точки в нуле чередуются с хаотическими всплесками. Затем, при дальнейшем уменьшении  $T$ , в фазовом пространстве рядом с неподвижной точкой рождается хаотическое подмножество и между ними возникает конкуренция. Этот режим характеризуется негауссовым распределением конечновременных показателей Ляпунова, вычисляемых на больших интервалах времени, а также аномальной диффузией ляпуновских сумм. Дальнейшая трансформация режима происходит, когда система начинает значительно реже посещать окрестности неподвижной точки: хотя она может оказаться сколь угодно близко к нулю, максимум функции распределения в нуле исчезает. Конкуренция между подмножествами прекращается и мы наблюдаем «обычный», негиперболический гиперхаос. Далее, когда система полностью прекращает посещать окрестности нуля и фаза становится хорошо определенной, происходит переход к гиперболичности. Гиперболический гиперхаотический аттрактор, в свою очередь, может быть двух видов. Сразу после перехода к гиперболичности существует вложенное в аттрактор хаотическое гиперболическое подмножество меньшей размерности, а при уменьшении  $T$  это множество исчезает. На фазовых портретах это превращение наблюдается как слияние двух петель аттрактора.

1. Кузнецов С.П., Пономаренко В.И. *Письма в ЖТФ*, **34**, вып.18 (2008) 1-8.
2. Kuptsov P.V., Kuznetsov S.P. *Phys. Rev. E* **94** (2016) 010201(R).
3. Баранов С.В., Кузнецов С.П. *Изв. вузов ПНД* **18** № 4 (2010) 111-120.

## Об условиях топологической сопряженности одномерных хаотических отображений

Аникин В. М., Аркадакский С.С., Ремизов А.С.

СарГУ, Саратов

Интерес к построению топологически эквивалентных отображений обусловлен тем, что полученное таким образом “новое” отображение хотя и отличается от исходного, но имеет характеристики, связанные с характеристиками исходного известными соотношениями, а некоторые остаются инвариантными. Методика синтеза сопряженных отображений хорошо известна [1]. Но обратная задача - определить, являются ли отображения сопряженными - относится к числу нерешенных и известна как задача Улама о сопряженных функциях [2]. В докладе мы представляем несколько частных условий сопрягаемости для одномерных хаотических отображений.

Среди бесконечного множества отображений, сопряженных с исходным, существует единственное, имеющее равномерное инвариантное распределение, которое мы называем базовым. Мы предлагаем искать условие сопряжения с заданным базовым отображением, тогда все отображения, удовлетворяющие этому условию, будут сопрягаться и между собой. Нам удалось выявить еще один инвариант соотношения Улама, а именно - производные от итерируемых функций в неподвижной точке для исходного и сопряженного отображений совпадают, при этом производная от сопряженной функции в этой точке не должна обращаться в нуль или бесконечность. Таким образом, показано, что **необходимым условием** сопряжения двух отображений является равенство производных от итерируемых функций того и другого отображения в соответствующих неподвижных точках. Этот результат обобщается для случая произвольного количества интервалов монотонности.

Далее, мы утверждаем, что два одномерных хаотических отображения с произвольным количеством интервалов монотонности сопряжены между собой **тогда и только тогда**, когда их базовые отображения связаны соотношением Улама, в котором  $\phi(x) = x$  или  $\phi(x) = 1 - x$ .

Для случая, когда базовым отображением является tent-map, получены следующие результаты.

**Необходимые условия.** Отображение сопрягается с tent-map, если на правом интервале монотонности производная в неподвижной точке равна -2. Кроме того, отображение сопрягается с tent-map, если отношение производных от итерируемой функции на границе интервалов монотонности равно -1.

**Достаточным условием** сопряжения симметричного отображения с tent-map является существование монотонного решения функционального уравнения следующего вида:  $\phi(x) = 2^n \phi(\Phi_1^{[n]}(x))$ , где  $\phi(0) = 0$ ;  $\phi(1) = 1$ , если при  $n \rightarrow \infty$  правая часть предела не имеет, то исходное отображение не сопрягается с tent-map.

**Необходимым и достаточным** условием сопряжения симметричного отображения с tent-map является условие симметричности инвариантного распределения,  $R(x) = R(1 - x)$ .

1. Аникин В.М., Голубенцев А.Ф. Аналитические модели детерминированного хаоса. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007, стр. 106
2. Улам С. Нерешенные математические задачи. - М.: Наука, 1964., стр. 83

## Ангармонический осциллятор в контексте квантового уравнения Ланжевена

Санин А.Л.

*СПбПУ, Санкт-Петербург*

В настоящем докладе обсуждаются квантовые ангармонические осцилляторы Дуффинга (КАОД) и Матье-Дуффинга (КАОМД).

Динамический отклик, спектры и стохастические резонансы численно моделируются в контексте квантовых уравнений Ланжевена для волновой функции, рассматриваемые осцилляторные системы возбуждаются импульсно из основного состояния и функционируют между бесконечными стенками потенциальной ямы, на которых заданы нулевые граничные условия на волновую функцию.

Изучаемый КАОД состоит из двух потенциальных ям и барьера между ними.

При воздействии начального силового импульса на частицу, локализованную в одной из ям (правой), возбуждается квантовый пакет волн; он осциллирует в ней в течение конечного времени. При этом происходит медленное туннелирование пакета волн в левую яму с последующей локализацией в ней, затем процесс повторяется многократно.

Частота, обусловленная динамическим туннелированием, равна частоте перехода из первого возбужденного состояния в основное, а соответствующая ей Фурье - амплитуда самая эффективная. Колебания в каждой из ям характеризуются частотой перехода из второго возбужденного состояния в первое [1]. Двумерный КАОД с четырьмя минимумами, барьером и связью между степенями свободы демонстрирует передачу спектра из одной степени свободы в другую, а при действии белого шума ослабление спектральных компонент [2].

КАОМД при малом параметрическом потенциале (без шума) характеризуется основной компонентой на частоте перехода из основного состояния в первое возбужденное и комбинационными компонентами, включающими частоты параметрического воздействия. Здесь обсуждается динамический режим, когда квадратичные слагаемые в операторе Гамильтона взаимно уничтожаются в моменты времени, определяемые периодом параметрического воздействия, при этом действует гауссовый белый шум [3].

Сравнительный анализ частотных спектров динамического режима с шумом и частот переходов между стационарными состояниями (без шума) проведен. Установлен стохастический механизм генерации субгармоник, а также алгебраические соотношения между динамическими частотами и частотами переходов для стационарного режима как при отсутствии суммарного потенциала, так и при наличии слагаемых второй и четвертой степени по координатам. С другой стороны, разности частот динамического режима, соответствующие последовательным экстремумам Фурье-компонент средней координаты равны частотам начального участка спектра, которые являются кратными от минимальной частоты спектра [4].

1. Багманов А.Т., Санин А.Л. *НТВ СПбПУ* **48** (2006) С.124
2. Sanin A., Semyonov E. *NPCS* **15** (2012) P.274
3. Санин А.Л., Смирновский А.А. *Изв. Вуз. ПНД* **24** (2016) С.54
4. Sanin A., Smirnovsky A. *MPM* **39** (2018) P.61

## Что может дать механизм взаимодействия бактерий (quorum sensing) для генерации разнообразия и мультистабильности динамики взаимодействующих одинаковых осцилляторов

Волков Е.И.

ФИАН РАН, Москва

Нелинейные осцилляторы являются основными объектами исследований в физике, химии, биологии, экологии и др. По мере развития методов генетической инженерии были построены синтетические осцилляторы для изучения механизмов регуляции экспрессии генов и для создания реальных генетических контуров с заданными ритмами колебаний. Эффективность работы осцилляторов, внедренных в живые клетки зависит от их взаимодействий, которые обеспечивают появление коллективных динамических автоколебательных режимов вместо усреднения осцилляций по ансамблю.

В 2000 году был создан и внедрен в бактерии простой генетический осциллятор (Репрессилатор) [1], состоящий из трех генов, кодирующих регуляторные белки, которые циклически и однонаправленно подавляют экспрессию друг друга, порождая предельный цикл. Регуляторные белки не выходят за пределы клеток и для организации связи между осцилляторами было предложено использовать естественный механизм коммуникации бактерий, т.н. “чувство плотности”, в основе которого лежит синтез небольшой сигнальной молекулы (автоиндуктор), которая легко покидает клетку, быстро движется в межклеточной среде и способна регулировать экспрессию генов [2]. Ген, кодирующий фермент, синтезирующий автоиндуктор, известен и схемы добавления этой системы к кольцу Репрессилатора могут быть разными, в зависимости от регуляции производства автоиндуктора и расположения его гена-мишени. В работе [2] была предложена схема, позволяющая синхронизировать популяцию Репрессилаторов с разными периодами колебаний.

В лекции будет рассказано о другой реализации схемы связи с участием автоиндуктора, которая обладает удивительными возможностями для генерации разнообразия динамических режимов в системе из двух одинаковых Репрессилаторов [3,4]. Помимо возникновения однородного и неоднородного (осцилляторная смерть) устойчивых стационарных состояний, в системе появляются: антифазный предельный цикл, двухчастотный тор, резонансные циклы, хаос и неоднородные предельные циклы. Двухпараметрические фазовые диаграммы демонстрируют обширные области параметров сосуществования аттракторов разного типа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты No 17-01-00070, 19-02-00610

1. M. B. Elowitz and S. Leibler *Nature* **403** (2000) 335
2. J. Garcia-Ojalvo, M. B. Elowitz, and S. H. Strogatz *PNAS* **101** (2004) 10955
3. E. Ullner et al., *Phys.Rev.Lett* **99** (2007) 98103
4. E. H. Hellen, E. Volkov, *Comm.Nonlin.Sci.Numer.Simul* **62** (2018) 462

## Графодинамика распределенных систем

Макаренко Н. Г.

*ГАО РАН, Санкт-Петербург*

В 1977 г. Марк Айзерман предложил описать динамику распределенного объекта или системы с помощью графодинамики: “граф представляет собой как бы мгновенный снимок, отражение явления в данный момент, а развитие событий во времени - динамика - связано не с движением по графу, а с изменением самого графа” [1]. Истоки самого подхода можно усмотреть в семафорной азбуке адмирала С.О. Макарова, идеограммах универсального языка епископа Джона Уилкинса, и языке танца пчел Карла фон Фриша.

Граф, т.е. конечное множество вершин и правило их соединения, является по видимому одной из самых простых математических конструкций. Его история восходит к известной задаче Эйлера о Кенинсбергских мостах. Не наделенные вначале никаким интерфейсом, геометрические графы использовались для решений многих задач, под разными именами: триангуляция Делоне, разбиение Дирихле, области Вороного, альфа формы, МОД и т.п. Топологические графы появляются в теории гомологий, в комплексах Чеха и Вьеториса-Рипса. Один из них, граф Рибо, построенный на критических точках, с успехом используются для описания земной топографии [2]. Идея кодирования топологии поверхности критическими точками принадлежит Джеймсу Максвеллу [3]. Простой двудольный граф, критическая сеть, использует устойчивые максимумы и минимумы поля как вершины, в пространстве масштабов, Scale-Space [4]. Оно получается итерацией свертки оригинального изображения с гауссовским ядром до получения инерционного масштаба. Свертка для компакта эквивалентна решению уравнения диффузии, в котором роль времени играет ширина ядра. Следовательно, можно получить оценку лапласиана, как разность двух диффузных изображений, вблизи устойчивого масштаба. Упорядочим значения экстремумов в таком лапласиане по величине. Тогда, сеть получается соединением каждого минимума, с ближайшим по величине максимумом.

Динамика поля приводит к перестройке графа, графодинамике. Удобным инструментом для ее описания служит спектр дискретного лапласиана или матрицы Лапласа-Кирхгофа [5]. Спектр позволяет “услышать” граф в смысле известной обратной задачи М.Каца [6].

Более интересным вариантом для полей является граф Морса. Он основан на дискретном варианте теории Морса и является градиентной дискретной моделью поля, состоящей из клеток комплекса Морса-Смейла [7]. Каждая клетка содержит максимум, минимум поля, два седла и имеет нулевую характеристику Эйлера. Комплекс допускает топологическое упрощение за счет исключения так называемых персистентных пар [8], сохраняющее эту характеристику.

Для описания динамики графа Морса, кроме спектра, можно использовать дискретную кривизну Риччи. Известны два основных способа ее вычисления для дискретных структур [9]. Первый опирается на формулу Бохнера-Вайценбека и дискретную теорию Морса. Другой способ связан с транспортными метриками и задачей Монжа-Канторовича. Идея состоит здесь в том, чтобы расстояние между окрестностями двух близких точек вычислять как оптимальный перенос массы из окрестности одной вершины в смежную по ребру окрестность. В этом случае кривизна определяется отношением минимальной работы к геодезическому расстоянию между точками. Массой, в простом варианте, является степень вершины. Физическая интерпретация кривизны связана с тем интересным фактом,

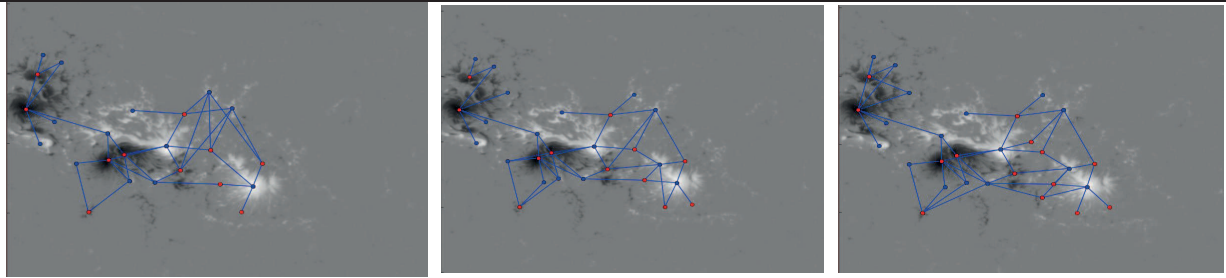


Рис. 1: Критические сети постоянные для трех последовательных во времени магнитограмм АО.

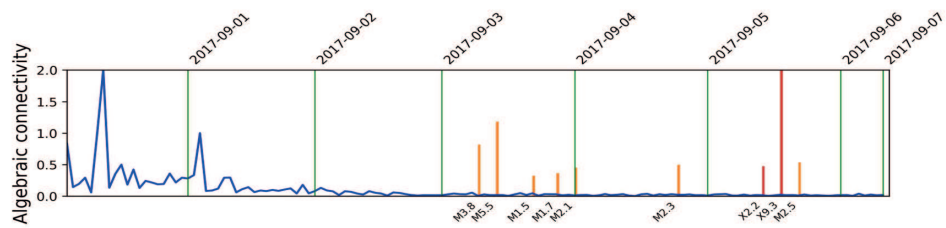


Рис. 2: Изменение  $\lambda_2$  во времени для критических сетей АО. Вспышки показаны красными барами.

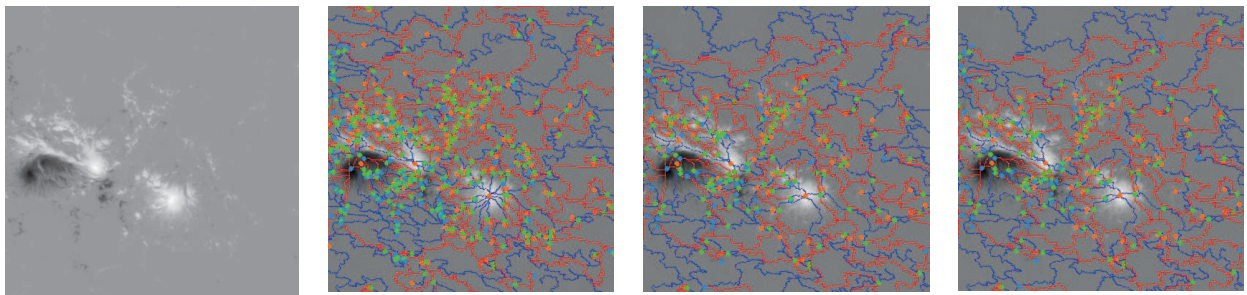


Рис. 3: Магнитограмма АО и ее МС комплексы с последовательным топологическим редактированием. Зеленые точки - седла, красные-максимумы, синие-минимумы.

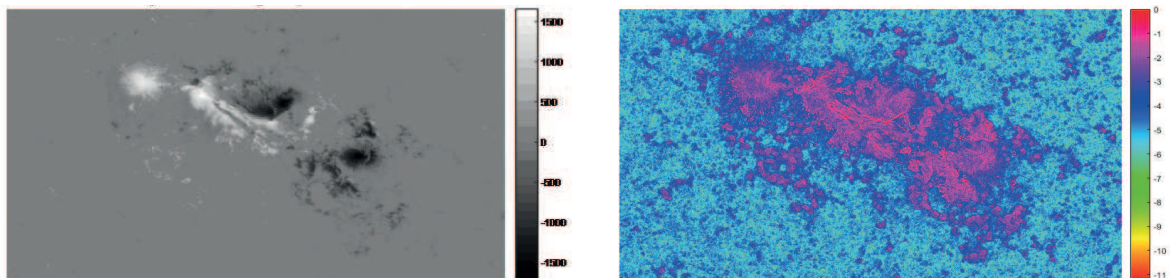


Рис. 4: Магнитограмма АО и модуль комплексного логарифма кривизны Формана-Риччи, вычисленной по цифровому изображению.

что кривизна и больцмановская энтропия распределенной системы положительно коррелируют [10].

В Лекции будут приведены примеры использования упомянутой техники для анализа

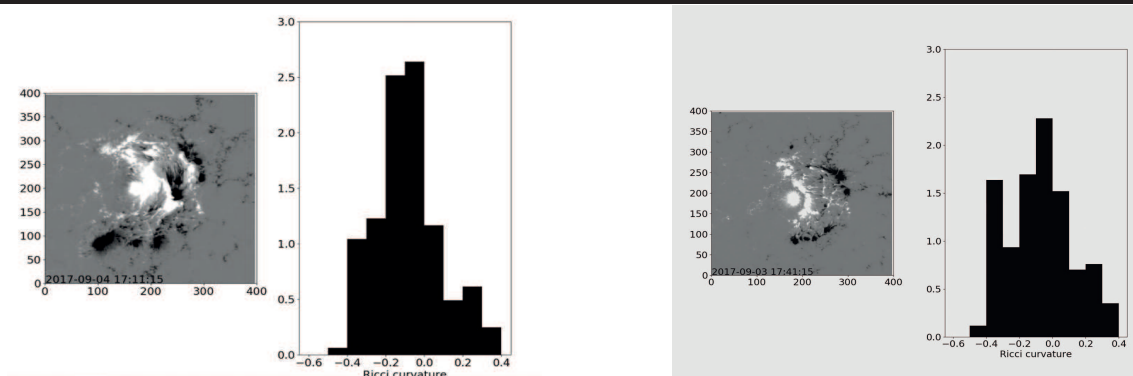


Рис. 5: Изменение гистограммы кривизны Оливье-Риччи для двух моментов эволюции АО. Кривизна вычислялась по графу МС комплекса.

предвспышечной динамики фотосферных магнитных полей Солнца, гистологии тканей и данных дистанционного зондирования Земли.

1. Айзерман М. А. и др. Автомат. и телемех., 1977, в.7, 135
2. Rana S. (ed.) Topological data structures for surfaces: an introduction to geographical information science. 2005.
3. Clerk Maxwell J. *Phil. Mag. Series 4*(40) No 269 (1870) 421.
4. Gu S., et al. Computer Vision-ECCV 2010. Springer, 2010.
5. Chung F. R. K. Spectral graph theory. 1997.
6. Кас М., *Amer. Math. Mon.* 1 (1966) 73.
7. К. Р. Knudson, Morse theory: smooth and discrete. 2015.
8. Edelsbrunner H., Harer J. Computational topology: an introduction. 2010.
9. Samal A. et al. *Sci. reports* 8 (2018) 1-17.
10. Maas J. in Modern approaches to discrete curvature. Springer, 2017, 159.

## Экономическая физика сегодня: Проблемы и перспективы

Семенов М.Б.<sup>1</sup>, Роцин С.Ю.<sup>2</sup>, Кревчик В.Д.<sup>1</sup>, Кусмарцев Ф.В.<sup>3</sup>,  
Шорохов А.В.<sup>4</sup>

1. ПензГУ, Пенза
2. НИУ “ВШЭ”, Москва
3. Loughborough University, United Kingdom
4. НИУ МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск

Рассмотрена роль междисциплинарного направления “экономическая физика” в развитии системного сотрудничества различных наук, в том числе экономики, истории, филологии [1-5]. Накоплен определенный опыт использования упомянутых в работе “универсальных природных закономерностей и механизмов” в качестве методических приемов в преподавании школьных курсов по выбору типа “современная физика для будущих экономистов и управленцев” или университетского курса “Современные проблемы физики конденсированного состояния” для бакалавров и магистров направлений 03.03.02 и

03.04.02 “физика”, а также преподавании курса “Математика, физика” для студентов - медиков. С 2008 года на базе лаборатории исследований рынков труда НИУ “Высшая школа экономики” совместно с представителями компании “Super Job” проводятся совместные исследования по теме “Перколяционные модели на рынках труда”, показавшие продуктивность системного подхода с использованием инструментария “эконофизики”. Ряд полученных результатов были одобрены при обсуждении в рамках ежегодных конференций по эконофизике в Бухаресте при организационном участии представителей физического факультета Университета Лафборо (Великобритания).

1. Mantegna R.N. Introduction to Econophysics: Correlation and Complexity in Finance / R.N. Mantegna, H.E. Stanley. Cambridge University Press, 2000. Ч 147 pp.
2. Романовский М.Ю. Введение в эконофизику: статистические и динамические модели / М.Ю. Романовский, Ю.М. Романовский. ЧМ.-Ижевск: институт компьютерных исследований, 2012. Ч 340 с.: ил.
3. Эконофизика. Современная физика в поисках экономической теории/ под ред. В.В. Харитонов и А.Л. Ежова. ЧМ: МИФИ, 2007. Ч 624 с.
4. Леггет Э.Дж. Управляемое диссипативное туннелирование. Туннельный транспорт в низкоразмерных системах / Э.Дж. Леггет, М.Б. Семенов, В.Д. Кривчик и др. ЧМ. Ц Физматлит, 2011. Ч 600 с.: ил.
5. Семенов М.Б. Экономическая физика сегодня: кзаъ и кпротивъ/ материалы семинара ЛИРТ ВШЭ 11.03.2008 (lirt.hse.ru) с комментарием кНа стыке двух дисциплин: способны ли физики объяснять экономические явления?ъ Семенов М.Б. Перколяционные модели на рынках труда / М.Б. Семенов, С.Ю. Рощин, В.Д. Кривчик и др. материалы семинаров ЛИРТ ВШЭ 03.11.2009, 30.03.2010, 02.11.2010, 29.03.2011, 27.03.2012 (lirt.hse.ru).

## Релаксационные колебания в моделях генных сетей

Глызин С.Д., Колесов А.Ю.

ЯрГУ, Ярославль

Искусственные генетические осцилляторы, объединенные в сети различной архитектуры, вызывают значительный интерес в связи с тем, что они могут моделировать ряд ключевых биологических процессов, среди которых клеточные циклы и циркадные ритмы. В работе [1] предложен простейший генетический осциллятор, названный репрессилатором, который состоит из трех элементов  $A_j$ ,  $j = 1, 2, 3$ . Каждый из этих элементов односторонне ингибирует соседний. А именно, элемент  $A_1$  подавляет синтез  $A_2$ , элемент  $A_2$  подавляет синтез  $A_3$ , а третий элемент  $A_3$ , замыкая цикл, подавляет синтез  $A_1$ . В работах [2, 3] был предложен новый подход к моделированию искусственных генных сетей. А именно, было замечено, что описанный выше характер взаимодействия концентраций  $u_j$  и  $p_j$  напоминает взаимодействие шести экологических популяций — трех хищников и трех жертв.

$$\dot{p}_j = \frac{r_1}{1+a} [1 + a(1 - u_{j-1}) - p_j]p_j + \alpha, \quad \dot{u}_j = r_2[p_j - u_j]u_j, \quad (1)$$



где  $j = 1, 2, 3$ ,  $u_0 = u_3$ , все постоянные  $r_1, r_2, a, \alpha$  положительны. Действительно, предположим, что  $u_j$ , и  $p_j, j = 1, 2, 3$  — это плотности численности популяций хищников и жертв соответственно. Тогда в силу (1) каждый хищник  $u_j$  питается только одной жертвой  $p_j$  (при  $p_j \equiv 0$  численность  $u_j$  затухает по экспоненциальному закону) и в то же время оказывает давление только на жертву  $p_{j+1}$ . Последнее выражается в том, что при увеличении  $u_j$  уменьшается скорость роста численности  $p_{j+1}$ . Кроме того, при отсутствии хищника-репрессора ( $u_{j-1} \equiv 0$ ) численность  $p_j$  стремится при  $t \rightarrow +\infty$  к пороговому значению  $p_j = \alpha + \alpha_0$ .

В предположении, что  $r_2 \gg 1, r_1 = r \sim 1$  математическая модель репрессилатора (1) допускает согласно принципу сведения некоторое упрощение. При  $r_2 \rightarrow +\infty$  имеем  $p_j = u_j, j = 1, 2, 3$ . В силу инвариантности системы (1) по отношению к циклическим перестановкам координат естественным образом возникают вопросы о существовании и устойчивости у нее цикла вида  $(u_1, u_2, u_3) = (u(t), u(t+h), u(t+2h)), p_j = u_j$ , где  $h > 0$  — фазовый сдвиг, с периодом  $T = 3h$ .

При  $a \rightarrow \infty$  и  $\alpha \ll 1$  эта задача изучалась в [2], в случае  $a = \text{const} > 1, \alpha = r \exp(-br), r \gg 1, b = \text{const} > 0$  — в статье [3]. В настоящей работе эти вопросы изучаются при дополнительных предположениях

$$r \gg 1, \alpha = r \exp(-br), 1 + a = \exp(cr), b, c = \text{const} > 0.$$

Основное внимание уделяется наиболее интересному с математической точки зрения случаю  $c < b$ , когда форма колебаний является максимально сложной. Для нахождения асимптотики релаксационного периодического решения системы (1) строится специальная релейная система. Доказано, что устойчивый цикл этой релейной системы асимптотически близок к орбитально асимптотически устойчивому релаксационному циклу системы (1).

1. Elowitz M. B., Leibler S. *Nature* **403** (2000) 335–338.
2. Глызин С. Д., Колесов А. Ю., Розов Н. Х. *ТМФ* **194:3** (2018) 547–568.
3. Глызин С. Д., Колесов А. Ю., Розов Н. Х. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* **58:5** (2018) 682–704.

## Сложные пространственно неоднородные режимы одного класса распределенных биофизических моделей

Горюнов В.Е.

ЯрГУ, Ярославль

Рассматривается задача поиска устойчивых сосуществующих режимов логистического уравнения с запаздыванием и диффузией в плоской области:

$$\dot{N} = D\Delta N + r \left[ 1 - \frac{1}{K} N_{t-1} \right] N, \quad \frac{\partial N}{\partial \nu} \Big|_{\partial\Omega} = 0, \quad (1)$$

где  $N \equiv N(t, x)$  — плотность популяции в момент времени  $t$  в точке  $x$  выпуклой плоской области  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  с гладкой границей  $\partial\Omega$ ,  $\Delta$  — оператор Лапласа,  $D$  — коэффициент диффузии,  $r$  — мальтузианский коэффициент линейного роста,  $N_{t-1} \equiv N(t-1, x)$ ,  $K$  — средняя численность популяции,  $\nu$  — направление внешней нормали к границе  $\partial\Omega$ . Предполагается, что  $K = 1$  и  $\text{mes } \Omega = 1$ .

При  $r = \pi/2 + \varepsilon$  и  $D = \varepsilon d$ , где  $\varepsilon$  — положительный малый параметр, удается найти критическое значение диффузии  $d_*$  [1], при котором пространственно однородный режим теряет устойчивость и от него ответвляются пространственно неоднородные режимы, имеющие вид ведущих центров [2]. При значениях параметра роста популяции, не близких к критическим, проведен обширный численный эксперимент с целью поиска сосуществующих аттракторов задачи. На его основе сделан вывод о существовании у краевой задачи (1) решений двух типов, первый из которых имеет простое пространственное распределение и наследует свойства однородного решения, а второй, названный режимом самоорганизации [3], более сложно распределен по пространству и имеет существенно более предпочтительные с точки зрения популяционной динамики свойства. Проведены исследования эволюции некоторых полученных аттракторов при изменении параметра диффузии, в том числе рассмотрен переход режимов вихревой структуры в режимы спиральных волн. При малом значении диффузии изучены некоторые режимы со сложной структурой, в том числе тройные спиральные волны. Рассмотрен процесс генерации сложного режима, основанного на множестве согласованных спиральных волн. Выделены интервалы сосуществования описанных аттракторов и возникновения мультистабильности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект No 18-29-10055).

1. Glyzin S., Goryunov V., Kolesov A. *Lobachevskii J. Math.* **38:5** (2017) P. 898–905.
2. Кащенко С.А., Фролов В.Е. *Модел. и анализ инф. систем* **21:1** (2014) С. 94–114.
3. Колесов Ю.С., Майоров В.В. *Динамика биологических популяций. Межвуз. сб.* Горький: изд. ГГУ (1986) С. 3–13.

## Бифуркационные особенности одной краевой задачи с нелинейным отклонением в краевом условии

Ивановский Л.И.

ЯрГУ, Ярославль

Рассматриваются динамические свойства краевой задачи

$$\dot{u} = u'' + \gamma u, \quad (1)$$

с нелинейным отклонением в одном из краевых условий

$$u'(0, t) = 0, \quad u'(1, t) = \alpha u(0, t) + \beta u^3(0, t), \quad (2)$$

возникающие в проблематике популяционной динамики [1]. Функция  $u(x, t)$  — гладкая при  $t \geq 0$  и  $x \in [0, 1]$ , параметры  $\alpha, \beta, \gamma$  — действительные числа.

В краевой задаче (1), (2) реализуется два способа потери устойчивости нулевого состояния равновесия — дивергентный, когда в спектре устойчивости появляется нулевое значение, и колебательный, соответствующий случаю перехода пары собственных значений из левой комплексной полуплоскости в правую. Задача состояла в изучении свойств потери устойчивости нулевого решения краевой задачи (1), (2), т.е. в поиске критических значений параметров  $\alpha, \beta, \gamma$  и построении асимптотических формул для режимов, от него ответвляющихся.

Были выявлены критические зависимости параметров  $\alpha$  и  $\gamma$ , при которых происходят различные бифуркации нулевого состояния равновесия. При значениях параметра  $\alpha$ , близких к критическим, построена нормальная форма и на ее основе были определены условия появления неоднородных состояний равновесия в одном случае и циклов в другом.

1. Gourley S.A., So J.W.-H., Wu J.H. *Journal of Mathematical Sciences* **124:4** (2004)

## Цепочка локально связанных консервативных осцилляторов с инволюцией Топажа – Пиковского

Круглов В.П., Кузнецов С.П.

СФ ИРЭ РАН, Саратов; УдГУ, Ижевск

Пиковский и Топаж рассмотрели простую цепочку фазовых ротаторов [1]:

$$\dot{\phi}_j = \omega_j + \varepsilon \sin(\phi_{j+1} - \phi_j) + \varepsilon \sin(\phi_{j-1} - \phi_j), \quad (1)$$

где  $\phi_j$  – фазы ротаторов ( $j = 1, \dots, N$ ), частоты которых распределены линейно вдоль цепочки ( $\omega_{j+1} - \omega_j = 1$ ). Связь между соседними ротаторами описывается слагаемыми  $\varepsilon \sin \psi$  и зависит только от разности фаз  $\psi_j = \phi_{j+1} - \phi_j$ ,  $\varepsilon$  – параметр связи. На цепочку наложены свободные граничные условия  $\phi_0 = \phi_1$  и  $\phi_{N+1} = \phi_N$ . Систему (1) легко преобразовать к системе  $N - 1$  уравнений для разностей фаз  $\psi_j$  [1].

Цепочка (1) обладает свойством обратимости динамики [1]. Динамическая система называется обратимой [2], если ее фазовое пространство инвариантно относительно преобразования, состоящего в обращении времени  $t \rightarrow -t$  и инволюции  $\mathbf{R}$ . Инволюцией называют такое преобразование, что  $\mathbf{R} \circ \mathbf{R} = id$ . Оператор инволюции модели Топажа – Пиковского  $\mathbf{R} : \psi_j \rightarrow \pi - \psi_{N-j}$ . При различных значениях  $\varepsilon$  наблюдаются как почти консервативные режимы, так и режимы с симметричными аттракторами и репеллерами, в том числе и хаотические [1]. Цепочка Топажа – Пиковского, состоящая из четырех ротаторов, подробно исследована в работе [3].

Мы рассматриваем гамильтонову модель связанных осцилляторов, описывающую конденсат Бозе – Эйнштейна в периодическом ускоренном потенциале [4, 5]:

$$\begin{aligned} \dot{I}_j &= -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \phi_j} = -2\varepsilon \sqrt{I_{j+1} I_j} (I_{j+1} - I_j) \cos(\phi_{j+1} - \phi_j) - \\ &\quad - 2\varepsilon \sqrt{I_{j-1} I_j} (I_{j-1} - I_j) \cos(\phi_{j-1} - \phi_j), \\ \dot{\phi}_j &= \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial I_j} = \omega_j + \beta I_j + \varepsilon \left\{ 3\sqrt{I_{j+1} I_j} - I_{j+1} \sqrt{\frac{I_{j+1}}{I_j}} \right\} \sin(\phi_{j+1} - \phi_j) + \\ &\quad + \varepsilon \left\{ 3\sqrt{I_{j-1} I_j} - I_{j-1} \sqrt{\frac{I_{j-1}}{I_j}} \right\} \sin(\phi_{j-1} - \phi_j). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $I$  – населенности потенциальных ям. Частоты распределены линейно. В случае, если все  $I$  равны друг другу, система (2) сводится точно к системе фазовых ротаторов (1)

Топажа – Пиковского с инволюцией и асимптотической динамикой на инвариантном многообразии. Гамильтонова система (2) вне инвариантного многообразия  $I_j = \text{const}$  обладает инволюцией  $\mathbf{R} : I_j \mapsto I_{N-j+1}, \psi_j \mapsto \pi - \psi_{N-j}$ .

*Работа выполнена при поддержке РФФ, грант No 15-12-20035.*

1. Toraj D., Pikovsky A. *Physica D* **170** (2002) 118–130.
2. Roberts J.A.G., Quispel G.R.W. *Physics Reports* **216** (1992) 63–177.
3. Gonchenko A.S., Gonchenko, S.V., Kazakov, A.O., Turaev D.V. *Physica D* **350** (2017) 45–57.
4. Thommen Q., Garreau J.C., Zehnlé V. *Physical review letters* **91** (2003) 210405.
5. Witthaut D., Timme M. *Physical Review E*. **90** (2014) 032917.

## Экспериментальная установка для исследования больших ансамблей электронных генераторов с большим количеством связей

Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Сысоев И.В., Прохоров М.Д

*СФирЭ РАН, Саратов*

Тематика работы относится к весьма актуальному и важному направлению теории нелинейных колебаний и волн - исследованию сложной динамики ансамблей связанных осцилляторов [1-5]. В большинстве случаев для исследования больших сетей осцилляторов применяются теоретические и численные методы, а экспериментальным исследованиям уделяется значительно меньше внимания. Это объясняется сложностью постановки натурального эксперимента, которая быстро растет с увеличением размера сети и количества связей между ее элементами.

В данной работе нами разработана и создана оригинальная аналого-цифровая лабораторная установка для экспериментального исследования больших ансамблей генераторов со сложными связями, в основе которой лежит программный способ формирования сигналов, отвечающих за связь между генераторами. Предложенная установка позволяет задать произвольную архитектуру связей и реализовать практически любой вид связей между генераторами в радиофизическом эксперименте. Установка работает в режиме реального времени и позволяет при необходимости подстраивать в ходе эксперимента силу связей для управления коллективной динамикой генераторов.

Работоспособность установки продемонстрирована на примере ансамбля генераторов с запаздывающей обратной связью. С ее помощью проведена реконструкция сложной архитектуры связей, коэффициентов связей и собственных нелинейных функций генераторов с запаздыванием по их экспериментальным временным рядам.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ, проект МК-1199.2019.8 (дизайн экспериментальной установки) и РФФИ, проект No 19-02-00071 (исследование и реконструкция сети генераторов с запаздыванием).

1. Afraimovich V.S., Nekorkin V.I., Osipov G.V., Shalfeev V.D. *Stability, Structures, and Chaos in Nonlinear Synchronization Networks*. Singapore: World Scientific, 1995. 260
2. Boccaletti S., Latora V., Moreno Y., Chavez M., Hwang D.-U. *Phys. Rep.* **424** (2006) 175-308

3. Osipov G.V., Kurths J., Zhou C. *Synchronization in Oscillatory Networks*. Berlin: Springer, 2007. 370
4. Масленников О.В., Некоркин В.И. *УФН* **187** (2017) 745-756
5. Kundu P., Sharma L., Nandan M., Ghosh D., Hens C., Pal P. *Chaos* **29** (2019) 013112

## Особенности нейронной синхронизации в нейрон-астроцитарных сетях

Панкратова Е.В., Калякулина А.И., Стасенко С.В., Гордлеева С.Ю., Лазаревич И.А., Казанцев В.Б.,

ННГУ, Нижний Новгород

Нервная система живых организмов представляет собой совокупность огромного количества клеток, часть из которых способна демонстрировать электрическую активность в ответ на внешнее раздражение. Благодаря такой специфической реакции этих клеток, называемых нейронами, долгое время считалось, что только они и отвечают за передачу информации между клетками головного мозга и других отделов нервной системы. Так называемые глиальные клетки рассматривались как вспомогательные, обеспечивающие структурную и метаболическую поддержку нейронов. Однако последние экспериментальные данные показывают, что на самом деле глиальные клетки оказывают значительное влияние на активность нервных клеток. В частности, астроциты - один из типов глиальных клеток - могут выделять активные вещества (глиатрансмиттеры), которые с помощью различных пре- или постсинаптических механизмов способны регулировать возбудимость нейронов. В настоящее время ведутся активные исследования, связанные с изучением особенностей влияния глиатрансмиттеров на процессы передачи информации в нейронных сетях, разработан целый ряд математических моделей для описания процессов, происходящих в так называемых трехчастных синапсах, включающих не только компоненты пре- и постсинаптического нейронов, но и отростки астроцита, окружающего место их контакта. В частности, экспериментальные данные показывают, что астроциты оказывают существенное влияние на процессы синхронизации нервных клеток [1].

В рамках данного исследования для изучения коллективной динамики простейшей нейронной сети, элементы которой связаны посредством трехчастных синапсов, была обобщена недавно предложенная в работе [2] математическая модель двунаправленной астроцитарной регуляции нейронной активности. Ввиду отсутствия в рассматриваемой модели многообразия, соответствующего режиму полной синхронизации элементов, для определения степени согласованности генерации импульсов постсинаптических клеток было введено понятие коэффициента синхронизации, как меры, отражающей нормированное отношение числа импульсов, попадающих в одно и то же временное окно, к общему числу импульсов на выходе постсинаптических клеток. Анализ предложенной характеристики позволил обнаружить значительное влияние глиатрансмиттеров, в частности, глутамата и D-серина на процессы синхронизации нейронов [3].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 14.Y26.31.0022, разработка модели) и РФФИ (проект 17-02-01103а, анализ модели).

1. Sasaki T., Ishikawa T., Abe R., Nakayama R., Asada A., Matsuki N., Ikegaya Y. *The Journal of Physiology* **592**(13) (2014) 2771.

2. Gordleeva S.Yu., Stasenko S.V., Semyanov A.V., Dityatev A.E., Kazantsev V.B. *Frontiers in Computational Neuroscience* **6**(92) (2012) e41646.
3. Pankratova E.V, Kalyakulina A.I., Stasenko S.V., Gordleeva S.Yu., Lazarevich I.A., Kazantsev V.B. *Nonlinear Dynamics* **97**(1) (2019) 647.

## Краткосрочные и долгосрочные характеристики направленных связей

Смирнов Д.А.

СФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

В последние два десятилетия в области анализа временных рядов сохраняется и даже растет интерес исследователей к задаче о выявлении и количественной оценке направленных (причинно-следственных) связей между сложными колебательными системами по временным рядам. Наиболее широко используется идея “причинности по Винеру – Грейнджеру”, которая для характеристики связи в направлении  $Y \rightarrow X$  состоит в расчете некоторой разновидности частной корреляции между будущим процесса  $X$  и прошлым процесса  $Y$  при заданном прошлом  $X$ . Идея была реализована сначала как оценка улучшения прогноза линейной авторегрессионной модели, а затем получила развитие в нелинейных вариантах, теоретико-информационном формализме, частотно-разрешенных характеристиках и т.д. Она нашла приложения в различных областях от экономики и климатологии до физики и медицины. Однако до сих пор остаются существенные трудности при интерпретации упомянутых количественных характеристик как мер некоторой “силы связи”.

В докладе развивается предложенная ранее [1] классификация характеристик направленной связи для стохастических дифференциальных и разностных систем. Согласно этому подходу для недвусмысленной интерпретации характеристика направленной связи  $Y \rightarrow X$  должна отражать отклик поведения (распределения вектора состояния в ближайшем будущем или в среднем за большое время) системы  $X$  на изменение некоторой величины (параметра или начального состояния) системы  $Y$ . В соответствии с этим в [1] были выделены четыре класса характеристик. Любая существующая характеристика направленной связи тогда интерпретируется как член одного из этих классов или его приближенная оценка. Наиболее интересными классами представляются отклик ближайших будущих значений вектора состояния  $X$  на изменения начального состояния  $Y$  (краткосрочные эффекты связи  $Y \rightarrow X$ ) и отклик стационарного распределения вектора состояния  $X$  на изменения собственных параметров  $Y$  или параметра связи  $Y \rightarrow X$  (долгосрочные эффекты связи  $Y \rightarrow X$ ).

В работе выведены количественные соотношения между характеристиками из указанных двух классов для линейных стохастических осцилляторов с двунаправленной связью. Обосновано, что причинность по Винеру – Грейнджеру является приближенной оценкой краткосрочного эффекта связи, найдены ее соотношения с изменением дисперсии переменной состояния ведомой системы при включении/выключении связи. Введены спектральные эффекты направленной связи и с их помощью дана количественная интерпретация известных спектральных характеристик причинности по Винеру – Грейнджеру. Полученные соотношения использованы для оценки связей между климатическими процессами в

океанах тропического пояса Земли. Результаты работы далее конкретизируют тот тезис [1], что единственной универсальной характеристики силы связи не существует, а адекватным описанием является набор характеристик, отражающих те или иные проявления связи в динамике.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант 19-12-00201).

1. Smirnov D.A. *Phys. Rev. E* **90** (2014) 062921.

## Реконструкция модельных нейроосцилляторов при наличии неизвестных собственных нелинейных функций и функций связи

Сысоев И.В., Сысоева М.В., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.

*СФИРЭ РАН, СГУ*

Восстановление структуры связей в сетях большого числа осцилляторов по временным рядам их динамики актуально в приложении к задачам нейрофизиологии, биофизики, радиофизики, климатологии, эконометрики. Традиционными подходами к решению данной проблемы являются нелинейная условная грейнджеровская причинность [1] и частная направленная когерентность [2]. В случае, когда имеются достаточные априорные данные о структуре уравнений, которыми могут описываться отдельные элементы сети, можно существенно повысить надежность выводов о связанности и получить дополнительные сведения о природе отдельных узлов сети, если воспользоваться специализированными методиками [3].

В работе развивается подход, предложенный в [4], позволяющий по временным рядам всех элементов ансамбля восстановить как архитектуру связей, нелинейные функции связей так и индивидуальные нелинейные функции отдельных узлов. В дополнение к [4], где рассматриваются только сигмоидные нелинейные функции, в настоящей работе предлагается аппроксимировать функции связи различными известными функциями, последовательно уточняя тип используемой аппроксимации аналогично известному методу лассо [5]. При достаточной длине ряда предлагаемый подход позволяет восстановить функции связи из достаточно широкого класса известных функций: полиномиальные, экспоненциальные, сигмоидные и иные, при этом сходимость метода несущественно отличается от сходимости алгоритмов, при которых тип связи считается известным. Основное данного подхода ограничение сравнительно с ранее рассмотренными заключается в существенно большем времени вычислений. В рассмотренном случае эта проблема решалась с использованием оптимизации и параллелизации алгоритмов, что эффективно реализуемо, поскольку перебор различных типов аппроксимирующих функций и реконструкция уравнений для различных осцилляторов в ансамбле могут быть проведены независимо.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 19-12-00201.

1. Chen Y., Rangarajan G., Feng J., Ding M. *Phys. Lett. A* **324**, **1** (2004) 26–35.
2. Vaccala L., Sameshima K. *Biol. Cybern.* **84** (2001) 463–474.
3. Сысоев И. В., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. *Известия вузов. ПНД* **27**, **4** (2019) 13–51.
4. Sysoev I. V., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. *Nonlinear Dyn.* **95** (2019) 2103–2116.

---

5. Tibshirani R. *Journal of the Royal Statistical Society B* **58**, 1 (1996) 267–288.

## О качественном исследовании системы синхронизации с комбинированным управлением

Антоновская О.Г.

*ННГАСУ, Нижний Новгород*

Известно, что использование степени заполнения счетчика числа колебаний подстраиваемого генератора (ПГ) в качестве фазовой координаты позволяет не только обоснованно реализовать процедуру получения математической модели по методу точечных отображений, но и расширить возможности качественного анализа динамики синтезаторов частот (СЧ) с кусочно-постоянной формой сигнала управления [1].

В работе [2] на примере базового СЧ с комбинированным импульсным частотно-фазовым детектором (КИЧФД) [3], объединяющим в себе свойства частотного детектора и детектора типа “выборка-запоминание”, показывается, что использование метода точечных отображений в соответствующих подпространствах состояний позволяет не только проанализировать механизм взаимодействия фазового и частотного управления, но и осуществить полное качественное исследование его динамики.

Для СЧ с КИЧФД пространство состояний состоит из трех основных подпространств и двух подпространств переходных движений, в каждом из которых поведение фазовых траекторий определяется уравнениями с постоянной структурой. Полное представление о свойствах математической модели получается при изучении поведения изображающих точек движения в каждом из подпространств и характера перехода фазовых траекторий из одного подпространства в другое [2].

В настоящем докладе приводятся условия существования и устойчивости основного рабочего режима СЧ. Обсуждается глобальная устойчивость синхронного режима в синтезаторах указанного типа. Исследование поведения траекторий точечных отображений в каждом из подпространств на основе диаграмм Ламерея-Кенигса [4], а также процесса склейки фазовых траекторий, позволяет установить, что синхронный режим в системе соответствует неподвижной точке отображения, определяющего динамику СЧ в режиме фазового управления.

1. Антоновская О.Г. *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов* **3** (2017) С. 12-14.
2. Антоновская О.Г., Горюнов В.И. *Изв. ИМИ УдГУ* **2(46)** (2015) С. 6-12.
3. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. М.: Радио и связь, 1989.
4. Капранов М.В, Томашевский А.И. Регулярная и хаотическая динамика нелинейных систем с дискретным временем. М.: Изд.дом МЭИ, 2009.



## Исследование синхронизации многоконтурных генераторов: схемотехническое моделирование

Астахов О.В., Селезнев Е.П., Станкевич Н.В.

*СарГУ, Саратов, СФ ИРЭ РАН, Саратов, СарГТУ, Саратов*

Одним из направлений практического применения радиофизических генераторов сложных сигналов, включая хаотические и квазипериодические колебания, является их использование в системах конфиденциальной передачи информации [1-3]. Перспективность данного направления обосновывается принципиальным отличием метода шифрования от цифрового кодирования, широко распространенного в современных телекоммуникационных системах. Для данного метода шифрования не подходят известные методы декодирования информации, которые базируются на теории криптографической защиты. Наибольшую сложность при создании таких систем составляет обеспечение их надежности, устойчивости к шумам и конфиденциальности. Для повышения степени конфиденциальности предлагается использовать наиболее сложные хаотические сигналы, возникающие на базе разрушения высокочастотных квазипериодических режимов, которые могут демонстрировать многоконтурные генераторы [4].

Передача данных в такого рода системах осуществляется по средством хаотической синхронизации передающего и приемного устройств. Таким образом, в данном контексте представляются важными вопросы исследования синхронизации связанных многоконтурных генераторов в зависимости от параметров одиночной подсистемы, особенностей организации связи между подсистемами. В рамках данной работы проведено схемотехническое моделирование динамики двух связанных многоконтурных генераторов. Были реализованы две различные топологии связи: через общую схему управления возбуждением колебаний в каждой подсистеме и через каждый контур генератора. Проведено исследование характерных динамических режимов систем. Проанализированы фазовые портреты, спектры Фурье в среде MultiSim.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых МК-31.2019.8.

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *УФН* **179** (2009) 1281-1310
3. Пономаренко В.И., Караваев А.С., Глуховская Е.Е., Прохоров М.Д. *Письма в ЖТФ* **38** (2012) 103-110
4. Станкевич Н. В., Астахов О. В., Кузнецов А. П., Селезнев Е.П. *Письма в ЖТФ* **44** (2018) 46-54

## Устройство фазового пространства слабодиссипативного осциллятора Ван дер Поля под внешним импульсным воздействием специального вида

Голоколенов А.В., Савин Д.В.

*СарГУ, Саратов*

Известно, что в консервативных системах, так же, как и в диссипативных, возможен переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода, которая сходится к гамильтоновой критической точке [1]. Такого рода критическое поведение может также встречаться и в диссипативных системах, в частности, в модели на базе осциллятора Ван дер Поля под внешним импульсным воздействием

$$\ddot{x} - (\gamma - \mu x^2)\dot{x} + \omega_0 x = \sum_{m=-\infty}^{\infty} F(x)\delta(t - nT) \quad (1)$$

при этом функция  $F(x)$  выбирается квадратичной [2, 3]. С другой стороны, аналогичная (1) система при выборе вида функции  $F(x) = \lambda \cos x$  рассматривалась ранее [4] как возмущение предложенной Заславским [5] системы, вырожденной в смысле КАМ-теоремы и демонстрирующей наличие в фазовом пространстве стохастической паутины, при введении в неч малой диссипации автоколебательного типа. Таким образом, можно заметить, что одна и та же модель - осциллятор Ван дер Поля под периодическим импульсным воздействием переменной амплитуды - способна демонстрировать феномены, относящиеся к различным направлениям исследований. В связи с этим кажется интересным рассмотреть динамику моделей, занимающих “промежуточное” положение между двумя этими случаями. Для этой цели рассмотрим “иерархию” моделей с функциями амплитуды импульсного воздействия в виде полиномов чётных степеней, представляющих собой разложение косинуса в ряд Тейлора в окрестности нуля (в рамках настоящей работы - до 2 и 4 степени), и проследим за эволюцией устройства фазового пространства таких систем при изменении порядка разложения. При больших значениях  $\mu$  различий в фазовых портретах для всех трех функций практически нет, однако с уменьшением параметра количество пар седло-узел на фазовой плоскости становится различным для разных функций  $F(x)$ . Так, для случая с квадратичной функцией происходит одна седло-узловая бифуркация, для функции четвертой степени - шесть, для гармонической функции количество бифуркаций растёт, видимо, неограниченно. Также нами была рассмотрена динамика приближенного дискретного отображения [3]. Его фазовое пространство при изменении вида функции  $F(x)$  претерпевает аналогичные трансформации.

1. Райхл Л.Е. Переход к хаосу в консервативных классических и квантовых системах. М., Ижевск: РХД, 2008. 756 с.
2. Kuznetsov S.P., Kuznetsov A.P., Sataev I.R. *J. Stat. Phys.* **121** (2005) 697.
3. Savin D.V., Savin A.V., Kuznetsov A.P. et. al. *Dynam. Syst.* **27**, **1** (2012) 117.
4. Felk E.V., Kuznetsov A.P., Savin A.V. *Phys. A.* **410** (2014) 561.
5. Заславский Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах. М., Ижевск: ИКИ, 2004.

## Управляемая локальными деформациями спин-волновая связь в латеральных магнонных кристаллах

Грачев А.А.<sup>1</sup>, Садовников А.В.<sup>1</sup>, Бегинин Е.Н.<sup>1</sup>, Сердобинцев А.А.<sup>1</sup>, Шешукова С.Е.<sup>1</sup>, Никитов С.А.<sup>1,2</sup>

1. СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

2. Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, Москва

Одним из перспективных подходов для решения указанных проблем является подход, основанный на использовании элементарных квантов магнитных возбуждений (магнонов) и спиновых волн в качестве носителей информационных сигналов[1]. На основе массивов микроструктур из ЖИГ оказывается возможным создание магнонных сетей (МС) для создания устройств обработки сигналов[2,3].

В данной работе исследована динамика спиновых волн в латеральной композитной структуре, образованная параллельно ориентированными магнонными кристаллами, нагруженными пьезоэлектрическим слоем. Для описания физических процессов, определяющих физические характеристики при управлении спин-волновыми сигналами путем создания локальных упругих деформаций была разработана численная модель на основе метода конечных элементов.

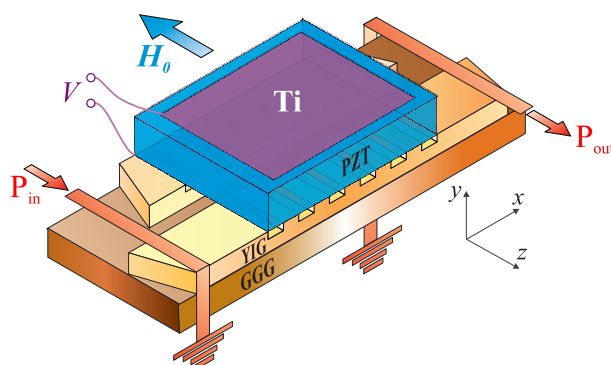


Рис. 1: Схема исследуемой структуры

Показана эффективная перестройка спин-волновых характеристик с помощью электрического поля, обусловленным деформацией пьезослоя и эффектом магнитострикции в магнонных кристаллах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (18-79-00198), РФФИ (18-37-20005, 19-37-90145), стипендии и гранта Президента РФ (МК-3650.2018.9, СП-2819.2018.5).

1. Nikitov S. A., Kalyabin D. V., Lisenkov I. V., Slavin A. N., Barabanenkov Yu. N., Osokin S. A., Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Morozova M. A., Sharaevsky Yu. P., Filimonov Yu. A., Khivintsev Yu. V., Vysotsky S. L., Sakharov V. K., Pavlov E. S. *Phys. Usp.*, **58**, 1002Ц1028, (2015).
2. Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. *Phys. Rev. Applied*, **7**, 014013, (2017).

3. Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Serdobintsev A. A., Mitin D. M., Nikitov S. A. *Physical Review Letters*, **120**, 257203, (2018)

## Определение времени запаздывания для моделирования спайк-волновых разрядов по экспериментальным данным

Грищенко А.А., Медведева Т.М., van Rijn С.М., Сысоева М.В., Сысоев И.В.

СФИРЭ РАН, Саратов

Абсансная эпилепсия представляет собою широко распространенную среди детей и подростков [1] форму эпилепсии не ясной до конца этиологии, основные проявления которой заключаются в частичной или полной потере сознания на краткое время [2] Продолжительность приступа составляет, как правило, порядка 5-10 с.

В данной работе анализировались 130-минутные записи внутричерепных ЭЭГ (сигналы локальных потенциалов) от 5 самцов крыс линии WAG/Rij, по 28 разрядов у каждого животного. Все разряды были спонтанными. Длина отобранных разрядов составляла не менее 6 с от каждого животного. Каждый разряд разбивался на шесть временных интервалов (фоновая активность, преиктальная активность, развязка, поддержание припадка, до окончания припадка, постиктальная стадия). Затем, используя взаимную информационную функцию и корреляционную функцию, оценивали запаздывание для каждого временного интервала в отдельности. Обнаружены существенные различия между результатами, полученными с помощью функции взаимной информации и функции автокорреляции. Также мы обнаружили, что для большинства рассматриваемых временных интервалов можно найти аналогичные значения оптимального временного лага, что позволяет использовать универсальные прогнозные модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта No 19-72-10030.

1. Megidddo I., Colson A., Chisholm D., et. al. *Epilepsia* **57**, **3** (2016) 464-474.
2. Holmes G.L., McKeever M., Adamson M. *Annals of Neurology* **21**, **3** (1987) 268-273.

## Пространственно-частотная селекция и направленное ответвление спиновых волн в магнетонно-кристаллической структуре

Губанова Ю.А., Мартышкин А.А., Одинцов С.А., Бегинин Е.Н., Садовников А.В.

СГУ, Саратов

В последние годы большой интерес представляет исследование распространения магнитостатических спиновых волн (МСВ)[1] в структурах с периодически изменяющимися параметрами в магнетонных кристаллах (МК)[2]. Развитие технологий формирования магнитных плечиков представляет возможность создания структур микро- и наномасштабов. В

магнитных микроволноводах с латеральной дипольной спин-волновой связью происходит периодическая перекачка мощности спиновой волны от одного волновода к другому [3]. В данной работе показана возможность ответвления поверхностной МСВ в структуре, объединяющей в себе идею МК и латеральных структур. Структура представляет собой два волновода связанных между собой неоднородностью в виде дырок.

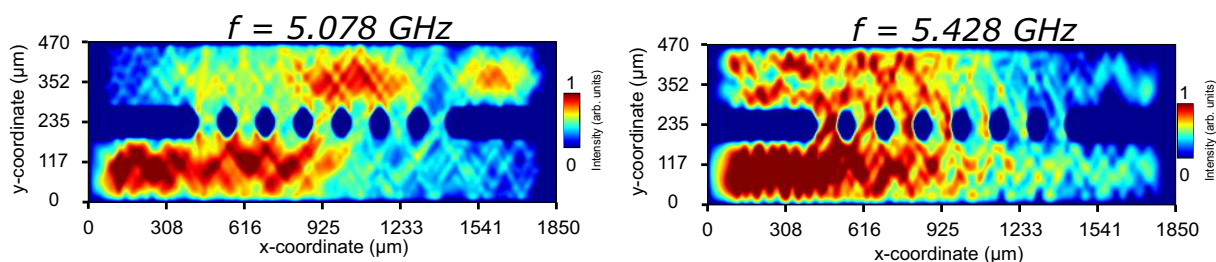


Рис. 1: Карты распределения динамической намагниченности  $m_z$  при различных значениях частоты сигнала

Для исследования свойств распространения МСВ в структуре было проведено микромагнитное моделирование на основе численного решения уравнения Ландау-Лившица-Гильберта[4]. На рис. 1 видно, что при различных значениях частоты сигнал ответвляется в разные каналы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (No 19-37-80004)

1. Sadovnikov A.V., Davies C.S., Kruglyak V.V., *Phys. Rev. B.* **96** (2017) 060401
2. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Beginin E.N *Phys. Rev. App.* **7** 014013.
3. Odintsov S.A., Sadovnikov A.V., Grachev A.A. *JETP Letters* **Vol. 104** (2016) 563-567.
4. Sadovnikov A.V., Odintsov S.A., Beginin E.N *Phys. Rev. B* **96** (2017) 144428

## Исследование динамики распространения спиновых волн в градиентной мультиферроидной структуре на основе нерегулярного ферритового микроволновода с изменяющейся шириной.

Губанов В.А., Одинцов С.А., Шешукова С.Е., Садовников А.В.

СГУ, Саратов

В настоящее время исследование распространения магнитостатических волн (МСВ) в ферромагнитных структурах, а так же изучение методов управления распространения МСВ, представляет огромный интерес [1,2].

В данной работе с помощью микромагнитного моделирования и экспериментальных измерений на основе метода Манделштам-Брилюэновской спектроскопии магнитных материалов было проведено исследование распространения спиновой волны в микроволноводе с плавным изменением ширины, сформированным из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). При приложении напряжения к контактам пьезоэлектрического слоя наблюдалась возможность управления распространения МСВ из-за создания локальной деформации.

Длина рассматриваемой структуры была равна 10000 мкм, ширины широкого и узкого концов волноводов брались 2500 мкм и 200 мкм соответственно. Толщина пленки ЖИГ бралась 10 мкм. Возбуждение МСВ происходило при помощи подачи СВЧ сигнала на микрополосковую антенну шириной 30 мкм, расположенной в широкой части на расстоянии 1500 мкм от конца микроволновода.

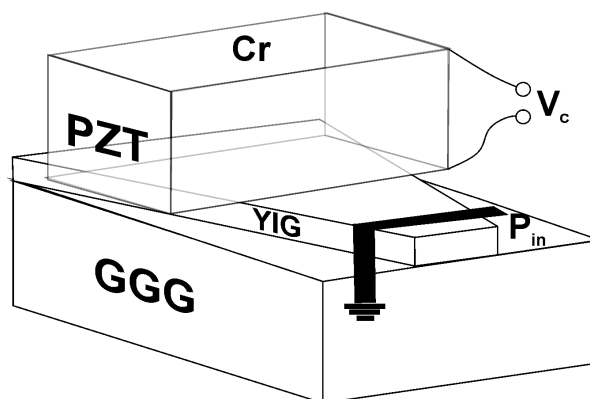


Рис. 1: Схема рассматриваемой структуры

Было проведено микромагнитное моделирование, основанное на решении уравнения Ландау-Лившица-Гильберта методом конечных разностей. Также при моделировании структуры на концах волновода были введены области с увеличенным параметром затухания для избавления от отражений. Показан характер распространения МСВ в сужающемся волноводе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (No 18-37-00482) и гранта Президента РФ МК-3650.2018.9.

1. Sadovnikov A.V., Davies C.S., Kruglyak V.V., *Phys. Rev. B.* **96** (2017) 060401
2. Sadovnikov A.V., Gubanov V.A., Sheshukova S.E., *Phys. Rev. App.* **9** (2018) 051002.

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

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

СГТУ, 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,  $\varepsilon$ ,  $\omega_{1,2}$  — управляющие параметры осцилляторов,  $\gamma$  — коэффициент связи,  $\tau$  — время запаздывания.

В результате бифуркационного анализа нами установлено, что с увеличением  $\tau$  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. *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 648.

## Определение характеристик перемежающейся обобщенной синхронизации при помощи непрерывного вейвлет-преобразования

Евстифеев Е.В., Москаленко О.И.

СарГУ, Саратов

Хаотическая синхронизация — одно из фундаментальных явлений радиофизики [1]. Среди нескольких типов хаотической синхронизации наибольший интерес исследователей привлекает обобщенная синхронизация [2] в связи с ее важным практическим значением. Обобщенная синхронизация применяется при исследовании взаимосвязи биологических, физических и химических систем [3], скрытой передачи информации [4] и т.д.

Известно, что при однонаправленной связи двух потоковых хаотических динамических систем с ростом значения параметра связи устанавливается режим так называемой перемежающейся обобщенной синхронизации с перемежаемостью on-off типа [6]. При определенном критическом значении параметра связи наступает режим полной обобщенной синхронизации. Если значения параметра связи немного меньше по сравнению с критическим, то режим синхронизации (ламинарная фаза поведения) прерывается асинхронными колебаниями (турбулентной фазой). При использовании методов выделения характерных

ламинарных фаз можно построить распределение их длительностей, которое будет удовлетворять степенному закону с показателем степени “-1.5” [7]. Также, средняя длительность ламинарной фазы будет увеличиваться по мере приближения параметра связи к критическому значению, пока не станет по длительности бесконечной.

В данной работе для двух однонаправленно связанных осцилляторов Ресслера [8] были определены основные характеристики перемежающейся обобщенной синхронизации: распределение длительностей ламинарных фаз при фиксированном параметре связи и зависимость средней длительности ламинарной фазы от параметра надкритичности. Для определения характеристик метод непрерывного вейвлет-преобразования [9, 10] был применен к временному ряду, полученному методом вспомогательной системы [11]. Такой подход позволил сгладить флуктуации временного ряда и получить более точную оценку характеристик. Также, указанные характеристики были получены для временных рядов с аддитивным белым шумом. Результаты показали, что такой шум при малой амплитуде оказывает слабое влияние на оценки, получаемые методом вейвлет-преобразования. Результаты обоих методов хорошо согласуются с теоретическими зависимостями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект е 19-12-00037).

1. Boccaletti S., Kurtz J., Osipov G., Valladares D.L., Zhou C.S. *Physics Reports* **366** (2002) 1-101
2. Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E. *Phys. Rev. E* **84** (2011) No. 3, 037201
3. M. G. Rosenblum, A. S. Pikovsky, and J. Kurths *Fluctuation and Noise Letters* **4** (2004), No. 1, L53-L62
4. Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E. *Phys. Lett. A* **374** (2010) 2925
5. Pyragas K. *Phys. Rev. E* **54** (1996) R4508
6. Кузнецов С.П. Динамический хаос. М:ФИЗМАТЛИТ, 2006
7. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *ЖТФ* **76** (2006) Вып. 2, 1
8. Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M. *Phys Rev E*. **53** (1996) No 5, 4528
9. Короновский А.А. Минюхин И.М., Тищенко А.А., Храмов А.Е., Мидзяновская И.С., Ситникова Е.Ю., Van Luitelaar E.L., Rijn С.М. *Изв. вузов “ПНД”* **15** (2007) No 4, 34
10. Короновский А.А., Тыщенко А.А., Храмов А.Е. *Письма в ЖТФ* **31** (2005) вып. 21, 1

## Динамика неявного отображения, ассоциирующегося с применением методов Ньютона и Эйлера для решения уравнений на комплексной плоскости

Елистратов А.А., Савин Д.В.

СарГУ, Саратов

Известно, что для кубического уравнения эта граница является фрактальной, и представляет собой т. н. “фрактал Ньютона”, являющийся одним из эталонных примеров фракталов, возникающих в теории динамических систем, и вошедший в многочисленные учебники и книги по теории фракталов [1]. В то же время известно, что, наряду с обычным



методом Ньютона при решении уравнений в ряде случаев уместно применять т. н. “ослабленный” метод Ньютона - модификацию исходного метода, состоящую в добавлении отличного от 1 постоянного множителя в слагаемое, определяющее расстояние между  $n$ -м и  $(n+1)$ -м приближениями к корню. С другой стороны, введение такого множителя позволяет рассматривать метод Ньютона как итеративный процесс метода Эйлера для некоего дифференциального уравнения. Если же подходить к этой задаче с позиций теории динамических систем, такую модификацию метода Ньютона (или Эйлера) можно рассматривать как параметризацию исходного отображения неким дополнительным параметром.

Очевидно, при непрерывном его изменении устройство фазового пространства, и, в частности, структура границ бассейнов притяжения сосуществующих аттракторов такой системы будет также претерпевать какие-либо плавные изменения либо бифуркации. При этом очевидно, что полезным инструментом для количественной оценки изменений, происходящих в структуре фазового пространства, может являться расчет фрактальной размерности границ бассейнов притяжения.

В данной работе подробно рассматривается проблема Кэли для обобщенного (косолабленного) метода Ньютона в контексте кубического уравнения в комплексных числах. Для этого мы конструируем обобщенное отображение, объединяющее в себе отображения для прямого и обратного итерационного процесса, и далее рассматриваем структуру фазовой плоскости при различных значениях параметров.

Для количественного описания объектов, полученных на фазовой плоскости обобщенного отображения, используется значение фрактальной размерности, рассчитанное при помощи алгоритма Вок-Counting [2]. Построены аттракторы и бифуркационные деревья, продемонстрировано наличие циклов разной периодичности, а также перехода к хаосу.

1. Красота фракталов: Образы комплекс. динам. систем / Х.-О. Пайтген, П. Х. Рихтер / ISBN 5-03-001296-6;
2. Block A., von Bloh W., Schellnhuber H. J. *Phys. Rev. A* **42** (1990) 1869.

## Исследование эффекта дрейфа в зрительной рабочей памяти в нейронной сети с кольцевой архитектурой

Емелин Е.А., Мищенко М.А.

ННГУ, Н.Новгород

В настоящее время повсеместно ведутся исследования, направленные на изучение работы мозга. До сих пор нет достаточного понимания о протекании многих процессов и явлений, либо их описание представлено лишь теориями, требующих проверки. Поскольку решение данных вопросов является сложной задачей, были разработаны различные математические модели нейронов и сетей на их основе, призванные облегчить исследования. Их изучение и моделирование позволяет получать данные, которые расширяют наше понимание механизмов, лежащих в основе процессов, протекающих в мозге.

Одним из важных феноменов, является зрительная рабочая память, так как позволяет обрабатывать информацию и манипулировать ей в короткие промежутки времени [1, 2]. Принцип ее работы заключается в синхронной активности групп нейронов, кодирующих соответствующий им объект. По одной из концепции, значительное влияние на

данный процесс оказывает кратковременная синаптическая пластичность [2, 3]. Кроме того, в зрительной рабочей памяти существует интересное для изучения явление дрейфа нейронной активности. Его суть заключается в том, что происходит смещение активности от нейронов, кодирующих конкретный объект, что приводит к искажению информации [4].

Для исследования механизмов формирования зрительной рабочей памяти и роли пластичности связей в динамике данного явления удобным инструментом является математическое моделирование. Для моделирования зрительной рабочей памяти предполагается использовать импульсную нейронную сеть с кольцевой топологией. [5]. Причиной использования подобной сети является ее архитектура, повторяющая строение нейронных колонок зрительной коры головного мозга, которые отвечают за определение ориентации входного зрительного стимула.

В данной работе проведено моделирование рабочей памяти с помощью симулятора для импульсных нейронных сетей Brian2 и научной среды разработки Spyder. В результате нам удалось воспроизвести эффект и оценить важность кратковременной пластичности в данном процессе. Кроме того, мы исследовали эффект дрейфа нейронной активности. Согласно экспериментальным данным, причиной дрейфа является неоднородность связей в нейронной сети и возможным механизмом для уменьшения этого эффекта является добавление кратковременной синаптической пластичности [4]. Мы провели моделирование на импульсной нейронной сети с кольцевой архитектурой, и достигли дрейфа активности нейронов, ответственных за поданный стимул. Путем добавления пластичности удалось значительно замедлить данное смещение. Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта 18-11-00294.

1. Barak O., Tsodyks M. *Current opinion in neurobiology* **25** (2014) 20-24.
2. Mongillo G., Barak O., Tsodyks M. *Science* **319** (2008) 1543-1546.
3. Miller E. K., Lundqvist M., Bastos A. M. *Neuron* **100** (2018) 463-475.
4. Itskov V., Hansel D., Tsodyks M. *Frontiers in computational neuroscience* **5** (2011) 40.
5. Lajoie G., Young L.-S. *Neural Comput* **28** (2016) 1985-2010.

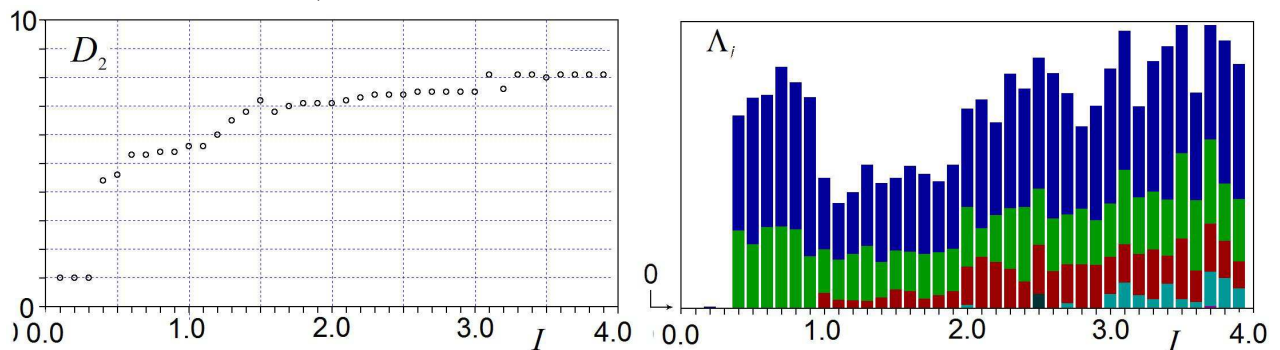
## **Анализ неустойчивости сложной динамики по временным рядам на примере приборов СВЧ**

**Исаева О.Б., Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С., Рожнев А.Г.**

*СФИРЭ РАН, Саратов*

Генераторы сложных сверхширокополосных сигналов с сильными хаотическими свойствами (гиперхаотическими), обладая целым рядом технических приложений (шумотроны, локация, коммуникация и т.д.), привлекают все больший интерес. Примерами таких генераторов могут служить некоторые СВЧ-приборы [1-4]. Исследование генерируемого ими излучения посредством простых статистических методов, таких, например, как Фурье-анализ, позволяет лишь выявить наличие сложности во временной реализации. Для выявления степени сложности требуется расчет фрактальных характеристик ассоциирующихся с динамическими режимами аттракторов и, главное, спектра ляпуновских

показателей. По величине показателей можно оценить скорость развития неустойчивости, а по количеству положительных показателей в спектре – размерность гиперхаоса. В настоящей работе произведены расчеты упомянутых характеристик по временным рядам, полученным, в том числе, и в натурном эксперименте. Ляпуновские показатели искались посредством наиболее точной из известных методик [5-6]. На рисунке ниже представлен пример результатов расчета зависимости от параметра  $I$  корреляционной размерности  $D_2$  слева и положительных ляпуновских показателей  $\Lambda_i$  справа ( $i = 1$  – синий цвет, 2 – зеленый, 3 – красный, 4 – голубой).



Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ No 19-08-00955.

1. Ергаков В.С., Моисеев М.А. *Радиотехника и электроника* **31**, вып. 5 (1986) 962.
2. Афанасьева В.В., Лазерсон А.Г. *Изв. вузов. ПНД* **3**, с 5 (1995) 88.
3. Blokhina E.V., Kuznetsov S.P., Rozhnev A.G. *IEEE Trans. Electron. Dev.* **54**, No.2 (2007) 188.
4. Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. *Изв. вузов. Радиофизика* **47**, с5 (2004) 1.
5. Sano M., Sawada Y. *Phys.Rev.Lett.* **55** (1985) 1082.
6. Rozental R.M., Isaeva O.B., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Rozhnev A.G. *Russ. J. Nonlinear Dynamics* **14** (2018) 155.

## Исследование путей перехода к гиперболическому и почти гиперболическому хаосу

Исаева О.Б.<sup>1,2</sup>, Кузнецов С.П.<sup>1</sup>

СФИРЭ РАН, Саратов

Важной проблемой в теории динамических систем является вопрос о путях перехода систем в хаотическое состояние. Известные сценарии перехода к хаосу обладают свойством универсальности и характеризуются свойством скейлинга – масштабного подобия в фазовом пространстве и пространстве параметров в окрестности центров скейлинга, критических точек.

В работе произведен поиск новых путей и сценариев возникновения гиперболических аттракторов, уникальная структура которых должна налагать определенные требования на тип симметрии систем и топологии их фазового пространства. Формулирование таких требований поможет в разработке новых методов конструирования физических систем с гиперболическим хаосом и поиску его в известных моделях.

Наиболее важным и полезным свойством гиперболических хаотических аттракторов является структурная устойчивость (грубость). Она определяется присутствием в аттракторе исключительно невырожденных траекторий с устойчивостью гиперболического типа. Устойчивое и неустойчивое многообразия этих вложенных в аттрактор траекторий пересекаются под ненулевым углом и имеют одинаковую размерность. Это определяет отсутствие касаний у многообразий аттрактора в целом. В работе проведена проверка критерия углов для некоторых примеров гиперболических аттракторов.

Анализ статистических закономерностей для распределения углов, локальных показателей Ляпунова, изучение фрактальных свойств аттракторов и бифуркационных структур в пространстве параметров позволил более глубоко прояснить принципы возникновения такого хаоса.

Помимо исследования грубого хаоса, ассоциирующегося с однородно гиперболическими аттракторами, проведено исследование более широкого класса почти гиперболических множеств. Очевидно, не обладающие всеми атрибутами однородно гиперболических аттракторов, они, по-видимому, могут сохранять некоторые из них, особенно важные для технических приложений хаоса. Для псевдогиперболических аттракторов адаптирован численный метод проверки критерия углов, который требует отсутствия касаний между растягивающимся и сжимающимся подпространствами. Изучено пространство параметров моделей, в которых ожидалось присутствие почти гиперболических множеств. Построены карты режимов с указанием областей их существования. Проведен бифуркационный анализ структур на этих картах. Сформулированы некоторые закономерности, могущие служить косвенными признаками наличия таких типов аттракторов в системах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект No 17-12-01008).

## **Нелинейная динамика электронно-волновых, магнитоэлектронных и твердотельных систем, приборов вакуумной СВЧ электроники, а также устройств оптического диапазона**

**Истомина Н.Л.**

*МИИГАиК, Москва*

Создание трехмерных структур микро- и субмикрометрового диапазона с помощью лазерной печати (direct laser writing - DLW) охватывает целый ряд подходов, процедура которых включает в себя создание микрофлюидного канала с использованием альтернативных процессов изготовления (например, методами микроформования или лазерной абляции), затем ввод фотопоглощающего материала в микрофлюидный канал и печать структур непосредственно внутри канала. Создаваемые трехмерные каркасы из фотополимеризуемого материала могут быть изготовлены с помощью мягкой литографии. Этот метод позволяет создавать эластомерные каналы для применений, которые требуют геометрически сложных структур. В основе метода DLW лежит использование сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов для полимеризации жидкофазного фотополимеризуемого материала с помощью двухфотонных (или многофотонных) явлений поглощения. Путем точного позиционирования лазерного фокуса 3D-структуры из полимеризуемого материала могут быть получены с разрешением около 100 нм по горизонтали и 190 нм по вертикали. Однако для микро- и субмикронных флюидных приложений это разрешение

приводит к неизбежному конфликту при решении задач доставки жидких объемов в закрытые DLW-изготовленные системы. Полученные структуры используются для печати биоткани, например, для периферической нервной ткани. Метод DLW обладает большими перспективами использования в областях моделирования органов и микрофлюидного жидкостного анализа, хотя доставка анализируемой жидкости является дополнительной инженерной задачей.

Метод оказался подходящим для создания МЭМС. В работе выполнен обзор последних достижений в области использования DLW-метода по открытым публикациям.

## Конкурентная динамика в сети нейроподобных генераторов

Ковалева Н.С., Матросов В.В., Мищенко М.А.

*ННГУ, Нижний Новгород*

В данной работе исследуются условия возникновения конкурентной динамики кластеров нейронной сети. В качестве элементов сети используется нейроподобный генератор на основе системы фазовой синхронизации с полосовым фильтром [1,2]. Элементы сети находятся в возбуждимом режиме и осуществляют взаимодействие между собой посредством импульсных связей. Подробное исследование возбуждения генератора импульсным воздействием проведено в работе [3]. Функция связи аналогична нелинейной функции однопольной связи, описывающей кинетику химического синапса, представленной в работе [4].

Характер связей сети определяется случайной матрицей связности, имеющей заданный процент связности и матрицей, определяющей силу связей между элементами сети. Часть элементов сети объединена в кластеры путем установления более сильных возбуждающих связей между элементами. Элементы сети находятся в возбуждимом состоянии, а активация сети происходит посредством импульсного внешнего воздействия в случайные моменты времени с фиксированными минимальным средним периодом и амплитудой.

Исследована динамика кластеров с тормозным межкластерным взаимодействием. По мере увеличения внутривкластерной или межкластерной силы связи один кластер сильнее подавляет активность второго, пока не становится доминирующим.

Рассмотрена сеть, в которой часть нейронов не входит ни в один из кластеров, при этом сторонние нейроны оказывают возбуждающее воздействие на остальные нейроны. Показано, что такая архитектура сети приводит к усилению активности ведущего кластера.

Показана возможность наличия конкурентной динамики кластеров с возбуждающей межкластерной силой связи, при этом взаимодействие кластеров осуществляется через общий ансамбль тормозных нейронов. При заданной конфигурации при увеличении вероятности возникновения связей в сети активность сети возрастает и один из кластеров становится полностью доминирующим.

Исследовано влияние параметров среднего минимального периода и амплитуды, воздействующей импульсной последовательности на два взаимодействующих кластера. По мере увеличения амплитуды один из кластеров набирает большую активность и начинает сильнее подавлять другой. При увеличении интенсивности внешнего воздействия наблюдается глобальная асинхронная активность сети. При снижении общей активности сети

не происходит ярко выраженного формирования кластеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-29-23001 мк

1. Мищенко М.А., Шалфеев В.Д., Матросов В.В. *Изв. вузов. ПНД* **20(4)** (2012) 122
2. Matrosov V.V., Mishchenko M.A., Shalfeev V.D. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **222(10)** (2013) 2399
3. Мищенко М.А., Жукова Н.С., Матросов В.В. *Изв. вузов. ПНД* **26(5)** (2018) 6
4. Simonov A.Yu., Gordleeva S.Yu., Pisarchik A.N., Kazantsev V.B. *JETP Letters* **98(10)** (2013) 632

## Соленоиды Смейла – Вильямса в автономной модели связанных осцилляторов с гомоклинической бифуркацией “восьмерки”

Круглов В.П., Сатаев И.Р

*Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов*

В статье [1] была предложена автономная система с однородно гиперболическим аттрактором Смейла – Вильямса [2, 3], составленная из двух осцилляторов, в которых наблюдается гомоклиническая бифуркация “восьмерки” [4, 5]. Было продемонстрировано существование соленоида Смейла – Вильямса с утроением угловой переменной за одно действие отображения Пуанкаре. Мы предлагаем модификацию, приводящую к появлению соленоида Смейла – Вильямса с удвоением угловой переменной. Мы исследуем сценарии возникновения соленоидов Смейла – Вильямса в этих моделях.

Модель основана на осцилляторе следующего вида:

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

в котором при значении  $L \approx 0.3197$  происходит “влипание” предельных циклов в петли, образованные асимптотическими траекториями седла. Мы изучаем две связанные подсистемы (1) с обобщенными координатами  $x$  и  $y$  и скоростями  $u$  и  $v$ , а уравнения записываем в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= w, \\ \dot{w} &= (1 - |z|^2)z + [L - (1 - |z|^2)^2]w + \varepsilon w^M, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $z = x + iy$ ,  $w = u + iv$ . Введем угловую переменную  $\theta$  как аргумент комплексной переменной  $z \propto \exp i\theta$ . Когда траектория близка к седловому положению равновесия в начале координат, угловая переменная  $\theta$  растягивается в  $M$  раз благодаря дополнительному слагаемому  $\varepsilon w^M$ , то есть подвергается растягивающему отображению окружности  $\theta_{n+1} = M\theta_n + \text{const} \pmod{2\pi}$  при каждом возвращении траектории к седлу. Мы рассматриваем модели с фактором растяжения  $M$ , равным 2 и 3. По остальным направлениям в

фазовом пространстве (2) происходит сильное сжатие. Описанная динамика соответствует соленоиду Смейла – Вильямса. Для того, чтобы продемонстрировать описанное преобразование фазового пространства, мы используем сечение Пуанкаре потоковой системы (2) поверхностью  $S = |z|^2 = 1$ , находящееся достаточно далеко от седлового положения равновесия в начале координат.

*Работа выполнена при поддержке РНФ, грант No 17-12-01008.*

1. Круглов В.П., Хаджиева Л.М.-Б. *Известия вузов. ПНД* **24** (2016) 54–64.
2. Smale S. *Bull. Amer. Math. Soc.* **73** (1967) 747–817.
3. Williams R. *Inst. Hautes Etudes Sci. Publ. Math.* (1974) 169–203.
4. Неймарк Ю.И. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1972. 129–135.
5. Бутенин Н.В., Неймарк Ю.И., Фуфаев Н.Л. Введение в теорию нелинейных колебаний. М.: Наука, 1987. С. 303

## Эффект ложных связей между осцилляторами в зависимости от длины временного ряда и измерительного шума

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

*СарГУ, Саратов*

Количественная оценка направленных связей (воздействий) между колебательными системами по временным рядам важна для многих задач на практике, например, в геофизике и нейрофизиологии. В таких случаях часто используется оценка причинности по Грейнджеру, т.е. оценка улучшения прогноза (УП) одного процесса при учете данных о другом по сравнению с индивидуальным прогнозом. Нормированное УП считается оценкой силы воздействия, а 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 (эффект ложных связей), например, из-за измерительного шума или короткой длины временного ряда. Поэтому важно учитывать априорную информацию об этих факторах и ввести в метод поправки или хотя бы диагностировать возможные трудности. Если для некоторого достаточно широкого класса систем установить области в пространствах параметров, соответствующие большим значениям УП в ложную сторону, то на практике, имея приближенную информацию о параметрах процессов, можно судить о достаточности оценок УП или необходимости специальных подходов, учитывающих возможный эффект ложных связей.

В работе исследована зависимость значений УП в ложную сторону от параметров динамики для достаточно простого класса однонаправленно связанных колебательных систем – линейных стохастических диссипативных осцилляторов – в зависимости от уровня измерительного шума и длины временного ряда. Эти системы задаются стохастическими разностными уравнениями:

$$x_n = a_x x_{n-1} + b_x x_{n-2} + \xi_{x,n}, \quad y_n = a_y y_{n-1} + b_y y_{n-2} + \xi_{y,n} + c x_{n-1} \quad (1)$$

где  $a_{x,y} = 2\cos(2\pi/T_{x,y})\exp(-1/\tau_{x,y})$ ,  $b_{x,y} = -\exp(-2/\tau_{x,y})$ ,  $T$  - периоды колебаний,  $\tau$  - времена релаксации,  $\xi$  - гауссовы взаимно некоррелированные белые шумы с нулевым

средним и одинаковой интенсивностью. Значения УП вычислялись через определители матричной ковариационной функции многомерного процесса (1) путем решения дифференциальных уравнений для моментов второго порядка (для анализа роли измерительного шума) и путем статистического оценивания по временным рядам (для анализа роли длины временного ряда).

Показано, что эффект ложных связей типичен, когда дисперсия шума лежит в диапазоне от 0.5 до 2 дисперсий чистого сигнала, но может проявляться в отдельных случаях и при уровнях шума порядка 10% от дисперсии чистого сигнала. Показано, что эффект типичен при длине ряда менее, чем 25-30 времен релаксации (имеется в виду большее из двух времен в случае неидентичных осцилляторов). Полученные результаты полезны как критерий необходимости учета измерительного шума и краткости временного ряда на практике при оценке причинности по Грейнджеру. Планируется дальнейшая проверка и обобщение этих результатов путем исследования стохастически возмущаемых нелинейных колебательных систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант No 17-02-00307).

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

## **Вынужденные колебания диссипативного осциллятора при управлении фазой и частотой внешнего воздействия**

**Крылосова Д.А., Селезнев Е.П., Станкевич Н.В.**

*СарГУ, СФ ИРЭ РАН, СарГТУ, Саратов*

Многие системы, включая радиофизические, биологические и другие, демонстрируют колебательные процессы, при которых один объект, входящий в систему, воздействует на другой периодическим сигналом, но при изменении условий функционирования, частота воздействия изменяется. Например, в системах передачи информации для обеспечения высокой устойчивости используется, так называемая, фазовая автоподстройка частоты [1-2]. Система сердечно-сосудистой регуляции живых организмов при изменении нагрузки увеличивает или уменьшает частоту сердцебиений [3-4]. При такого рода взаимодействиях зависимость фазы или частоты от динамической переменной может привести к возникновению в системе сложной динамики. Процесс управления в таком случае оказывается очень сложным, его исследование и моделирование наталкивается на целый ряд трудностей. Один из путей в исследовании подобных систем и процессов состоит в рассмотрении более простых объектов, в которых возбуждение колебаний и управление частотой достаточно просто моделируется. В качестве такой системы удобно использовать классическую модель теории колебаний - линейный осциллятор, находящийся под внешним гармоническим воздействием [5].

В рамках данной работы представлено исследование динамики неавтономного осциллятора с управляемой фазой и частотой внешнего воздействия. Исследована структура пространства управляющих параметров. Определена роль параметров. В работе будет детально описан объект исследования: линейный осциллятор с внешним периодическим воздействием, внешнее воздействие которого имеет частоту и фазу, зависящие от динамической переменной, что приводит к появлению нелинейности в системе. Будет рассмотрена



подробно динамика осциллятора, фаза которого зависит от динамической переменной, а также представлено исследование осциллятора с частотой, зависящей от динамической переменной. Для указанных моделей проведен анализ устройства плоскостей параметров внешней силы. Исследованы фазовые портреты, сечения Пуанкаре и спектры Фурье. В результате исследования показано, что линейная зависимость фазы и частоты внешнего сигнала от динамической переменной приводит к возникновению в системе хаотических колебаний, характеризующихся широкополосным спектром.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 17-12-01008.

1. Best R. Phase-Lock Loops: Design, Simulation and Application. 6th ed. McGraw-Hill, 2007.
2. Шалфеев В.Д., Матросов В.В. Нелинейная динамика систем фазовой синхронизации. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2013.
3. Гайтон А.К., Холл Дж.Э. Медицинская физиология. М.: Логосфера, 2008.
4. Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kiselev A.R., Gridnev V.I., Bezruchko V.P. *The European Phys. J. Special Topics* **222** (2013) 2687-2696
5. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984.

## Управление характеристиками запрещенных зон в слоистой структуре Металповерхность - Магнетонный кристалл

Лобанов Н.Д., Матвеев О.В., Морозова М.А.

СарГУ, Саратов

Метаматериалы представляют собой искусственно созданные материалы, обладающие свойствами, не встречающимися в природе. Под такими свойствами понимаются, например, наличие у материала отрицательных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей, которые создаются за счет использования периодических структур. Период таких структур меньше длины волны, распространяющейся в метаматериале [1]. Плоскостные (1D или 2D) метаматериалы, называемые металповерхностями (МП), более просты в изготовлении, для чего могут быть использованы существующие технологии литографии и нанопечати. Исследование влияния металповерхностей на распространение волн в пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ) проводилось в работах [2, 3], в которых показано появление в спектре спиновых волн полос непропускания. В настоящей работе исследуется влияние металповерхностей на распространение магнитостатических волн в магнетонном кристалле (МК) - периодической ферромагнитной структуре.

МП и МК представляют собой пленки ЖИГ, выращенные на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ), с периодической системой канавок разного периода. Период МП меньше периода МК ( $L_1 < L_2$ ), таким образом, для длин волн, соответствующим условию брэгговского резонанса МК, МП является металповерхностью. Структура помещена во внешнее магнитное поле, направленное касательно к плоскости структуры, таким образом, в структуре будут распространяться поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ).

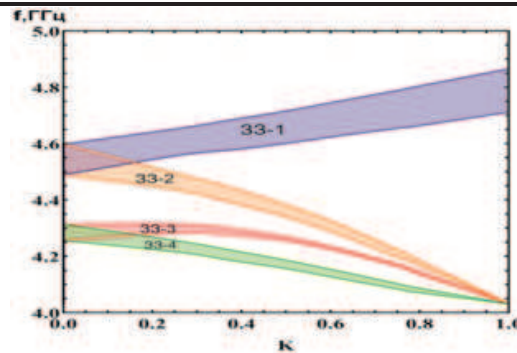


Рис. 1: Зависимость положения и ширины запрещенных зон от коэффициента связи ( $K$ ) в МП-МК

Наложение МП на МК приводит к образованию в области первого брэгговского резонанса 4 запрещенные зоны (33-1, 33-2, 33-3, 33-4 - закрашенные области на рисунке 1). На представленном рисунке можно увидеть, как меняются положение и ширина запрещенных зон в зависимости от  $K$  при  $L_1/L_2 < 1$ . При отсутствии связи МП-МК подобна структуре МК-МК с одинаковыми периодами ( $L_1=L_2$ ) [4], то есть формируются 2 ЗЗ. При увеличении коэффициента связи происходит образование дополнительных двух запрещенных зон, формирующихся из-за изменения положения ЗЗ по частоте. Впоследствии при приближении к значению  $K=1$  33-2, 33-3 и 33-4 уменьшаются по ширине и в 1 ширины запрещенных зон становятся 0, 33-1 же при увеличении коэффициента связи до 1 увеличивается по ширине. Таким образом, ситуацию при  $K=1$  аналогична одиночному МК, где образуется лишь одна запрещенная зона.

В работе показано, что количество, положение и ширина запрещенных зон зависят от периода МП, коэффициента связи между МП и МК, расстояния от МП до МК, сдвига МП относительно МК, толщины МП, глубины канавок МП, намагниченности МП.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №19-79-20121).

1. Гуляев Ю.В. и др. *Вест. РАН.* (2008) Т.78. С.438.
2. Vysotskii S. L. et al. *Acta Physica Polonica.* (2018) V.133. P.508.
3. Vysotskii S. L. et al. *IEEE Magn. Lett.* **8** (2017) 3706104
4. Morozova M.A. et al. *J. Appl. Phys.* **120** (2016) 223901

## Исследование спин-волнового транспорта в индуцированных локальными деформациями магнитных структурах с нарушением трансляционной симметрии.

Мартышкин А.А., Грачев А.А., Шешукова С.Е., Садовников А.В.

*СГУ, Саратов*

В последнее время большое развитие получили технологии, позволяющие формировать магнитные пленки микро- и наномасштабов, что дает возможность реализовывать устройства обработки сигналов на принципах магнетронной спинтроники [1]. Исследование динамики распространения магнитостатических спиновых волн (МСВ) в нерегулярных

микроструктурах представляет большой интерес. На рисунке 1а схематически изображена исследуемая структура в которой реализуется спин-волновой транспорт сигнала в планарном и вертикальном направлениях. В качестве материала для микроволновода использовался железо-иттриевый гранат  $[\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12} (111)]$ .

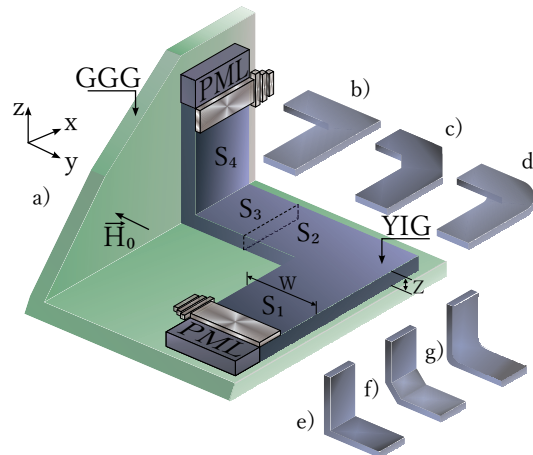


Рис. 1: (a) Схематическое изображение исследуемой структуры; (b, c, d) - элементарные планарные соединения под углом  $90^\circ$ , под углом  $45^\circ$  и закругленным сочленением соответственно; (e, f, g) - элементарные вертикальные соединения под углом  $90^\circ$ , под углом  $45^\circ$  и закругленным сочленением соответственно.

На основе решения задачи о распространении МСВ, с помощью микромагнитного моделирования[2], в микроструктуре при возбуждении волны в области  $S_1$  были выявлены механизмы, обуславливающие характерные режимы распространения МСВ. Возможность создавать магнитные волноведущие структуры со спин-волновым поворотом позволят создавать трехмерные магнитные сети с большой плотностью упаковки функциональных элементов магнитной сети.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (No18-37-00482, No18-57-00006)

1. Sadovnikov A.V., Davies C.S., Kruglyak V.V., Romanenko D.V., Grishin S.V., Beginin E.N., Sharaevskii Y.P. and Nikitov S.A. *Phys. Rev. B*, **96**, (2017).
2. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. *AIP Advances*, **4**, (2014)

## Управление запрещенными зонами в композитной структуре магنونный кристалл - полупроводник

Морозова М.А., Романенко Д.В., Матвеев О.В., Шараевская А.Ю., Шараевский Ю.П.

СарГУ, Саратов

Одна из альтернативных концепций по преодолению ограничений стандартной КМОП-электроники, таких как увеличение токов туннелирования и утечки, лежит в области магноники, основной принцип которой заключается в использовании спиновых волн или магнонов вместо электронов в качестве носителей информации. Пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) с чрезвычайно низкими потерями при распространении спиновых волн являются наиболее подходящим материалом для новейших технологий магноники. При этом возможна интеграция ЖИГ-структур с полупроводниковыми подложками, например, на основе подложек GaN и Si [1, 2].

В слоистой структуре  $\Upsilon$  ферромагнетная пленка - полупроводник  $\Upsilon$  (ФП-ПП) электрическое поле спиновой волны проникает в полупроводник и создает в нем электрический ток. В этом случае открываются дополнительные возможности частотно зависимо усиления либо ослабления спиновой волны за счет создания тока в полупроводнике разной силы и полярности [3, 4]. В этом случае, если электроны в полупроводнике приобретают упорядоченное движение, то кроме электрического поля волны на них начинает действовать сила Лоренца, вызываемая проникающим в полупроводник магнитным полем спиновой волны.

В настоящей работе представлена модель для исследования особенностей распространения поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМСВ) в слоистой периодической магнитной гетероструктуре типа магنونный кристалл на полупроводниковой подложке при касательном намагничивании. Модель представляет систему связанных линейных волновых уравнений для прямой и встречной ПМСВ. На основе этой системы получено дисперсионное уравнение для волн в такой гетероструктуре и выяснены основные особенности дисперсионных характеристик, процессов релаксации гибридных прямых и встречных ПМСВ и механизмов формирования запрещенных зон. Показано, что при увеличении проводимости полупроводника запрещенная зона в рассматриваемой структуре смещается в область больших частот и увеличивается ширина зоны, кроме того увеличивается затухание прямой ПМСВ.

Таким образом, на основе полученных теоретических результатов показана возможность эффективного управления дисперсией ПМСВ в композитной структуре магنونный кристалл - полупроводник, характеристиками запрещенных зон за счет изменения электрических параметров структуры, а также возможность двойного управления (магнитным и электрическим полями).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №16-29-03120) и РНФ (грант №19-79-20121)

1. Masuda M., Chang N.S., Matsuo Y. *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques* (1974) 132
2. Stognij A.I. et al. *Inorganic Materials* **53** (2017) 1069
3. Lutsev L.V. et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** (2018) 355002
4. Sadovnikov A.V. et al. *Phys. Rev. B* **99** (2019) 054424

## Эффекты нелинейного переключения в структуре магнонный кристалл - ферромагнитная пленка

Матвеев О.В., Морозова М.А.

СарГУ, Саратов

В настоящее время большой интерес вызывают периодические структуры микронных или субмикронных размеров, сформированные на поверхности ферромагнитных пленок - магнонные кристаллы (МК) [1, 2]. В данной работе исследуются особенности распространения магнитостатических волн (МСВ) в связанной структуре магнонный кристалл - ферромагнитная пленка (МК-ФП), магнонный кристалл в свою очередь является ферромагнитной пленкой с системой периодических канавок. Несимметричность оказывает значительное влияние на физические процессы, имеющие место в такой структуре. В частности, в отличие от структуры связанных идентичных магнонных кристаллов, в которых спектр МСВ имеет две запрещенных зоны в полосе первого брэгговского резонанса, в структуре МК-ФП формируется три запрещенных зоны.

В работе приводятся результаты численного моделирования, модель построена в виде системы уравнений связанных мод для амплитуд огибающих прямых и встречных МСВ, распространяющихся в структуре МК-ФП [3]. Данная структура представлялась, как четырехпортовое устройство (один вход и три выхода). В такой структуре в зависимости от амплитуды входного сигнала большая часть выходного сигнала оказывается на различных портах, другими словами, в такой структуре имеет место нелинейное переключение между портами. В работе исследованы основные режимы нелинейного переключения в структуре МК-ФП в зависимости от толщины пленок, периода магнонного кристалла, расстояния между слоями, а также от того, куда подается входной сигнал: в ФП или в МК.

При подаче сигнала в ФП имеет место одно нелинейное переключение, аналогичное эффекту подавления линейной перекачки в связанной структуре ферромагнитных пленок. При подаче сигнала в МК наблюдается эффект двойного нелинейного переключения: в зависимости от мощности входной сигнал будет выходить с одного из трех выходных портов. Двойное нелинейное переключение объясняется совместным проявлением двух нелинейных эффектов, характерных для одиночного МК и связанных однородных пленок, а именно нелинейным переключением МК и подавлением линейной перекачки.

Таким образом, структура МК-ФП может функционировать как направленный ответвитель сигнала разной мощности. В такой структуре в зависимости от амплитуды входного сигнала большая часть выходного сигнала оказывается на различных портах. Кроме того, в работе показано, что данная структура в линейном режиме может использоваться для реализации функций частотного уплотнения/разделения каналов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №18-57-00006-Бел\_a)

1. Krawczyk M., Grundler D. *J.Phys.:Condens.Matter* **26** (2014) 123202
2. Морозова М.А., Матвеев О.В., Шараевский Ю.П. *ФТТ* **59** (2016) 1899
3. Morozova M.A. et al. *JAP* **120** (2016) 223901

## Мультиферроидный спинволновой мемристор на основе структуры магнонный кристалл - сегнетоэлектрик - магнонный кристалл

Матвеев О.В., Морозова М.А.

СарГУ, Саратов

В настоящее время особую актуальность приобретает аппаратная реализация нейроморфных архитектур [1] на базе новых технологий микро- и наноэлектроники для выполнения элементарных когнитивных операций распознавания объектов и работы с большими данными, что относится к имитации активности человеческого мозга и вопросу создания искусственного интеллекта. Перспективным подходом для создания маломощной нейроморфной архитектуры является использование мемристоров [2] в качестве электронных синапсов, управляющих передачей электрических импульсов между электронными нейронами.

Известная на настоящее время сегнетоэлектрическая память обладает мемристорными свойствами и может рассматриваться для создания новой архитектуры нейроморфных вычислений. При приложении к сегнетоэлектрику в ячейке такой памяти электрического поля сегнетоэлектрик меняет свою поляризацию, переходя на другой участок петли гистерезиса. За счет этого можно получить два хорошо различимых по энергиям состояния.

В качестве ячейки памяти в данной работе предлагается использовать новый тип мемристора - мультиферроидный спинволновой мемристор (МФСМ), состоящий из тонких слоев сегнетоэлектрика и магнонного кристалла. В такой структуре для считывания состояния поляризации сегнетоэлектрика будет использоваться спиновая волна, распространяющаяся в магнонном кристалле. Основной особенностью прохождения возбуждений через такие структуры является формирование запрещенных зон: брэгговских (для волн с длиной кратной периоду структуры) и гибридных. В зависимости от поляризации сегнетоэлектрика сигнал будет проходить через такую структуру либо затухать, т.е. по прохождению сигнала можно судить о значении поляризации СЭ и, таким образом, считывать записанную в него информацию.

Важным преимуществом четырехпортового МФСМ на основе структуры магнонный кристалл - сегнетоэлектрик - магнонный кристалл [3, 4], имеющей 2 входных порта и 4 выходных порта является возможность применения его не только как ячейки памяти, но и для обработки записанных данных, в частности, как логического вентиля. В такой структуре связь между спин-волновыми процессами в двух разных МК приводит к возникновению новых типов взаимодействий, которые позволяют, в частности, осуществлять ряд операций по обработке сигнала.

Таким образом, показано, что использование мемристоров на основе мультиферроидных структур может быть актуально для имитации синапсов в составе нейронной сети в архитектуре нейроморфных вычислений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №19-29-03049-мк)

1. Sung C., Hwang H., Yoo K. *JAP* **124** (2018) 151903
2. Strukov D.B. *Nature* **453** (2008) 80
3. Nikitin A.A. et al. *JAP* **122** (2017) 014102
4. Морозова М.А. и др. *ФТТ* **58** (2016) 266

## Спектр гибридных электромагнитно-спиновых волн в нелинейной структуре магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик

Матвеев О.В., Морозова М.А.

СарГУ, Саратов

Гибридные электромагнитно-спиновые волны (ГЭМСВ) распространяются в композитных мультиферроидных структурах, состоящих из ферромагнитных и сегнетоэлектрических слоев [1]. При больших значениях диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика (СЭ), которая зависит от приложенного постоянного электрического поля, электромагнитные волны (ЭМВ) в СЭ оказываются сильно замедленными. В этом случае в композитной структуре, состоящей из ферромагнитной пленки и сегнетоэлектрика на частотах, близких к частоте фазового синхронизма между ЭМВ и СВ, возникают ГЭМСВ [2]. Использование периодических мультиферроидных структур типа магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик (МК-СЭ) расширяет возможности управлению характеристиками волн в таких структурах. Сегнетоэлектрическая нагрузка приводит к образованию дополнительной полосы непропускания в области первого брэгговского резонанса (гибридной запрещенной зоны) [3]. Данный эффект в совокупности с возможностью электрического управления позволит создать эффективные устройства частотной обработки сигналов в СВЧ диапазоне.

В данной работе приведен вывод математической модели для описания дисперсии гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре МК-СЭ. Получено дисперсионное соотношение для ГЭМСВ в структуре МК-СЭ с учетом магнитной нелинейности ферромагнитной среды и электрической нелинейности сегнетоэлектрика [4] и исследовано их влияние на характеристики запрещенных зон. Показано, что учет магнитной нелинейности приводит к сдвигу основной и гибридной запрещенных зон вниз по частоте. Учет электрической нелинейности приводит к сдвигу только гибридной запрещенной зоны вверх по частоте, характеристики основной запрещенной зоны при этом не меняются. В работе также проведено исследование амплитудно-частотных характеристик такой структуры с помощью СВЧ-анализатора цепей. Для рассматриваемой структуры на основе пленки железо-иттриевого граната и пластины титаната бария-стронция влияние электрической нелинейности незначительно, влияние магнитной нелинейности более существенно и приводит к сдвигу запрещенных зон вниз по частоте на величину порядка 20 МГц.

Мультиферроидные структуры на базе магнетонных кристаллов могут быть полезны при разработке систем частотной обработки СВЧ-сигналов в качестве узкополосных фильтров. Возможность электрического управления делает такие системы более энергоэффективными и быстродействующими по сравнению с ферромагнитными. А учет нелинейных эффектов позволит уточнить характеристики таких систем в случае распространения сигналов большой мощности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №16-29-14021-офи\_м)

1. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е. Спинволновая электроника. Сер. Радиоэлектроника и связь. Знание, Москва, 1988
2. Demidov V.E., Kalinikos B.A., Edenhofer P. *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 10007
3. Morozova M.A. et al. *IEEE Trans. on Magn.* **51** (2015) 2802504
4. Черкасский М.А., Никитин А.А., Калиникос Б.А. *ЖЭТФ* **149** (2016) 839

## Коллективные явления в сети связанных колебательных систем, ассоциирующихся с комплексной аналитической динамикой и ее разрушением

Обычев М.А., Исаева О.Б.

СарГУ, Саратов

В литературе описаны примеры динамических систем, переменные и параметры в которых представлены многокомпонентными числами: двухкомпонентными комплексными, двойными и двойственными [1]; 4-х-компонентными кватернионами [2]; 8-ми-компонентными октавами [3]; матрицами [4] и др. Еще одним распространенным и физически обоснованным подходом обобщения динамических моделей на более многомерное пространство является построение связанных систем, сетей. Обычно это совокупности одинаковых элементов со связью, обладающие определенной симметрией. Для дискретных моделей в подавляющем числе работ рассматривают линейную инерционную и квадратичную диссипативную связи. В работе [5] обнаружена топологическая эквивалентность системы двух логистических отображений со связью в виде квадрата разности переменных комплексифицированному логистическому отображению. В настоящей работе мы покажем, что логистическое отображение, определенное для многокомпонентных чисел, например, кватернионов

$$z_{n+1} = c + z_n^2, z = x_0 + i_1x_1 + i_2x_2 + i_3x_3, \quad (1)$$

может быть сведено линейной заменой переменной к сети связанных логистических отображений

$$\begin{cases} X'_0 = C_0 + (X_0 - S)^2 - D, \\ X'_1 = C_1 + (X_1 - S)^2 - D, \\ X'_2 = C_2 + (X_2 - S)^2 - D, \\ X'_3 = C_3 + (X_3 - S)^2 - D, \end{cases} \quad (2)$$

где  $S$  — среднее по ансамблю значение переменной (среднее поле), а  $D$  — среднеквадратичное от него отклонение. Данный тип связи является более универсальным и обладает более четким физическим смыслом по сравнению с предложенным [5]. Наш подход может быть обобщен на произвольное число подсистем. Замечено также, что среднее поле может быть ассоциировано в терминах многокомпонентных чисел с вещественной компонентой переменной, а дисперсия  $D$  с расстоянием до вещественной оси.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект No 17-12-01008).

1. Roghon D. *Fractals*. **8**, 4 (2000) 355.
2. Galeeva R., Verioovsky A. *Int. J. of Bif. and Chaos*. **9**, 9 (1999) 1771.
3. Griffin C.J., Joshi G.C. *Chaos, Solitons & Fractals*. **2**, 1 (1992) 11.
4. Chang S.-J., Perez G. *Phys. Rev. A*. **39**, 12 (1988) 6447
5. Isaeva O.B., Kuznetsov S.P., Ponomarenko V.I. *Phys. Rev. E*. **64** (2000) 055201.



## Спин-волновой транспорт в системе с кольцевым магнонным микроволноводом

Одинцов С.А., Бегинин Е.Н., Садовников А.В.

СГУ, Саратов

Большой интерес к использованию преимуществ спиновых волн для передачи данных и вычислений на их основе, связан главным образом с энергоэффективностью данной технологии [1]. Были предложены элементы магнонной сети, основанные на структурах, которые представляют собой магнонные ответвители [2] и могут выступать в качестве устройств демультиплексирования и межсоединения с частотным пространственным разделением каналов. В настоящей работе исследован механизм управления латеральной дипольной связью спиновых волн, распространяющихся в системе полосок железо-иттриевого граната с кольцевым магнонным микрорезонатором, расположенным между ними. Показана возможность разворота волны после того как она связывается и проходит через кольцевой резонатор. С помощью микромагнитного моделирования, продемонстрирована смена режимов спин-волнового распространения сигнала при вариации как величины, так и ориентации внешнего поля подмагничивания. На рис.1 показано, что в

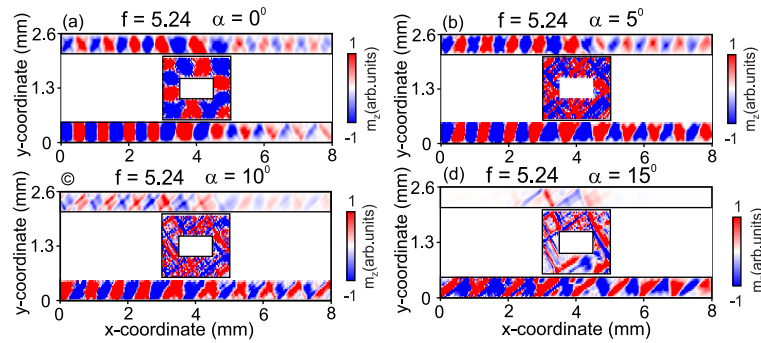


Рис. 1: (a-d) Карты распределения динамической намагниченности  $m_z$  измеренных на частоте  $f_1=5.24$  ГГц при изменении угла внешнего магнитного поля  $H_0$

латеральной системе магнитных микроволноводов с расположенным между ними кольцевым микрорезонатором оказывается возможным управлять пространственно-частотным распределением динамической намагниченности при распространении спиновой волны, возбуждаемой в одном из микроволноводов. Также показано, что изменяя частоту спиновой волны в одной из магнитных микрополосок оказывается возможным менять как направление групповой скорости, так и интенсивность спин-волнового сигнала во второй магнитной полоске.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ (No 16-19-10283), РФФИ (18-37-20005, 18-29-27026, 19-29-03034), стипендии и гранта Президента РФ (МК-3650.2018.9, СП-2819.2018.5)

1. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Grishin S. V., Beginin E. N., Sharaevskii Y. P., and Nikitov S. A. *Phys. Rev. B*, **96**, 060401(R) (2017)
2. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., and Nikitov S. A. *Phys. Rev. B*, **96**, 144428

## Влияние времени запаздывания на установление обобщенной синхронизации в системах с отклоняющимся аргументом

Плотникова А.Д., Москаленко О.И.

*СарГУ, Саратов*

Одним из наиболее интересных типов синхронного поведения связанных хаотических систем является режим обобщенной синхронизации [1]. Отличительной особенностью этого режима является возможность ее существования в связанных системах с различной размерностью фазового пространства. Это позволяет рассмотреть данный тип применительно к нетривиальным системам, которые описываются дифференциальными уравнениями с отклоняющимся аргументом. Именно введение запаздывания позволяет корректно описывать процессы в областях медицины, химии и физики.

Для исследования динамики систем с отклоняющимся аргументом используются численные методы и алгоритмы, учитывающие специфику рассматриваемых систем. Одним из таких методов является расчет спектра показателей Ляпунова. В данной работе предложен адаптированный метод расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием, позволяющий относительно быстро и эффективно рассчитать необходимое количество показателей в спектре. Алгоритм основан на рассмотрении эволюции во времени пространственного состояния изучаемой системы и его возмущений (с периодическими ортогонализациями и перенормировками) [2]. Апробация метода производилась на радиофизическом генераторе с запаздыванием [3], а также на модели кроветворения Маккея-Гласса [4]. Все остальные исследования также проводились с помощью данных моделей.

Следующим этапом был рассмотрен вопрос о закономерностях установления режима обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных системах. Была исследована зависимость порогового значения параметра связи, соответствующего установлению режима обобщенной синхронизации, от величины времени запаздывания. Результаты получены для различных комбинаций управляющих параметров, указывающих на количество положительных показателей Ляпунова в “автономных” системах. Из сопоставленных зависимостей между собой был сделан вывод о том, что пороговое значение параметра связи сначала увеличивается с ростом времени запаздывания, а затем достигает насыщения. Следует особо подчеркнуть, что для каждой комбинации параметров этот уровень насыщения оказывается различным. Также стоит отметить увеличение количества положительных показателей Ляпунова в исследуемых системах с увеличением времени запаздывания.

Аналогичные рассуждения были применены к взаимно связанным системам. Установлено, что качественно зависимость порогового значения параметра связи, соответствующего установлению режима обобщенной синхронизации, от времени запаздывания имеет схожий характер по сравнению с рассмотренным выше случаем однонаправленной связи, что позволяет предположить об общих закономерностях поведения систем с отклоняющимся аргументом в режиме обобщенной синхронизации вне зависимости от типа связи. Наконец, стоит отметить высокую работоспособность предложенного метода расчета спектра показателей Ляпунова на всех этапах исследования, что позволяет его использовать и в более сложных системах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (проект No МК-531.2018.2).

1. Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I. *Phys. Rev. E* **51**, **2** (1995) 980 - 994.
2. Кузнецов С.П. Динамический хаос. Физматлит, Москва, 2006.
3. Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. *Письма в ЖТФ* **28**, **16** (2002) 37-44.
4. M.C.Mackey, L. Glass. *Science* **197** (1977) 287 - 289.

## Хаос с нулевым показателем Ляпунова в трехмерных дискретных осцилляторах

Кузнецов А.П., Попова Е.С., Станкевич Н.В.

СФирЭ РАН, Саратов

Хаотическое поведение является одним из фундаментальных свойств нелинейных отображений [1-3]. Наиболее легко и достоверно можно диагностировать хаос с помощью старшего показателя Ляпунова, который будет положительным для хаотического режима. Хаотическая динамика может возникать в диффеоморфизмах размерности два и выше или даже в одномерных эндоморфизмах. Для отображений характерным является отсутствие нулевого показателя в спектре показателей Ляпунова, поскольку они являются дискретными. Нулевой показатель в спектре будет говорить о возможности вложения такого отображения в поток.

В рамках данной работы будет показана возможность возникновения хаотических аттракторов, спектр показателей которых содержит один положительный, один близкий к нулю и один отрицательный показатели. В качестве объектов исследования будут использоваться трехмерные дискретные осцилляторы: дискретный осциллятор Лоренца-84 и дискретный генератор квазипериодических колебаний [4-5]. В работе будут представлены карты показателей Ляпунова, на которых локализованы области с хаотической динамикой с нулевым показателем Ляпунова, показаны характерные фазовые портреты. Также представлен сценарий возникновения хаоса с близким к нулю показателем Ляпунова, после каскада бифуркаций инвариантной кривой.

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 18-32-00285.

1. Gonchenko S.V., Ovsiyannikov I.I. Simó C., Turaev D. *Int. J. Bif. Chaos* **15** (2005) 3493-3508
2. Gonchenko A., Gonchenko S., Kazakov A., Turaev D. *Int. J. Bif. Chaos* **24** (2014) 1440005
3. Gonchenko A.S., Gonchenko S.V. *Physica D* **337** (2016) 43-57
4. Kuznetsov A.P., Sedova Y.V. *Int. J. Bif. Chaos* **26** (2016) 1630019
5. Кузнецов А.П., Седова Ю.В. *Изв. вузов. ПНД* **25** (2017) 33-50

## Влияние внешнего сигнала на процессы установления колебаний в многомодовом гиротроне

Преображенская Н.В., Рыскин Н.М., Глявин М.Ю., Новожилова Ю.В.

СарГУ, Саратов

Одним из наиболее важных областей применения гиротронов является электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) [1]. В рамках международного проекта ITER разработан гиротрон мегаваттного уровня мощности с частотой 170 ГГц. В следующем проекте ДЕМО, с более высокой плотностью плазмы, предполагается использование гиротронов с более высокой рабочей частотой — 250 ГГц. При продвижении в область более высоких частот и больших мощностей особенно важной становится проблема конкуренции мод. Ситуация осложняется тем, что максимальный КПД в гиротроне, как правило, достигается в режиме жесткого возбуждения.

В работе [2] численно исследовалась динамика установления колебаний в гиротроне диапазона 250 ГГц с рабочей модой  $TE_{19,8}$ . Было обнаружено, что при наличии выбросов тока и напряжения на переднем фронте, что наблюдается в ряде экспериментов, происходило возбуждение более низкочастотной моды  $TE_{18,8}$ . В результате, после возвращения напряжения к номинальному значению, вместо генерации рабочей моды наблюдался многомодовый режим, в котором генерировались моды  $TE_{18,8}$ ,  $TE_{19,8}$ ,  $TE_{20,8}$ .

Одним из способов обеспечения одномодовой генерации является синхронизация гиротрона внешним сигналом (см., например, [3]). Поэтому представляет интерес исследование влияния внешнего сигнала на процессы конкуренции мод на фронте импульса. Моделирование проводится в рамках нестационарной теории гиротрона с фиксированной гауссовой структурой высокочастотного (ВЧ) поля. Основные уравнения приведены, например, в [3]. Значения параметров соответствуют режиму максимального поперечного электронного КПД (70%), безразмерная расстройка собственных частот  $\Delta_s = 0.33$  соответствует гиротрону, исследованному в [2].

Исследовался сценарий установления колебаний при наличии выброса напряжения. При этом циклотронная расстройка  $\Delta_H$  увеличивалась до значения 0.58, а затем возвращалась к оптимальному значению 0.53.

Моделирование показало, что при отсутствии внешнего сигнала последовательно возбуждаются моды  $TE_{20,8}$ ,  $TE_{19,8}$ , а затем устанавливается трехмодовый режим. В этом режиме поперечный КПД порядка 30%, причем максимальную амплитуду имеет низкочастотный спутник  $TE_{18,8}$ .

В случае, когда на рабочую моду действует внешний сигнал, наблюдается полное подавление паразитных мод и установление колебаний рабочей моды с поперечным КПД, близким к оптимальному (около 70%). При этом мощность внешнего сигнала достаточно мала, она не превышает 5% мощности генерации в автономном режиме.

Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований  $\epsilon$  18-02-00839.

1. Nusinovich G.S., Thumm M., Petelin M.I. *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **35**, (2014) 325-381.
2. Бакунин В.Л., Глявин М.Ю., Новожилова Ю.В., Седов А.С. *Электромагнитные волны и электронные системы* **23**, No 6 (2018) 36-45

3. Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г., Глявин М.Ю. и др. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика* **25**, No 1 (2017) 4-11

## Динамика спиновых волн в многослойной структуре YIG/FeRh

Саломатова Е.И.<sup>1</sup>, Одинцов С.А.<sup>1</sup>, Амиров А.А.<sup>2</sup>, Садовников А.В.<sup>1</sup>

1. СГУ, Саратов

2. БФУ им. И. Канта

На сегодняшний день стремительно развивается новое направление спинтроники-магноники- область квантовой электроники, занимающаяся изучением магнного переноса энергии или информации в твердотельных веществах [1]. Однако методы управления магнными модами, основанные на использовании громоздких катушек-соленоидов, нивелируют основные достоинства магноники и спинтроники — низкое энергопотребление и быстродействие. В связи с этим не прекращаются попытки реализовать в этих областях методы управления этими структурами различными внешними воздействиями, реализуя тем самым некий затвор подобный в транзисторах. Одним из таких подходов, в частности, является контроль спиновыми волнами за счет создания магнитоэлектрических структур, в которых подача напряжения на электроды приводит к деформации слоя из пьезоэлектрика, которая передается лежащим ниже полосковым линиям из магнного кристалла, изменяя за счет эффекта Виллари эффективные магнитные поля, определяющие условия распространения магнных возбуждений [2].

В настоящей работе исследован механизм и способы управления режимами генерации, динамикой распространения линейных и нелинейных спиновых волн в волноведущих структурах, созданных на основе многослойной структуры ЖИГ/FeRh.

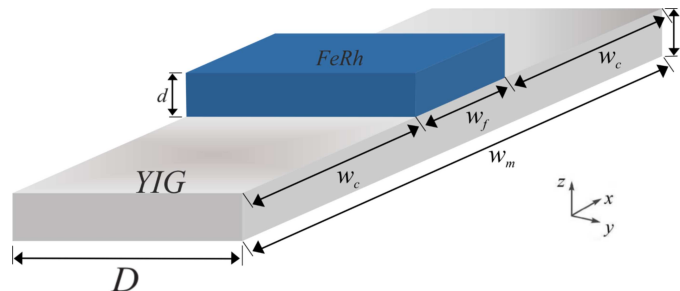


Рис. 1: Схематическое изображение исследуемой структуры

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (No 18-29-27026)

1. S. A. Nikitov et al., YMagnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics *Uspekhi Fiz. Nauk*, **185**, 10, pp. 1099–1128, 2015.
2. A. A. Bukharaev, A. K. Zvezdin, A. P. Pyatakov, and Y. K. Fetisov, “Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and material science,” *Uspekhi Fiz. Nauk*, **188**, 12, pp. 1288–1330, 2018.

## Отображение Бернулли с "дыркой" и седло-узловой сценарий рождения гиперболического аттрактора Смейла-Вильямса

Сатаев И.Р., Исаева О.Б.

СФИРЭ РАН, Саратов

Седло-узловой сценарий рождения/разрушения соленоида Смейла-Вильямса в динамической системе при вариации ее параметров предполагает ситуацию, когда вначале гиперболический хаотический аттрактор сосуществует с другим аттрактором (возможно, бесконечно удаленным), и разрушение его происходит в результате столкновения/слияния с седловым хаотическим множеством, лежащим на общей границе их бассейнов притяжения [1,2]. Если же рассматривать этот сценарий при движении по управляющему параметру с обратной стороны, то есть с той стороны, где аттрактор еще не существует, то мы будем наблюдать постепенное одновременное рождение двух хаотических множеств, которые, в конце концов, превращаются в гиперболический аттрактор и хаотическое седло. Таким образом, эта бифуркация носит затянутый характер и занимает некоторый интервал по управляющему параметру. Какие траектории возникают первыми, в какой момент практически из ничего возникает первое нетривиальное хаотическое множество траекторий, какие траектории завершают процесс формирования хаотического аттрактора  $\mathcal{C}$  на эти вопросы нужно ответить, чтобы выявить закономерности, управляющие этим порядком. Исследование полноразмерных систем затрудняется тем обстоятельством, что приходится иметь дело с сильно неустойчивыми циклами. Важную роль играют здесь простые низкоразмерные модели, которые допускают глубокую математическую проработку.

В данной работе для описания процесса возникновения соленоида Смейла-Вильямса предлагается использовать одномерное отображение Бернулли с запрещенной зоной или дыркой. Отображение это достаточно хорошо изучено, что позволяет воспользоваться результатами этих исследований для выявления особенностей седло-узлового сценария [3-5].

В таком отображении нетривиальное хаотическое множество (с ненулевой размерностью Хаусдорфа) возникает в общем случае в результате каскада бифуркаций добавления периода, характеризующегося геометрическим скейлингом как в фазовом пространстве, так и в пространстве параметров. Численный анализ поведения моделей, демонстрирующих седло-узловой сценарий рождения хаотического аттрактора, показывает, что качественно эти закономерности сохраняются при переходе к многомерным системам.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект No 17-12-01008.

1. Isaeva O.B., Kuznetsov S.P., Sataev I.R. *CHAOS* **22**(4) (2012) 043111
2. Исаева О.Б., Кузнецов С.П., Сатаев И.Р., Пиковский А. *Нелинейная динамика* **9**(2) (2013) 267
3. Glendinning P. and Sidorov N. *Ergodic Theory and Dynamical Systems*, **35**(4) (2015) 1208-1228
4. Sidorov N. *Acta Mathematica Hungarica*, **143**(2) (2014) 298-312
5. Hare K.G. Sidorov N. *Monatshefte fur Mathematik*, **175**(3) (2014) 347-365

## Грубый гиперболический хаос в системах на основе маятника Фруда

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

СФИРЭ РАН, Саратов; УдГУ, Ижевск

В работе обсуждаются две новые механические системы с гиперболическими хаотическими аттракторами Смейла-Вильямса. За основу в обеих моделях взят маятник Фруда, который известен как классический пример автоколебаний, совершаемых благодаря подвесу на вращающемся с постоянной угловой скоростью валу.

Первая система составлена из двух связанных маятников Фруда с периодическим чередующимся торможением [1]. Вторая система представляет собой маятник Фруда с добавлением запаздывающей обратной связи и периодическим торможением [2]. С помощью численных вычислений показано, что в предложенных моделях реализуется грубый гиперболический хаос. С применением анализа показателей Ляпунова в пространстве параметров выявлены области хаотической динамики, соответствующие наличию соленоида Смейла-Вильямса. Гиперболичность аттрактора подтверждена с помощью анализа углов пересечения устойчивых и неустойчивых инвариантных подпространств векторов малых возмущений и проверки отсутствия касаний между этими подпространствами [3, 4].

Благодарим за финансовую поддержку Российский научный фонд (проект 15-12-20035, построение математических моделей, проверка гиперболичности, численное исследование системы двух связанных маятников Фруда; проект 17-12-01008, численное исследование динамики одиночного маятника Фруда с запаздыванием).

1. Kruglov V.P., Kuznetsov S.P. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **67** (2019) pp.152-161.
2. Kuznetsov S.P., Sedova Yu.V. *International Journal of Bifurcation and Chaos* (2019) accepted.
3. Kuptsov P.V. *Phys. Rev. E* **85** (2012) 015203.
4. Kuptsov P.V., Kuznetsov S.P. *Phys. Rev. E* **94** (2016) 015203.

## ДЕТЕКТОРЫ СПИНОВЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ СТРУКТУР YIG/INSB И JIG/PT

Селезнев М.Е., Хивинцев Ю.В., Сахаров В.К., Никулин Ю.В., Павлов Е.С., Высоцкий С.Л., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А.

СФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН; СНИГУ имени Н. Г. Чернышевского

Детектирование спиновых волн (СВ) в структурах Yполупроводник-магнитный диэлектрик и Yпроводник-магнитный диэлектрик представляет интерес для разработки систем обработки информации на принципах магноники и спинтроники [1]. Для того чтобы преобразовать спиновый ток, ассоциируемый с распространением спиновой волны в таком магнитном материале, как пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) в электрический ток можно использовать тяжелые металлы с сильной спин-орбитальной (СО)

связью контактирующие с ЖИГ. Также для детектирования СВ может быть использован эффект генерации постоянного напряжения  $U$  распространяющейся СВ в гибридных структурах состоящих из ЖИГ и полупроводника [2]. В данной работе были изучены эффекты распространения магнитостатической спиновой волны (МССВ) и детектирования в микроструктурах YIG/n-InSb и YIG/Pt с толщиной  $d$  и с антеннами для возбуждения и детектирования МССВ, интегрированными непосредственно на поверхности ЖИГ.

Микрополоски на основе поликристаллических пленок n-InSb и Pt с шириной  $b=100$  мкм, длиной  $L=200-700$  мкм и толщиной  $d=0.5$  мкм (InSb) и  $d=10$  нм (Pt) и микрополосковые антенны были сформированы поверх эпитаксиальной пленки ЖИГ ( $d=8$  мкм) методами магнетронного напыления, термического испарения, фотолитографии и ионного травления. Измерения прохождения спиновой волны осуществлялись с использованием векторного анализатора цепей и микрозондовой станции в магнитном поле  $100 < H < 2000$  Э, приложенном в плоскости структуры вдоль антенн и соответствующему геометрии возбуждения поверхностной магнитостатической волны.

Постоянное напряжение  $U(f)$ , генерируемое на краях микрополоски InSb или Pt за счет распространения СВ волны, измерялось в режиме амплитудной модуляции (100 кГц) входной СВЧ мощности. Мы обнаружили, что InSb в наших структурах вносит дополнительные электронные потери для МССВ порядка  $k\gamma = \text{Im}^*k = 2-5$  см<sup>-1</sup>, тогда как дисперсия  $k=k(f)$  остается неизменной по сравнению со структурой без InSb.

Для МССВ мощности меньшей, чем порог процесса параметрической неустойчивости  $U(f)$  было пропорционально  $P$ :  $U(f)=G(f)*P(f)$ . Чувствительность  $G$  увеличивалась с ростом волнового числа МССВ и достигала максимальных значений при частотах соответствующих верхней границе зоны МССВ. Чувствительность для структур ЖИГ/InSb в линейном режиме достигает  $G=0.02$  В/Вт, тогда как для структур ЖИГ/Pt оказывается почти на порядок меньше. Кроме того, чувствительность резко падает как только входная мощность превышает порог трехмагنونной параметрической неустойчивости.

*Работа поддержана РФФИ, грант No 16-29-14058.*

1. Chumak A.V., et al. // Nature Physic. 2015. 11. P. 453
2. Schneider B. // Physica Status Solidi. 1974. 23. P. 187

## Особенности проектирования сверхширокополосной ( $\Delta f = 100\%$ ) ЛБВ средней мощности С–Ку диапазона

Алмаев И.А., Данилов А.Б., Золотых Д.Н., Роговин В.И., Симонова Ю.В.

*СарГУ, Саратов*

Применяемые в радиоэлектронной борьбе наибольшим спросом на сегодня пользуются сверхширокополосные ЛБВ с полосой частот 100%. Настоящая работа ставит своей целью разработку сверхширокополосной ЛБВ. Основными проблемами при их проектировании являются уменьшение перепада по выходной мощности (осуществляется использованием корректора, обеспечивающего необходимый закон изменения входной мощности) и подавление возбуждения высших временных гармонических составляющих. Возможным решением служит применение нулевой или аномальной дисперсии в замедляющей системе (ЗС). Этого удастся достигнуть благодаря использованию анизотропного экрана с продольной проводимостью. [1]



В качестве расчетных вариантов были выбраны ЗС, в которой медная трубка с пазами вставлена в экран (сплав 36-НХТЮ: никель, хром, титан, алюминий), и ЗС с диэлектрическими стержнями, зафиксированными в “U”-образных медных опорах. Из литературы известно [2], что металлические вставки в экран и металлокерамические стержни обеспечивают слабоаномальную дисперсию. Расчет электродинамических характеристик проводился с использованием программного пакета ANSYS HFSS. Конструкции ЗС с медными вставками в экран и металлокерамическими стержнями обуславливают наклон дисперсионной кривой в  $1,9^\circ$  и  $4,7^\circ$  соответственно. Введение двойного скачка шага в конце пространства взаимодействия позволяет изменить фазу поля второй гармоники относительно гармоник тока и, тем самым, добиться приемлемого уровня второй гармоники сигнала на выходе ЛБВ (случай ЗС с металлическими вставками в экран). Конструкция ЗС с металлокерамическими стержнями обеспечивает как нормальную, так и аномальную дисперсию в зависимости от величины зазора между металлической частью опоры и внешним диаметром спирали.

В результате проделанной работы получено оптимальное ПВ для реализации сверхширокополосной ЛБВ с минимальным перепадом выходной мощности. Экспериментальные измерения подтвердили эффективность использования описанных выше ЗС для 100% широкополосной ЛБВ. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало приемлемую для практики точность.

1. Сверхширокополосные лампы бегущей волны. Исследования в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах. Внедрение в производство. Под редакцией Н.А. Бушуева. М.: Радиотехника, 2015.
2. Улучшение эксплуатационных характеристик широкополосных фазоидентичных ламп с бегущей волной и комплексированных усилителей на их основе. Рафалович. А.Д. 2014.

## Микромагнитное моделирование спин-волнового Фано-резонанса в нерегулярной волноводной структуре

Фильченков И.О., Одинцов С.А., Садовников А.В.

*СГУ, Саратов*

Магنونный волновод, сформированный из магнитной пленки, является основным блоком любой сложной интегральной магنونной сети, [1] действующей в качестве линии передачи между устройствами обработки сигналов. [2]. Наиболее перспективными элементами для эффективной передачи спин-волнового сигнала между функциональными единицами магنونной сети являются пространственно-неоднородные магнитные структуры. [3] В данной работе исследовалась возможность использования эффекта, основанного на резонансе типа Фано, возникающем при взаимодействии распространяющихся спиновых волн в нерегулярных структурах с модами резонатора, изготовленного в латеральной геометрии (рис. 1). В работе рассмотрены структур без дополнительного резонатора и с резонатором, расположенным между двумя нерегулярными микроволноводами спиновых волн с линейно изменяющейся шириной.

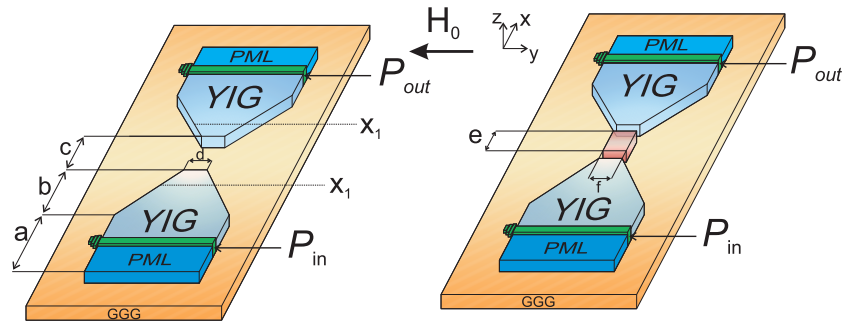


Рис. 1: Схема исследуемой структуры

Система связанных неоднородных магнитных структур может демонстрировать резонансы типа Фано, которые могут возникать при рассмотрении связи распространяющейся моды спиновой волны с собственной модой магнитной структуры между двумя неоднородными волноводами, в рассматриваемом случае. В этом случае спектры пропускания сигнала спиновой волны, который возбуждается на одном краю S1 и затем детектируется на волноводе S2, могут контролироваться параметрами геометрии квадратного микро-резонатора, интенсивностью спиновой волны и изменением угла намагниченности всей системы.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (No16-19-10283), стипендии и гранта Президента РФ (МК-3650.2018.9, СП-2819.2018.5)

1. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. *Journal of Physics D: Applied Physics* **43**, 264001. (2010)
2. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Grishin S. V., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Sharaevskii Y. P., and Nikitov S. A. *Applied Physics Letters* **106**, 192406 (2015)
3. Demidov V.E., Urazhdin S., Zholud A., Sadovnikov A.V., and Demokritov S.O. *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 022403 (2015)

## Переменяемость упорядоченной и разупорядоченной фаз в стохастической пространственно распределенной системе. Зарождение беспорядка.

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

СамГУ, Самара

В работе проводится численное исследование динамики плотности вероятности и статистических характеристик в приближении среднего поля в модели “стохастический бруселятор”, благодаря которому можно наблюдать зарождение беспорядка в системе при включении в неч внешнего шума. Система исследуется при параметрах, соответствующих области бифуркации Тьюринга.

Для численного исследования эволюции плотности вероятности, используя подход, подробно изложенный в работе [1], получено нелинейное самосогласованное уравнение Фоккера-Планка для рассматриваемой системы. Численный эксперимент проводился для

двух типов шумов: аддитивного и мультипликативного. Получено, что в зависимости от значений параметров и интенсивности шума типы решений существенно отличаются друг от друга как в случае мультипликативного, так и в случае аддитивного шума. Типы решений идентичны для обоих типов шумов, однако в случае аддитивного шума интенсивность шума должна быть существенно выше, чем для мультипликативного. Когда параметры системы близки к параметрам, соответствующим области бифуркации Тьюринга, а интенсивности шума достаточно малы, наблюдается одномодальное распределение плотности вероятности, то есть система находится в упорядоченном состоянии. Некоторое увеличение интенсивности шума и значений параметров приводит к появлению временной бимодальности, когда одномодальное распределение на некоторое время сменяется бимодальным, то есть появляется разупорядоченное состояние, после чего система возвращается к порядку. Таким образом, наблюдается временная перемежаемость упорядоченной и разупорядоченной фаз. Дальнейшее увеличение интенсивности и удаление от точки бифуркации переводит систему от порядка к беспорядку.

1. Kurushina S.E., Shapovalova E.A. *J. Stat. Phys.* **176** (2019) pp 69-84

## **Классификация хаотических аттракторов в связанных квазипериодических генераторах**

**Кузнецов А.П., Станкевич Н.В., Щеголева Н.А.**

*СФирЭ РАН, Саратов*

Хаотическая динамика является типичным атрибутом нелинейных динамических систем в различных областях науки и техники, включая радиофизику [1]. Наиболее распространенным индикатором хаотической динамики является старший показатель Ляпунова [2]. Положительный старший показатель Ляпунова указывает на наличие в фазовом пространстве системы неустойчивого направления, что приводит к возникновению хаоса. Для диагностики хаотической динамики достаточно определить старший показатель Ляпунова, хотя на самом деле динамическая система характеризуется спектром показателей Ляпунова, в котором количество показателей соответствует размерности динамической системы. Полный спектр показателей Ляпунова дает возможность диагностики многочастотных квазипериодических колебаний, классификации хаотических аттракторов. Так, например, был выделен в отдельный класс гиперхаос, который соответствует динамическому поведению, характеризующимся двумя и более положительными показателями Ляпунова. Помимо гиперхаоса можно выделить в отдельный класс хаотические колебания, содержащие дополнительные нулевые показатели Ляпунова. Такие хаотические аттракторы возникают при разрушении торов высокой размерности и характерны для взаимодействующих систем с квазипериодическим поведением [3-4].

В рамках настоящей работы мы рассмотрим детально различные хаотические аттракторы, возникающие при взаимодействии двух связанных генераторов квазипериодических колебаний. Будут рассмотрены следующие типы хаотических аттракторов в соответствии с их сигнатурой спектра показателей Ляпунова: (i) хаос с одним положительным, одним нулевым и остальными отрицательными показателями Ляпунова; (ii) гиперхаос с двумя

положительными, одним нулевым и остальными отрицательными показателями Ляпунова; (iii) хаос с одним положительным, двумя нулевыми и остальными отрицательными показателями Ляпунова. Будут показаны области в пространстве параметров, где наблюдаются различные типа хаотических аттракторов, исследованы их фазовые портреты, сечения Пуанкаре, спектры Фурье.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 18-32-00285.

1. Strogatz S.H. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Westview press, 2014.
2. Pikovsky A., Politi A. *Lyapunov exponents: a tool to explore complex dynamics*. Cambridge University Press, 2016.
3. Stankevich N.V., Astakhov O.V., Kuznetsov A.P., Seleznev E.P. *Tech.Phys.Lett.* **44** (2018) 428-431
4. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Shchegoleva N.A., Stankevich N.V. *Phys.D* **398** (2019) 1-12

## Исследование взаимодействия подсистем вегетативной регуляции сердечного ритма и сосудистого тонуса при выполнении функциональных проб

Навроцкая Е.В.<sup>1,2</sup>, Мартынов А.Д.<sup>2</sup>, Сафаров Е.Г.<sup>2</sup>, Поварова Т.В.<sup>3</sup>

1. СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН; 2. СаГУ им. Н. Г. Чернышевского; 3. ЧУЗ “Клиническая больница “РЖД-Медицина” города Саратов”

Ряд недавних работ посвящен [1-4] изучению взаимодействия между медленными ритмами (на частоте около 0.1 Гц) вегетативной регуляции частоты сердечных сокращений и артериального давления. В работах [1-4] показано, что в норме у людей степень синхронности этих подсистем, определяемая по фазам, выделенным из сигналов кардиоинтервалограммы (КИГ) и фотоплетизмограммы (ФПП), выше чем, при патологиях сердечнососудистой системы (таких, как артериальная гипертензия, инфаркт миокарда). Однако, на сегодняшний день малоизученным остается вопрос связанности упомянутых подсистем регуляции кровообращения у здоровых людей при разных физических нагрузках, при этом оценка показателя интенсивности взаимодействия ритмов регуляции при нагрузке может отражать состояние системы кровообращения у испытуемого. В данной работе проводилось исследование взаимодействия ритмов симпатической регуляции частоты сердечных сокращений и тонуса сосудов у здоровых испытуемых при выполнении стандартных функциональных проб, используемых в современных медицинских центрах для оценки состояния сердечнососудистой системы (ССС) человека. В работе было рассмотрено две функциональные пробы - стандартная проба с 20 приседаниями в течение 30 секунд и гарвардский степ тест. Гарвардский степ-тест выполнялся в упрощенном варианте - добровольцы совершали 50 восхождений на ступеньку высотой 45 см в течение комфортного для них времени.

Исследование проводилось путем анализа сигналов КИГ и ФПП, полученных от здоровых добровольцев (мужчины в возрасте 18-22 года без патологии ССС) до и после

выполнения пробы. Запись сигналов проводилась с помощью Электроэнцефалографо-регистратора “Энцефалан-ЭЭГР-19/26” с возможностью подключения 6 поликаналов. В процессе наблюдения регистрировались сигналы - одноканальной ЭКГ во II стандартном отведении ФПГ с мочки правого уха (ФПГ уха) и ФПГ с безымянного пальца правой руки (ФПГ рука). В результате 60 минутного мониторинга получали записи до и после выполнения функциональной пробы (30 минут до и 30 минут после). Для контроля воспроизводимости результатов эксперимент для одних и тех же испытуемых повторялся три раза в разные дни.

ЭКГ пересчитывалась в ряд RR-интервалов - КИГ, которая использовалась в качестве сигнала вариабельности сердечного ритма. ФПГ использовалась как сигнал, характеризующий изменения сосудистого тонуса. Для анализа связанности процессов симпатической регуляции вариабельности сердечного ритма и тонуса сосудов из сигналов КИГ и ФПГ выделялись низкочастотные составляющие. Для этого сигналы фильтровались в полосе частот 0.05 - 0.15 Гц, соответствующей характерным ритмам симпатической нервной системы.

Для оценки связанности использовались методы, основанные на введении и анализе фазы колебаний. Фаза сигналов вводилась с помощью преобразования Гильберта. Уровень синхронизации изучаемых процессов оценивался с помощью коэффициента фазовой когерентности [5]. Для оценки интенсивности и направленности воздействия использовался метод, основанный на построении модели фазы сигналов [6,7]. По временным рядам фаз сигналов получают оценки коэффициентов модели. На основе коэффициентов модели рассчитывают индексы наличия и направления связи. Значимость индексов связи оценивалась как с помощью аналитического подхода, основанного на оценках дисперсии коэффициентов модели [7], так и с помощью суррогатных данных [8].

В результате анализа 30-минутных записей сигналов было показано, что значение коэффициента фазовой когерентности между КИГ и ФПГ рука изменяется после выполнения обеих функциональных пробы, а между КИГ и ФПГ ухо мало изменяется. Индексы направленного воздействия между КИГ и ФПГ рука для некоторых испытуемых после физической нагрузки увеличивается. Анализ сигналов в скользящем окне шириной 5 минут показал, что сразу после выполнения пробы рассчитываемые индексы связи увеличиваются, к концу мониторинга значение индексов связи приближается к соответствующему значению, полученному до выполнения физической нагрузки.

Установленная особенность взаимодействия ритмов вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы человека при выполнении тестовых физических нагрузок может служить основой для дальнейшей разработки диагностических показателей состояний системы кровообращения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект No 17-02-00307)

1. Karavaev A.S. et al. // CHAOS, 2009. 19:033112.
2. Ponomarenko V.I. et al. // The Eur Phys J, 2013. 222:2687-2696.
3. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С. и др. // Артериальная гипертензия. 2011. Т. 17. No. 4. -С. 354-360.
4. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Посненкова О.М. и др. // Терапевтический архив, 2007, Т.79, N.4, С.23-31.
5. Mormann F. et al. // Physica D.-2007.-V.225.-P.29.
6. Rosenblum M.G., Pikovsky A.S. // Phys. Rev. E, 2001.
7. Smirnov D.A., Bezruchko B.P. // Phys. Rev. E, 2003.
8. J.Theiler, S. Eubank, A. Longtin, B. Galdrikian, J.Doyne // Physica D: Nonlinear Phenomena. V. 58. 1992. P.77-94.

## Динамика системы “гофрированный волновод” с осциллирующей границей

Любченко Д.О., Савин А.В.

СарГУ, Саратов

Изучение динамики неинтегрируемых гамильтоновых систем является активно развивающимся направлением теории динамических систем. Обычно изучение таких систем проводят с помощью отображения Пуанкаре. Отображения достаточно легко изучать, и с их помощью можно наблюдать широкий спектр явлений, присущих нелинейным системам. Одним из типов систем, которые естественным образом описываются с помощью отображений, являются механические системы с ударами. Одну из таких моделей рассматривал Э. Ферми для объяснения происхождения быстрых частиц в космических лучах [1]. Ряд интересных результатов получен также для моделей бильярда с осциллирующими стенками [2].

В данной работе рассматривалась предложенная в [3] система с модификацией  $\Pi$  осцилляциями одной из стенок. Математическая запись колебаний верхней стенки имеет следующий вид:

$$F(x, t) = b \cos kx + a \cos \omega t + h \quad (1)$$

Для изучения динамики такой системы было получено четырехмерное отображение в случае слабой гофрировки и малой амплитуды колебаний стенки. С помощью замены переменных отображение можно свести к трехпараметрической системе:

$$\begin{cases} \Omega_{n+1} = \sqrt{\Omega_{n+1x}^2 + \Omega_{n+1y}^2} \\ \alpha_{n+1} = \arctan \left[ -\frac{\Omega_{n+1x}}{\Omega_{n+1y}} \right] \\ \varphi_{n+1} = \varphi_n - A \frac{\Omega_{n+1x}}{\Omega_{n+1y}} \\ \psi_{n+1} = \psi_n - \frac{1}{\Omega_{n+1y}} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Omega_{n+1x} = -\Omega_n \cos(\alpha_n + 2\gamma) + 2u$ ;  $\Omega_{n+1y} = \Omega_n \sin(\alpha_n + 2\gamma) - 2\gamma u$ ;  $\gamma = -C \sin \varphi_n$ ;  $\gamma = -B \sin \psi_n$ ;  $\Omega_n$  — безразмерная скорость;  $\varphi_n$  — безразмерная координата;  $\psi_n$  — безразмерное время;  $\alpha_n$  — угол между вертекалью, проведенной к точки соударения, и вектором скорости;  $A$  — безразмерное расстояние между стенками;  $B$  — безразмерная амплитуда колебаний стенки;  $C$  — безразмерная амплитуда гофрировки стенки.

При отсутствии колебаний гофрированной стенки фазовыми траекториями являются двухчастотные торы. Если задать малое колебание данной стенке, то двухчастотные торы станут трехчастотными, а некоторые траектории, которые были регулярными, становятся хаотичными. При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний начинается диффузия в разные области фазового пространства, из-за чего наблюдается почти равномерное хаотическое море. Можно заметить, что траектории могут иметь достаточно большую скорость.

1. Fermi E. On the origin of the cosmic radiation Phys. Rev. 1949. Vol. 75. P. 1169.
2. Лоскутов А.Ю. Динамический хаос. Системы классической механики. // Успехи физических наук, 2007, т.177, №9, 27 с.
3. А. Лихтенберг, М. Либерман “Регулярная и стохастическая динамика”. М.:Мир, 1984, 529 с.

## Типы сложной динамики трехмерных вихревых структур в движущихся доменных границах в магнитных пленках

Изможеров И.М.<sup>1,2</sup>, Байкенов Е.Ж.<sup>1</sup>, Зверев В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург

<sup>2</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

В тонких магнитных-одноосных пленках, имеющих ось легкого намагничивания (ОЛН)  $\mathbf{n}$ , лежащую в плоскости пленки, доменные границы (ДГ) разделяют домены, в которых намагниченность имеет направления  $\mathbf{m} \uparrow \uparrow \mathbf{n}$  и  $\mathbf{m} \uparrow \downarrow \mathbf{n}$ . При наложении постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}_0 \uparrow \uparrow \mathbf{n}$  возникает движение ДГ. Рост домена с намагниченностью, параллельной  $\mathbf{H}_0$ , происходящий за счет уменьшения домена с намагниченностью, имеющей противоположное направление, обеспечивает приток энергии, которая теряется магнитной подсистемой вследствие диссипации. Таким образом, намагниченность пленки, содержащей бегущую ДГ, является открытой системой потокового типа [1,2]. Численное моделирование, выполненное с помощью пакета *mutax*<sup>3</sup> [3], показывает, что при различных значениях магнитного поля  $H_0$  в пленках различной толщины могут наблюдаться сложные процессы динамических перестроек внутренней структуры ДГ, связанных с возникновением вихревых структур и сингулярных (блоховских) точек (СТ).

Нами исследованы особенности внутренней динамики ДГ при различных значениях параметров в пленках из пермаллоя. В пленках с толщинами  $d = 12.5 - 100$  nm (с шагом 12.5 nm) рассмотрена динамика в поле  $H_0 = 100$  Oe при температурах  $T = 0$  K и 300 K. Также в пленке толщиной  $d = 100$  nm при  $H_0 = 100$  Oe рассмотрена динамика при температурах  $T = 0, 3, 6, 12, 25, 50, 100, 150, 300$  K; в пленке той же толщины при  $T = 0$  K и 300 K рассмотрена динамика в полях  $H_0 = 40, 60, 80, 100$  Oe.

Проведенные исследования показали, что как при наличии, так и при отсутствии термических флуктуаций, “быстрые” процессы (то есть процессы рождение, аннигиляция, трансформации вихрей и СТ) протекают однотипным образом и в этом смысле не чувствительны к флуктуациям. В процессе движения ДГ реализуются одни и те же локальные “сценарии”, характеризующие динамику на небольших промежутках времени (типичные последовательности рождений и исчезновений пар вихрь-антивихрь, одиночных СТ и пар СТ). В то же время общая картина движения, определяемая моментами наступления и порядком следования “событий” топологических перестроек, в достаточно толстых пленках ( $d > 50$  nm) может существенно изменяться под воздействием случайных возмущающих факторов. Также, в пленках с толщинами  $d > 50$  nm, при движении ДГ чаще рождаются СТ, при том что их суммарное время жизни растет с ростом толщины. Это позволяет предположить, что именно СТ отвечают за неустойчивость движения и рост чувствительности к воздействию случайных факторов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (тема “Сплавы”), при финансовой поддержке согласно постановлению No 211 Правительства РФ, контракт No 02.A03.21.0006.*

1. Зверев В.В., Изможеров И.М., Филиппов Б.Н. *ФТТ* **60** (2018) 294-306
2. Зверев В.В., Байкенов Е.Ж., Изможеров И.М. *ФТТ* **61** (2019) 2070-2083
3. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. *AIP Advances* **4** (2014) 107133

## Синхронизация в ансамблях систем с ФАПЧ в присутствии шума

Балакин М.И., Блохина Е.В., Коськин Е.В., Рыскин Н.М.

СГТУ, Саратов

В настоящей работе рассмотрена синхронизация ансамбля цифровых ФАПЧ в присутствии шума в осцилляторе. Разработана и исследована модель такой системы в виде цепочки фазовых осцилляторов. Каждый генератор взаимодействует только с ближайшими соседями. Проведено исследование синхронизации для различных топологий связи и диапазонов значений управляющих параметров. Показана возможность синхронизации одиночного генератора опорным сигналом при наличии белого шума. Уровень сигнала ошибки существенным образом зависит от величины пропорционального коэффициента усиления.

Проанализированы особенности синхронизации в цепочке из десяти генераторов с одним опорным сигналом при вариации топологии связи и значений управляющих параметров. Показано, что применение двусторонней топологии связи позволяет ограничить рост пропорциональной ошибки синхронизации при удалении от опорного сигнала и снизить уровень фазового шума в нижней части спектра.

1. F. Dörfler and F. Bullo *SIAM Journal on Control and Optimization* **50** (2012) pp. 1616Ц1642
2. S. V. Dhople, B. B. Johnson, F. Dörfler, and A. O. Hamadeh *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* **61** (2014) pp. 2677Ц2690
3. A. Pollakis, L. Wetzels, D. J. Jörg, W. Rave, G. Fettweis, and F. Jölicher *New Journal of Physics* **16** (2014) pp. 113009

## Анализ связанности фаз низкочастотных ритмов нервной регуляции системы кровообращения у здоровых испытуемых при выполнении функциональных проб

Мартынов А.Д.<sup>1</sup>, Сафаров Е.Г.<sup>1</sup>, Навроцкая Е.В.<sup>1,2</sup>, Безручко Б.П.<sup>1,2</sup>

1. Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; 2. Саратовский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

В настоящее время актуальной является задача исследования процессов нервной регуляции системы кровообращения [1-4] и методы теории колебаний и нелинейной динамики оказываются полезными в этом направлении. Так, в работах [1-4] с помощью подходов оценки фазовой синхронизации по временным рядам показано, что в норме у людей степень синхронности ритмов нервной регуляции вариабельности сердечного ритма и тонуса сосудов, определяемая по фазам сигналов кардиоинтервалограммы (КИГ) и фотоплетизмограммы (ФПГ), выше чем, при патологиях сердечнососудистой системы (таких, как артериальная гипертензия, инфаркт миокарда). На сегодняшний день малоизученным остается вопрос связанности указанных ритмов регуляции кровообращения у здоровых людей при выполнении физической нагрузки. Оценка показателя степени связанности ритмов



регуляции при нагрузке может отражать состояние сердечно-сосудистой системы (ССС) испытуемого. В данной работе проводилось исследование взаимодействия ритмов вегетативной регуляции частоты сердечных сокращений и тонуса сосудов у здоровых испытуемых при выполнении стандартных функциональных проб, используемых в современных медицинских центрах для оценки состояния ССС человека. В работе было рассмотрено две функциональные пробы - стандартная проба с 20 приседаниями в течение 30 секунд и гарвардский степ тест. Гарвардский степ-тест выполнялся в упрощенном варианте - добровольцы совершали 50 восхождений на ступеньку высотой 45 см в течение комфортного для них времени.

Оценка связанности проводилась путем анализа сигналов КИГ и ФПГ, полученных от здоровых добровольцев (мужчины в возрасте 18-22 года без патологии ССС) до и после выполнения пробы.

Для анализа связанности сигналов КИГ и ФПГ использовались методы, основанные на введении и анализе фазы колебаний. Уровень синхронизации изучаемых процессов оценивался с помощью коэффициента фазовой когерентности [5]. Для оценки интенсивности и направленности воздействия использовался метод, основанный на построении модели фазы сигналов [6,7]. Для анализа связанности процессов симпатической регуляции вариабельности сердечного ритма и тонуса сосудов из сигналов КИГ и ФПГ выделялись низкочастотные составляющие. Для этого сигналы фильтровались в полосе частот 0.05 - 0.15 Гц, соответствующей характерным ритмам симпатической нервной системы. Фаза сигналов КИГ и ФПГ вводилась с помощью преобразования Гильберта.

В результате анализа фаз 30-минутных записей сигналов было показано, что значение коэффициента фазовой когерентности между КИГ и ФПГ мало изменяется. Индексы направленного воздействия между КИГ и ФПГ для некоторых испытуемых после физической нагрузки увеличиваются. Анализ сигналов в скользящем окне шириной 8 минут показал, что сразу после выполнения пробы, рассчитываемые индексы связи и коэффициента фазовой когерентности увеличиваются, к концу мониторинга значение индексов связи приближается к соответствующему значению, полученному до выполнения физической нагрузки.

Установленная особенность взаимодействия ритмов вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы человека при выполнении тестовых физических нагрузок может служить основой для дальнейшей разработки диагностических показателей состояний системы кровообращения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект No 17-02-00307)

1. Karavaev A.S. et al. // CHAOS, 2009. 19:033112.
2. Ponomarenko V.I. et al. // The Eur Phys J, 2013. 222:2687-2696.
3. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С. и др. // Артериальная гипертензия. 2011. Т. 17. №. 4. -С. 354-360.
4. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Посненкова О.М. и др. // Терапевтический архив, 2007, Т.79, N.4, С.23-31.
5. Mormann F. et al. // Physica D.-2007.-V.225.-P.29.
6. Rosenblum M.G., Pikovsky A.S. // Phys. Rev. E, 2001.
7. Smirnov D.A., Bezruchko B.P. // Phys. Rev. E, 2003.
8. J.Theiler, S. Eubank, A. Longtin, B. Galdrikian, J.Doyne // Physica D: Nonlinear Phenomena. V. 58. 1992. P.77-94.

## Иллюстрации скорости диффузии в фазовом пространстве стандартного отображения

Дворцов А.А., Савин А.В.

СарГУ, Саратов

Актуальность изучения хаотической динамики в стандартном отображении определяется относительной простотой данной модели, а также широтой области ее применения. Стандартное отображение задается системой (1).

$$\begin{cases} p_{n+1} = p_n - \frac{K}{2\pi} \sin 2\pi x_n \\ x_{n+1} = x_n + p_{n+1} \quad \text{mod } 1 \end{cases}$$

Одна из возможных физических ситуаций, для которой могут быть получены данные уравнения, – ротатор под периодическим импульсным внешним воздействием. В ней за интенсивность этих ударов отвечает переменная  $K$ .

Хорошо известно, что при значениях параметра  $K$  больше критического  $K^* \approx 0.97$  в данной системе наблюдается хаотическая динамика. В этом случае КАМ-торы разрушены и координата  $p$  точки фазового пространства может изменяться значительно.

Для более тщательного исследования интенсивности хаоса в разных областях фазового портрета изучается скорость диффузии, то есть скорость кубегания (количество шагов, необходимых для изменения  $p$  на единицу) фазовых траекторий.

В настоящей работе построены фазовые портреты и соответствующие им карты диффузии стандартного отображения. В каждом пикселе на рисунке взято по 100 точек, для всех посчитаны количества итераций отображения достаточных для изменения координаты  $p$  на 1, а затем проведено усреднение.

Скорость убегания увеличивается с увеличением  $K$ . Также сравнивая карты диффузии и фазовые портреты, можно заметить, что области с наименьшими скоростями убегания траекторий соответствуют окрестностям эллиптических неподвижных точек в фазовом пространстве. При увеличении параметра  $K$  вследствие уменьшения области, занимаемой островками устойчивости, убегающие траектории захватывают почти весь фазовый портрет.

Область с наибольшими скоростями диффузии будет соответствовать окрестности гиперболической неподвижной точки при меньших  $K$ .

1. Заславский Г. М., Физика хаоса в гамильтоновых системах. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
2. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З., Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса. Москва: Наука, 1988

## Исследование влияния функциональной дыхательной пробы на структуру взаимодействия низкочастотных ритмов ЭЭГ и контуров вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы здоровых испытуемых

Храмков А.Н.<sup>1</sup>, Мартынов А.Д.<sup>1</sup>, Ежов Д.М.<sup>1</sup>, Навроцкая Е.В.<sup>1,2</sup>, Поварова Т.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>СарГУ им. Н. Г. Чернышевского; <sup>2</sup>СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН; <sup>3</sup>ЧУЗ “Клиническая больница “РЖД-Медицина” города Саратов”

Ряд недавних работ посвящен исследованию связанности низкочастотных ритмов сердечнососудистой системы и медленных ритмов ЭЭГ как у здоровых испытуемых, так и при различных патологиях [1]. В данной работе рассматривалась задача выявления дополнительных характеристик связанности контуров симпатической регуляции сердечнососудистой системы и медленных ритмов ЭЭГ.

В ходе эксперимента проводилась запись 11 отведений ЭЭГ, электрокардиограм (ЭКГ) и фотоплетизмограм (ФПГ) со здоровых добровольцев. Длительность записи составляла около 60 минут (по 30 минут до и после выполнения пробы). По сигналам ЭКГ оценивалась вариабельность сердечного ритма, для этого ряды ЭКГ пересчитывались в кардиоинтерваллограммы (КИГ). Сигнал ФПГ использовался для оценки изменения сосудистого тонуса. Для анализа использовались низкочастотные составляющие сигналов КИГ, ФПГ и ЭЭГ, выделяемые с помощью полосового фильтра в полосе частот соответствующей симпатической регуляции. Для поиска связей между сигналами использовались методы, основанные на введении и анализе фазы колебаний. Фаза сигналов вводилась с помощью преобразования Гильберта. Уровень синхронизации изучаемых процессов оценивался с помощью коэффициента фазовой когерентности [3]. Для оценки интенсивности и направленности воздействия использовался метод, основанный на моделировании фазовой динамики [3,4].

Были получены оценки коэффициента фазовой когерентности, индексов наличия и направления связи между медленными ритмами 11 отведений ЭЭГ и ритмами нервной регуляции вариабельности сердечного ритма и сосудистого тонуса до и после выполнения пробы. Показано, что структура связей между низкочастотными ритмами ЭЭГ и КИГ после выполнения дыхательной пробы изменяется, диагностируется большее количество связей. Структура связей между медленными ритмами ЭЭГ и ФПГ отличается от соответствующей структуры связей между ЭЭГ и КИГ. Выявление признаков связанности симпатической регуляции кровообращения и ритмов ЭЭГ открывает новые возможности в разработке методов диагностики состояния сердечнососудистой системы человека.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект No 17-02-00307)*

1. B.Musizza, A. Stefanovska, P.V.E. McClintock et al. // J Physiol 580.1. 2007. 3. 315-326.
2. Mormann F. et al. // Physica D. -2007. -V. 225. -P. 29.
3. M.G. Rosenblum, A.S. Pikovsky //Phys. Rev. E. 2001. V. 64. P. 045202.
4. D. Smirnov, B. Bezruchko // Phys. Rev. E 2003. V.68. P. 046209.

## Применение метода оценки связности основанного на моделировании фазовой динамики для анализа взаимодействия ритмов ЭЭГ пациентов с пониженным уровнем сознания, страдающих эпилепсией

Храмков А.Н.<sup>1</sup>, Навроцкая Е.В.<sup>1,2</sup>, Синкин М.В.<sup>3</sup>, Безручко Б.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СарГУ им. Н. Г. Чернышевского; <sup>2</sup>СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН; <sup>3</sup>ЧУЗ “Клиническая больница “РЖД-Медицина” города Саратов”

В данной работе рассматривается задача изучения связанности различных отделов головного мозга у пациентов, страдающих эпилепсией, находящихся в состоянии комы. Анализ связанности проводится по записям электроэнцефалограммы (ЭЭГ) больных. Для выявления особенностей взаимодействия ритмов ЭЭГ используется метод, основанный на экспериментальном моделировании фазовой динамики [1], позволяющий получить оценки интенсивности и направления связи между двумя колебательными системами.

Применимость данного подхода ранее была показана на эталонных системах с различными свойствами динамики [2] и при решении реальных задач в медицине [3]. Важнейшим вопросом при использовании данного метода является вопрос о пределах его применимости и возможных ошибках. В данной работе проводилось исследование его эффективности при анализе временных рядов от тестовых систем, свойства фаз которых схожи с оценками свойств фазовой динамики сигналов ЭЭГ от пациентов, находящихся в состоянии комы, страдающих эпилепсией.

Для исследования свойств фаз сигналов ЭЭГ использовались экспериментальные данные, полученные на базе НИИ Скорой Помощи им. Н.В. Склифосовского. Данные представляют собой многочасовые записи 8 отведений ЭЭГ по стандартной схеме наложения электродов 10/20 (регистрировались отведения FP1, FP2, T3, T4, C3, C4, O1, O2) от пациентов в состоянии комы. На протяжении нескольких часов, пока велась запись сигналов, у пациентов наблюдалось несколько эпилептических приступов. Для анализа свойств ЭЭГ рассматривались отдельно участки сигналов, соответствующие приступам и фону.

В результате было показано, что для тестовых систем рассматриваемый метод выявления связи, основанный на моделировании фазовой динамики, дает большой процент ошибочных выводов как о наличии, так и о направлении связи. Был подобран способ предварительной фильтрации сигналов и параметры метода, обеспечивающие процент ошибок не более 0.05. Анализ сигналов ЭЭГ пациентов с использованием подобранного способа фильтрации и параметров метода позволил получить оценку структуры связей ритмов ЭЭГ как во время приступа, так и во время фона. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант номер 18-29-02035 мк)*

1. D. Smirnov, B. Bezruchko // Phys. Rev. E 68. 2003. P. 046209
2. Е.В. Сидак, Д.А. Смирнов, Г.В. Осипов, Б.П. Безручко // Письма в ЖТФ. 2016. Т.42. В.6. С.20-26.
3. T.Stankovski, V.Ticcinelli, P.V. E. McClintock, A. Stefanovska // Frontiers in Systems Neuroscience V.11, e 33

## Хаос в активных твердотельных системах

Савельев С.В., Морозова Л.А.

ФФирЭ, Фрязино

Теоретически рассчитан и экспериментально реализован генератор хаотических колебаний с выделенной инерционностью в микроволновом диапазоне длин волн на мощном биполярном транзисторе. Особенностью генератора является наличие инерционного однопериодного преобразования выходного сигнала генератора и модулирование этим сигналом напряжения питания эмиттерной цепи транзистора. Уравнения, описывающие процессы электромагнитных колебаний в таком генераторе имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= Y + (m_1 - m_2)X - XZ, X \leq q, \\ \frac{\partial X}{\partial t} &= Y - m_2X - qZ, X > q, \\ \frac{\partial Y}{\partial t} &= -X, \\ \frac{\partial Z}{\partial t} &= -gZ + gF(2X - m_2W)(2X - m_2W)^2, \\ \frac{\partial W}{\partial t} &= X - m_2W, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $W$  безразмерные напряжения на входе нелинейного усилителя, ток в цепи обратной связи генератора, напряжение на выходе инерционного преобразователя, ток во входном контуре нелинейного усилителя,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $g$ ,  $q$  - параметры возбуждения, диссипации, инерционности, ограничения соответственно. В [1, 2] установлено, что система переходит в режим развитого хаоса при значении параметра инерционности:

$$g \leq 0.06 \quad (2)$$

Таким образом, необходимым условием генерации хаоса в системе регенеративного усилительного каскада является введение цепи однопериодного инерционного преобразования выходного сигнала активного элемента при выполнении условия (2) и модуляции этим сигналом напряжения питания транзистора. Макет генераторов хаоса был собран на транзисторе 2Т982А-2 по микрополосковой технологии на материале ФЛАН 10 толщиной 1 мм. Экспериментальный макет генератора шумовых колебаний при работе транзистора в штатном режиме имел выходной хаотический сигнал и перекрывал диапазон частот 4,3 - 4,8 ГГц. Интегральная мощность сигнала составляла 550 мВт. Усредненная спектральная плотность генерируемых шумовых колебаний составляла  $1,1 \cdot 10^{-3}$  Вт/МГц. КПД генератора 15%.

Данная методика создания генераторов хаотических колебаний может быть применена для разработки систем с хаосом на базе широкого спектра активных элементов и устройств с зависимостью крутизны динамической характеристики от напряжений питания.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием.

2. Савельев С. В. *Журнал радиоэлектроники* 6 (2017) 1-14.

## Динамика системы из двух простейших автогенераторов с релейными запаздывающими обратными связями

Кащенко С.А.

ЯрГУ, Ярославль

Численными и аналитическими методами исследована динамика системы из двух связанных автогенераторов первого порядка с релейной запаздывающей обратной связью:

$$\begin{aligned} \dot{x} + x &= f(x(t-T)) + d_1(y-x), \\ \dot{y} + y &= f(y(t-T)) + d_2(x-y). \end{aligned}$$

Здесь  $d_1, d_2 > 0$ , а  $f(s)$  – функция релейного типа:

$$f(s) = \begin{cases} 1, & s < g \\ 0, & s \geq g \end{cases}, \quad 0 < g < 1.$$

В пространстве параметров выделены области „быстрой“ и „долгой“ синхронизации, исследован вопрос о синхронизации на неустойчивом цикле, при малых коэффициентах связи аналитическими методами показано, что динамика исходной системы определяется динамикой специального одномерного отображения.

## Релаксационные решения логистического уравнения с запаздыванием, зависящим от состояния

Голубенец В.О.<sup>1</sup>

ЯрГУ, Ярославль

Рассмотрим логистическое уравнение с непостоянным запаздыванием

$$\dot{N} = \lambda N [1 - N(t - h(\lambda)) - f(N)], \quad (1)$$

где  $\lambda$  – достаточно большой параметр ( $\lambda \gg 1$ ). Функция  $h(\lambda)$  положительна и удовлетворяет условию

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} h(\lambda) = \ell \quad (0 \leq \ell < 1),$$

причем если  $\ell = 0$ , то  $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \lambda h(\lambda) / \ln \lambda = \infty$ . Функция  $f(N)$  положительна и достаточно гладкая при  $N \geq 0$ , монотонно убывает при  $N > 0$ , а также удовлетворяет равенствам

- $f(1) = 1 - \ell$ ;
- $\lim_{N \rightarrow \infty} f(N) = 0$ .

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект No 19-31-90082

Пространство  $C([- \tau_0, 0])$ , где  $\tau_0 = f(0) + \sup_{\lambda \gg 1} h(\lambda)$ , является фазовым для уравнения (1).

**Теорема.** При сформулированных условиях на функции  $h(\lambda)$  и  $f(N)$  и при  $\lambda \gg 1$  уравнение (1) имеет нелокальное релаксационное периодическое решение  $N(t, \lambda)$  с начальным условием из выпуклого, ограниченного и замкнутого множества:

$$\{\varphi(t) \in C([- \tau_0, 0]), \quad e^{\lambda t} \leq \varphi(t) \leq e^{a\lambda t}, \quad \varphi(0) = 1\}, \quad a \in (0, 1).$$

На рисунке ниже приведен пример такого решения при  $a = 0.8$  и  $\lambda = 6$  с начальным условием  $\varphi(t) = \exp(a\lambda t)$ , функцией  $h(\lambda) = 1/\ln \lambda$ , функцией  $f(N) = 1/(1 + N)$ .

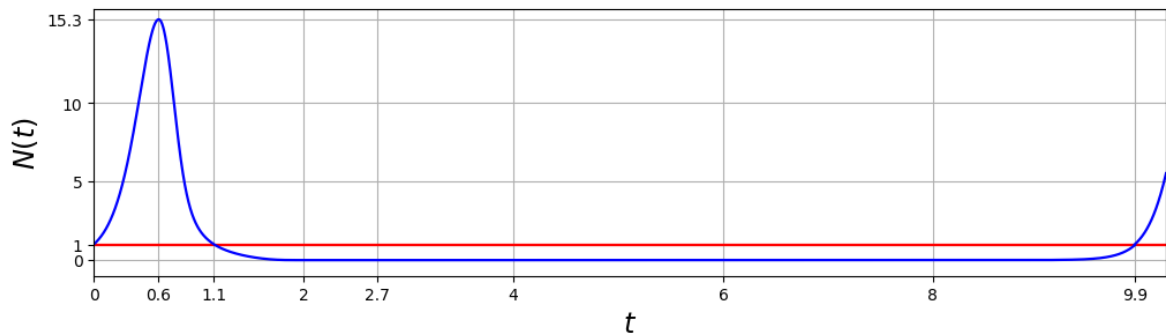


Рис. 1: Пример нелокального релаксационного решения исходного уравнения.

1. Jack K. Hale. Theory of functional differential equations. Springer-Verlag, 1977.
2. С. А. Кащенко. Асимптотика решений обобщенного уравнения Хатчинсона. *Моделирование и анализ информационных систем* **19**, **3** (2012) 32.

## Влияние мемристорной связи на динамику ансамбля элементов ФитцХью-Нагумо

Коротков А.Г.<sup>1</sup>, Казаков А.О.<sup>1,2</sup>, Леванова Т.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ННГУ, Нижний Новгород; <sup>2</sup>НИУ ВШЭ, Нижний Новгород

Проведено изучение влияния электрических и мемристорных связей (связей через общее поле) на динамику минимального ансамбля нейроноподобных систем с химическими (синаптическими) возбуждающими связями. Ранее авторами в работе [1] был предложен новый феноменологический метод моделирования химических синаптических связей с использованием прямоугольной функции, учитывающий силу связи, а также время начала действия связи и продолжительность этого действия. В работах [1,2] был исследован простейший ансамбль, состоящий из двух элементов ФитцХью-Нагумо со взаимными связями указанного типа, для которого в зависимости от соотношений между значениями параметров связи был найден ряд сосуществующих динамических режимов: регулярные спайковые режимы синфазной, противофазной и последовательной активности с различной последовательностью активации элементов, а также хаотические режимы. В настоящей

работе мы предлагаем расширенную модель ансамбля связанных нейронов и исследуем, как дополнительные связи (электрические связи и связи через общее поле) позволяют эффективно управлять динамикой ансамбля. Используя однопараметрический бифуркационный анализ модели, мы изучаем, как режимы синфазной, противофазной и последовательной активности могут трансформироваться в другие режимы нейроноподобной активности при наличии дополнительных связей. Показано также, что наличие электрической и/или мемристорной связи может привести к возникновению экстремальных событий, связанных с появлением спиральных аттракторов, содержащих состояние равновесия седло-фокус с его гомоклинической орбитой. В этом случае межспайковые интервалы могут становиться сколь угодно большими, когда орбиты (соответствующие этому режиму) проходят вблизи седло-фокуса.

Работа поддержана грантом 18-29-10081.

1. A.G. Korotkov, A.O. Kazakov, et al. // Commun. Nonlin. Sci. Num. Simulat. 2019. V. 71, P. 38-49.
2. A.G. Korotkov, A.O. Kazakov, et al. // IFAC-PapersOnLine. 2018. V. 51(33), P. 241-245.

## **Методы анализа электрической активности головного мозга человека для оценки объективных численных критериев колебательной активности на ЭЭГ сигналах**

**Журавлев М.О., Руннова А.Е.**

*СарГУ, Саратов*

В рамках настоящей работы разработан модифицированный метод анализа электрической активности головного мозга человека, отличительной особенностью которого является возможность объективного частотно-временного анализа данных. Разработанная методика основана на использовании скелета поверхности мгновенной энергии непрерывного вейвлетного преобразования с комплексными базисами [1, 2]. Необходимо отметить, что при использовании скелетной методики, как правило, ограничиваются первыми тремя максимальными значениями мгновенной энергии непрерывного вейвлетного преобразования в каждый момент времени. Тем не менее, такое допущение не всегда является корректным, так как при активности головного мозга человека постоянно существуют различные частотно-временные структуры, при этом интенсивность возникающих частотных паттернов в течении времени их существования может меняться значительно, при этом необходимо также учитывать “конкуренции” различных ритмов в активности головного мозга. Таким образом, оценка существования частотно-временных структур по первым трем максимумам мгновенной энергии является не совсем верной.

Для корректного определения реализующихся колебательных составляющих в ЭЭГ данных предлагается учитывать все имеющиеся максимумы мгновенной энергии непрерывного вейвлетного преобразования в каждый момент времени. Для этого был предложен алгоритм анализа “скелетных” максимумов энергии непрерывного вейвлетного преобразования, позволяющий выделять существующие в каждый момент времени частотно-временные паттерны в каждом из каналов ЭЭГ, данная методика основана на оценке существовавших на предшествующем шаге по времени максимумов (колебательных режимов с



заданными частотами) с максимумами существующими в данной момент времени. Такое простое представление позволяет, детектировать все возникающие паттерны в активности головного мозга вне зависимости от мощности колебаний, что в свою очередь значительно повышает чувствительность используемых методик. Очевидно, что предложенная методика, позволяет получить более полную картину активности головного мозга испытуемого, что в свою очередь позволит со значительной большей точностью производить мониторинг состояния испытуемого во время решения различного рода когнитивных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта No 19-32-80036.

1. Torresani B., Continuous Wavelet Transform, Savoie, Paris, 1995
2. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, (2003)

## **Исследование особенностей частотно-временной динамики данных ЭЭГ при двигательной активности пациента в постинсультном периоде**

**Журавлев М.О., Сельский А.О., Руннова А.Е.**

*СарГУ, Саратов*

Настоящая работа была посвящена оценке особенности изменения биоэлектрической активности головного мозга в ответ на реальные и воображаемые движения у пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта для последующего применения в реабилитации метода неинвазивного интерфейса “мозг - компьютер”. Для поиска и оценки выраженности паттернов воображаемой и реальной двигательной активности пациента использовались методики основанные на применении непрерывного вейвлетного преобразования к комплексным базисом [1-2]. Стоит отметить, что использование данного подхода для частотно-временного анализа характеристик экспериментальных сигналов хорошо себя зарекомендовало и все чаще используется в исследования [1].

Использование методик, основанных на непрерывном вейвлетном преобразовании с комплексных базисом, позволило проанализировать ЭЭГ данные и оценить доминирование частотных ритмов ( $\delta$ -,  $\theta$ -,  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -ритм) в различных областях головного мозга во время реальной двигательной активности и воображаемой. При этом, были выделены следующие характерные особенности. В активной стадии экспериментальной работы у условно здоровых испытуемых для случая реальных движений отмечалось развитие высокочастотной бета-активности в сенсомоторной области коры с последующей активизацией альфа-ритма в затылочной области. Для воображаемых движений частотно-пространственная структура ЭЭГ демонстрировала схожий характер, но альфа-ритм был более выражен и наблюдался в затылочной и теменной областях. При этом область моторной коры и участок височной доли демонстрировали выраженное возрастание интенсивности  $\beta$ -ритма.

Для активной стадии экспериментальной работы на ЭЭГ пациентов были выявлены существенные отличия от аналогичных данных условно здоровых испытуемых. При вы-

полнении реальных движений здоровой рукой на электроэнцефалограмме демонстрировалось смещение максимальных мощностей наблюдаемых ритмов в зону высоких частот, при этом общий характер оставался близким к наблюдаемому у условно здоровых испытуемых. Однако в случае выполнения реальных движений паретичной рукой у пациентов на ЭЭГ мощность колебательной активности преобладала в низкочастотных диапазонах  $\theta$ - и  $\delta$ -ритмов. При этом возникало падение  $\alpha$ - и  $\beta$ -активности с появлением слабых очагов гамма-ритма. При воображении движений частотно-пространственная структура ЭЭГ не имела существенных отличий для здоровой и паретичной конечностей. В то же время общая структура ЭЭГ носила характер, приближенный к таковому у относительно здоровых испытуемых. Значительная часть энергии приходилась на  $\alpha$ -ритм в затылочной области, но также отмечалась высокочастотная активность в  $\beta$ - и  $\gamma$ -ритмах в височной и центральной областях. Схожие результаты получены в группах относительно здоровых испытуемых и пациентов после перенесенного инсульта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (проект МК-1599.2019.9).

1. Torresani B., Continuous Wavelet Transform, Savoie, Paris, 1995
2. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, (2003)

## **Изменение связности контуров симпатической регуляции сердечно-сосудистой системы человека во время спинальной и общей анестезии при урологических операциях**

**Ежов Д.М., Хамбеков Р.С., Навроцкая Е.В., Зеулина Е.Е., Безручко Б.П.**

*СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, СарГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов*

Существует немало работ [1-3] посвященных теме взаимодействия ритмов регуляции сердечнососудистой системы человека во время анестезии. Активно изучается связанность ритмов нервной регуляции системы кровообращения при анестезии [4-6].

Исследование проводилось путем анализа низкочастотных (в районе 0.1 Гц) составляющих сигналов кардиоинтервалограммы (КИГ), выделяемой из ЭКГ и фотоплетизмограммы с трчх точек организма (ФПГ), зарегистрированных от больных во время операции. Данные были получены на базе третьей клинической больницы им. С.Р. Миротворцева г.Саратова.

Для анализа взаимодействия низкочастотных составляющих сигналов КИГ и ФПГ использовался метод, основанный на построении модели фазовой динамики исследуемых систем по наблюдаемым временным рядам [7,8]. Статистическая значимость индексов связи оценивалась с помощью подхода, предложенного в работе [8].

По временным реализациям фаз КИГ и ФПГ, снятых с разных участков тела, были получены оценки связи и ее направления для 16 пациентов. В результате анализа, было показано, что у всех пациентов, которым применялась общая анестезия, взаимное воздействие подсистем нервной регуляции variability сердечного ритма и сосудистого

тонуса во время действия анестетика пропадает. Во время спинальной блокады у большинства пациентов также взаимодействия между указанными подсистемами регуляции не обнаружено.

Установленная особенность взаимодействия ритмов вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы человека во время общей и спинальной анестезии может иметь не только диагностическое, но и прогностическое значение при оценке нарушений кровообращения во время хирургического обезболивания.

*Работа выполнена при поддержке РФФ, грант No 19-12-00201.*

1. A.S. Karavaev, M.D.rProkhorov, V.I.rPonomarenko et al. // *Chaos* 2009. V.19. P.033112Ц033119.
2. M.D.rProkhorov, V.I.rPonomarenko, V.I.rGridnev et al.// *Phys Rev E* 2003. V.68 P.041913Ц041923
3. R.M.rBaevsky, G.G. Ivanov, L.V.rChirejkin et al. // *The Bulletin of arrhythmology* 2001. V.24. P. 65-87.
4. N.rKanaya, N.rHirata, SaorirKurosawa, Masayasu Nakayama, Akiyoshi // *Anesthesiology*. 2003. 98:34Ц40
5. F.G.rEstafanous, J.M.rBrum, M.P.rRibeiro et al. // *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*. 1992. V.6, Issue 6, P. 651-657.
6. R. Hanss, B. Bein, T. Ledowski, M. Lehmkuhl et al // *Anesthesiology* 2005. 102:1086Ц93.
7. M.G. Rosenblum, A.S. Pikovsky // *Phys. Rev. E*. 2001. V.64. P. 045202 8.
8. D. Smirnov, B. Bezruchko // *Phys. Rev. E* 2003. V.68. P. 046209

## **Анализ взаимодействия медленных ээг и контуров вегетативной регуляции кровообращения у больных в состоянии комы**

**Ежов Д.М., Навроцкая Е.В., Безручко Б.П.**

*СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, СарГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов*

Показано, что низкочастотные ритмы (на частоте около 0.1 Гц.) сердечнососудистой системы, характеризующие механизмы регуляции и адаптации, у здоровых людей синхронизованные между собой, а в случае патологий степень синхронности этих процессов снижается. Ряд недавних работ посвящен исследованию связанности ритмов вегетативной регуляции системы кровообращения и медленных ритмов ЭЭГ как у здоровых испытуемых [1-2]. В данной работе исследуются особенности взаимодействия подсистем симпатической регуляции сердечного ритма и тонуса сосудов с медленными ритмами ЭЭГ у больных, находящихся в состоянии комы.

Анализировались записи сигналов 11 отведений электроэнцефалограммы (ЭЭГ), электрокардиограммы (ЭКГ) во II стандартном отведении и фотоплетизмограммы (ФПГ) с мочки уха, полученных от пациентов во время комы. Данные были получены на базе клинических больниц г. Саратова и г. Энгельса совместно с коллегами из СГМУ им. В.И. Разумовского. Также, для сравнения, регистрировались сигналы от здоровых добровольцев проводилась на базе кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ имени Н.Г. Чернышевского.

Для оценки variability сердечного ритма использовались кардиоинтервалограммы (КИГ), изменение сосудистого тонуса оценивалось по сигналу ФПГ. Для выявления связей использовался метод, основанный на моделировании фазовой динамики [3,4]. Значимость индексов связи оценивалась с помощью подхода, предложенного в работе [4]. Также проводился анализ степени синхронизованности изучаемых процессов с помощью оценки коэффициента фазовой когерентности [5].

В результате анализа, были получены оценки наличия и направления связи медленных ритмов 11 отведений ЭЭГ и ритмов нервной регуляции variability сердечного ритма и сосудистого тонуса у 5 здоровых и 5 больных испытуемых. Показано, что структура связей у здоровых и больных испытуемых отличается. А именно, у здоровых обнаружено взаимодействие между медленными ритмами некоторых отведений ЭЭГ и подсистемами регуляции кровообращения, у большинства больных значимого взаимодействия не обнаружено.

*Работа выполнена при поддержке РНФ, грант No 19-12-00201.*

1. араваев А.С., Киселев А.Р., Рунова А.Е., Короновский А.А. // Сборник материалов II Международной школы молодых ученых кДинамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике (DCNAIR 2018). 2018. -С.127-129.
2. B.Musizza, A. Stefanovska, P. V. E. McClintock et al. // J Physiol 580.1. 2007. З. 315Ц326.
3. M.G. Rosenblum, A.S. Pikovsky //Phys. Rev. E. 2001. V. 64. P. 045202.
4. D. Smirnov, B. Bezruchko // Phys. Rev. E 2003. V.68. P. 046209.
5. MormannF. et al. // Physica D. 2007. V. 225. P. 29.

## **Волны-убийцы: в море и не только**

**Слюняев А.В.**

*ИПФ РАН, Нижний Новгород*

Всплеск интереса к морским волнам-убийцам (оригинально Ц- freak waves, rogue waves) в начале 2000-х годов был вызван появлением значительного количества инструментальных записей неожиданно высоких волн и шумевшими случаями повреждений крупных кораблей и добывающих платформ на шельфе [1, 2]. Согласно принятым вероятностным моделям и стандартам волны с превышением по высоте в 2Ц3 раза и более должны бы были встречаться значительно (по некоторым оценкам в сотни раз) реже. Для объяснения этого эффекта были предложены различные механизмы [2, 3]. Кроме линейных эффектов дисперсионной и геометрической фокусировки, взаимодействия с течениями, большой интерес представляют принципиально нелинейные механизмы модуляционной неустойчивости волн и солитонных взаимодействий, которые ранее считались нереализуемыми в реальных морских условиях.

Исследование вопросов возникновения неожиданно высоких волн в рамках нелинейных приближенных теорий сегодня вышло за рамки океанических приложений. Явления типа волн-убийц широко исследуются в нелинейной оптике, физике плазмы и др. [4]. Кроме того, волнами-убийцами называют класс решений, описывающих быстрый рост малых возмущений с формированием короткоживущей волны большой амплитуды и ее дальнейшим

“исчезновением”. Представления о физических механизмах возникновения волн-убийц используются для разработки способов их предсказания. Кроме того, предлагаются и общие методы прогноза временных рядов, нейронные сети.

Из-за сложности динамики нелинейных морских волн большую популярность получает прямое численное моделирование уравнений гидродинамики, позволяющее связать морские состояния с вероятностными распределениями волн. Такой подход принципиально отличается от ныне используемого расчета усредненных по фазам кинетических уравнений. Оказывается, что в ряде случаев корреляции фаз волн приводят к существенному изменению вероятностных свойств волн и повышению повторяемости экстремальных событий. Ведущиеся исследования нацелены на разработку методов среднесрочного прогноза вероятности волн-убийц на временах от десятка минут до часов. Кроме того, современный уровень алгоритмов расчета уравнений гидродинамики, производительности компьютеров и средств дистанционной диагностики позволяют надеяться на осуществимость оперативного детерминистского прогноза волновой обстановки вблизи точки наблюдения [5].

Поддержано проектом РФФИ No 18-02-00042 и программой исследований Президиума РАН "Нелинейная динамика: фундаментальные проблемы и приложения".

1. Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. Волны-убийцы. Большая российская энциклопедия (2016). <http://bigenc.ru/physics/text/3954580>
2. Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A. *Rogue Waves in the Ocean*, Springer, 2009.
3. Slunyaev A., Didenkulova I., Pelinovsky E. *Contemp. Phys.* **52** (2011) 571-590.
4. Onorato, M., Residori S., Bortolozzo U., et al., *Phys. Rep.* **528** (2013) 47-89.
5. Слюняев А.В. *Вестник МГУ. Серия 3. Физика и Астрономия* **3** (2017) 33-47.

## **Частичная синхронизация и подавление колебаний в мультиплексных колебательных сетях с адаптивными связями**

**Некоркин В. И.**

*ИПФ РАН, Нижний Новгород*

Синхронизация колебаний является фундаментальным и общим явлением, встречающимся в системах самой различной природы. Последние несколько лет наблюдается растущий интерес к исследованию процессов синхронизации колебаний в осцилляторных сетях, имеющих многослойную пространственную архитектуру. В частности, такая сетевая организация характерна для нейронных структур мозга. В широком ареале многослойных систем важное место занимает так называемые мультиплексные сети, в которых соединения между узлами различных слоев имеют конфигурацию один к одному. Другой важной чертой многих реальных систем является свойство адаптивности, когда состояния узлов и межузловых соединений эволюционируют одновременно.

В лекции приводятся результаты исследования эффектов синхронизации и подавления колебаний в двух двухслойных мультиплексных сетях с адаптивными связями. Первая система представляет собой сеть фазовых осцилляторов, а вторая - сеть осцилляторов Стюрта-Ландау.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект No 19-12-00338)

1. Kasatkin D. V, Yanchuk S., Scholl E., Nekorkin V. I. *Phys. Rev. E* **96**, (2017) 062211
2. Kasatkin D. V, Nekorkin V. I. *Chaos* **28**, (2018) 093115
3. Maslennikov O. V., Nekorkin V. I. *Chaos* **28**, (2018) 121101

## Химерные состояния в сети двухчастотных автогенераторов

Щапин Д.С., Дмитричев А.С., Некоркин В.И.

*ИПФ РАН, Нижний Новгород*

Актуальной задачей современной нелинейной физики является исследование механизмов и условий формирования в осцилляторных сетях химерных состояний [1], в которых часть элементов сети находится в когерентном (синхронизованном) состоянии, а все остальные элементы некогерентны (десинхронизованы). Принято считать, что химерные состояния возникают в сетях, имеющих сложную структуру связей, которая разрушает симметрию, вызванную идентичностью элементов сети. Это либо сети в которых каждый осциллятор связан с некоторым, как правило, большим числом других осцилляторов, либо сети глобально связанных осцилляторов, или модульные сети с кластерными связями, состоящими из двух и более подсетей, либо сети, где взаимодействие происходит с запаздыванием или в присутствии шума.

Относительно недавно химерные состояния были обнаружены в системах с локальной структурой связей [2]. Однако, сами связи в этих системах являются сложными, например, нелинейными или включают сразу несколько переменных (компонент). В работе демонстрируется экспериментальная система, состоящая из локально и линейно связанных бистабильных автогенераторов. Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено существование в этой сети устойчивых химерных состояний. Показано, что существование химерных состояний не связано с неидентичностью автогенераторов и с воздействием шумов. Установлен математический образ химерных состояний в фазовом пространстве. Показано, что химерные состояния формируются движениями, происходящими на инвариантных торах различной размерности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект No 19-12-00338)

1. Abrams D. M., Strogatz S. H. *Phys. Rev. Lett.* **93**, (2004) 174102
2. Laing C. R. *Phys. Rev. E* **92**, (2015) 050904(R)

## Алфавитный указатель

- С.М. van Rijn, 5, 9
- Адилова А.Б., 6  
Алимшиева М.А., 5  
Алмаев И.А., 10  
Аникин В.М., 4, 7  
Анищенко В.С., 4  
Антоновская О.Г., 8  
Аркадакский С.С., 7  
Астахов С.В., 10  
Астахов В.В., 9, 10  
Астахов О.В., 8  
Астахов С.В., 9
- Байкенов Е.Ж., 11  
Бакунин В.Л., 6  
Балакин М.И., 6, 11  
Бегинин Е.Н., 7–10  
Безручко Б.П., 9, 11, 12  
Бир А.С., 6  
Блохина Е.В., 11  
Большаков Д.И., 5  
Боровкова Е.И., 5  
Бух А.В., 4
- Вдовина Г.М., 4, 5  
Волков Е.И., 7  
Высоцкий С.Л., 6, 10
- Герасимова С.А., 6  
Гинзбург Н.С., 6, 9  
Глызин С.Д., 8  
Глявин М.Ю., 6, 10  
Голоколенов А.В., 9  
Голубенец В.О., 11  
Гонченко С.В., 4  
Гордлеева С.Ю., 8  
Горюнов В.Е., 8  
Грачев А.А., 7–10  
Гришин С.В., 6  
Грищенко А.А., 9  
Губанов В.А., 9  
Губанова Ю.А., 7, 9  
Губернов В.В., 5  
Гулай А.П., 9
- Гурия Г.Т., 5, 12
- Данилов А.Б., 10  
Дворцов А.А., 11  
Денисов Г.Г., 6  
Дмитриев Б.С., 6  
Дмитричев А.С., 12  
Дудко Г.М., 6
- Евстифеев Е.В., 9  
Ежов Д.М., 11, 12  
Елистратов А.А., 9  
Емелин Е.А., 9  
Емельянова Е.П., 5
- Журавлев М.О., 5, 11, 12
- Завьялова Е.В., 5  
Зверев В.В., 11  
Зеулина Е.Е., 12  
Золотых Д.Н., 10  
Зотова И.В., 6, 9
- Ивановский Л.И., 8  
Изможеров И.М., 11  
Исаева О.Б., 9, 10  
Истомина Н.Л., 9
- Казаков А.О., 11  
Казанцев В.Б., 5, 8  
Калякулина А.И., 8  
Караваев А.С., 5  
Кащенко И.С., 7  
Кащенко С.А., 11  
Ковалева Н.С., 9  
Кожевников А.В., 6, 10  
Колесов А.Ю., 8  
Короновский А.А. мл., 5  
Коротков А.Г., 11  
Коськин Е.В., 11  
Кревчик В.Д., 8  
Круглов В.П., 8–10  
Крылов С.Н., 9  
Крылосова Д.А., 9  
Кузнецов А.П., 10, 11  
Кузнецов С.П., 4, 7, 8, 10

- Кульминский Д.Д., 8  
Кущов П.В., 7  
Кураев А.А., 12  
Курушина С.Е., 11  
Кусмарцев Ф.В., 8  
  
Лазаревич И.А., 8  
Леванова Т.А., 11  
Лобанов Н.Д., 10  
Любченко Д.О., 11  
  
Мазуров М.Е., 7  
Макаренко Н.Г., 8  
Малков С.Ю., 5  
Мартынов А.Д., 11  
Мартышкин А.А., 7, 9, 10  
Матвеев О.В., 10  
Матвеев В.В., 12  
Матросов В.В., 5, 9  
Медведева Т.М., 9  
Мищенко М.А., 5, 9  
Морозова Л.А., 11  
Морозова М.А., 10  
Морозова С.В., 5  
Москаленко О.И., 6, 9, 10  
Мучкаев В.Ю., 6  
  
Навроцкая Е.В., 11, 12  
Некоркин В.И., 12  
Никитов С.А., 7–9  
Никулин Ю.В., 6, 10  
Новожилова Ю.В., 6, 10  
  
Обычев М.А., 10  
Одинцов С.А., 7, 9–11  
  
Павлов Е.С., 6, 10  
Панкратова Е.В., 5, 8  
Плотникова А.Д., 10  
Поварова Т.В., 11  
Полежаев А.А., 5  
Пономаренко В.И., 8, 10  
Попова Е.С., 10  
Преображенская Н.В., 10  
Прохоров М.Д., 8  
  
Ремизов А.С., 7  
Роговин В.И., 10  
Рожнев А.Г., 9  
Рожнова М.А., 5  
Розенталь Р.М., 9  
Романенко Д.В., 6, 10  
Ростунцова А.А., 7  
Рошин С.Ю., 8  
Руннова А.Е., 5, 11, 12  
Рыскин Н.М., 6, 7, 10, 11  
  
Савельев С.В., 11  
Савин А.В., 11  
Савин Д.В., 9  
Садовников А.В., 7–11  
Саломатова Е.И., 10  
Санин А.Л., 7  
Сапега Т.С., 5  
Сатаев И.Р., 9, 10  
Сафаров Е.Г., 11  
Сахаров В.К., 6, 10  
Седова Ю.В., 10  
Селезнев Е.П., 8, 9  
Селезнев М.Е., 6, 10  
Сельский А.О., 5, 12  
Семенов М.Б., 8  
Сергеев А.С., 6, 9  
Сердобинцев А.А., 9  
Симонова Ю.В., 10  
Синкин М.В., 11  
Скороходов В.Н., 6  
Слюняев А.В., 12  
Смирнов Д.А., 8, 9  
Станкевич Н.В., 8–11  
Стасенко С.В., 8  
Сысоев И.В., 5, 8, 9  
Сысоева М.В., 5, 8, 9  
  
Трубецков Д.И., 4, 5  
Тюрюкина Л.В., 7  
  
Фадеева Н.С., 10  
Филимонов Ю.А., 6, 10  
Фильченков И.О., 11  
Флейшман А.Н., 5  
Фунтов А.А., 7  
  
Хамбеков Р.С., 12  
Хивинцев Ю.В., 6, 10  
Храмков А.Н., 11  
Храмов А.Е., 4



---

Царев В.А., 6

Чернец Е.П., 5

Шалаев П.Д., 7

Шаповалова Е.А., 11

Шаповалова Ю.А., 11

Шараевская А.Ю., 10

Шараевский Ю.П., 7, 8, 10

Шешукова С.Е., 7, 9, 10

Шорохов А.В., 8

Щапин Д.С., 12

Щеголева Н.А., 11

Якупов Э.О., 5

Научное издание

ХII МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ

“ХАОТИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР”

ХАОС-2019

**МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ**