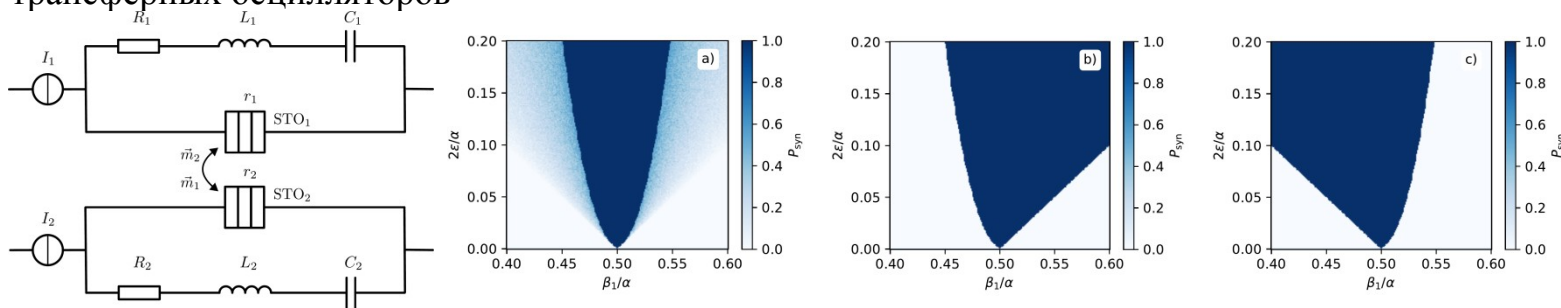


**Научные достижения лаборатории СФ7
СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН
за 2023 год**

Управление бистабильностью в системе связанных спин-трансферных осцилляторов

Предложен механизм подавления бистабильности синхронного и несинхронного режимов в системе связанных через магнитное поле спин-трансферных осцилляторов



- Осцилляторы могут демонстрировать как синхронные так и не синхронные колебания.
- Имеется диапазон параметров в котором наблюдается бистабильность, когда эти два режима сосуществуют.
- Для системы двух осцилляторов: предварительно заряжаем конденсаторы \Rightarrow ток монотонно и медленно убывает \Rightarrow осцилляторы «забывают» свои произвольные начальные состояния.
- В системе с бóльшим числом осцилляторов реализация такого механизма управления запуском колебаний усложняется. Требуется более точная настройка параметров RLC по сравнению со случаем двух осцилляторов.

Рассматриваются связанные через магнитные поля одноосные спин-трансферные осцилляторы с RLC нагрузкой. Осцилляторы могут демонстрировать как синхронные так и не синхронные колебания. Имеется диапазон параметров в котором наблюдается бистабильность, когда эти два режима сосуществуют. Для системы двух осцилляторов показано, что если настроить RLC цепочки таким образом, что после включения ток в них монотонно и медленно убывает от больших отрицательных значений до нуля, можно добиться «забывания» осцилляторами своих произвольных начальных состояний. Это обеспечивает контролируемый запуск колебаний: бистабильность может быть подавлена как в пользу синхронного так и не синхронного режимов. В системе с большим числом осцилляторов реализация такого механизма управления запуском колебаний усложняется из-за появления дополнительных режимов кластерной синхронизации. В связи этим параметры RLC нагрузки, обеспечивающие управляемый запуск осцилляторов, требуют более точной настройки по сравнению со случаем двух осцилляторов. Полученные результаты могут быть использованы для создания устройств генерации СВЧ излучения на основе связанных спин-трансферных осцилляторов (**лаб. СФ-7 СФИРЭ; проект РФФИ № 21-12-00121**).

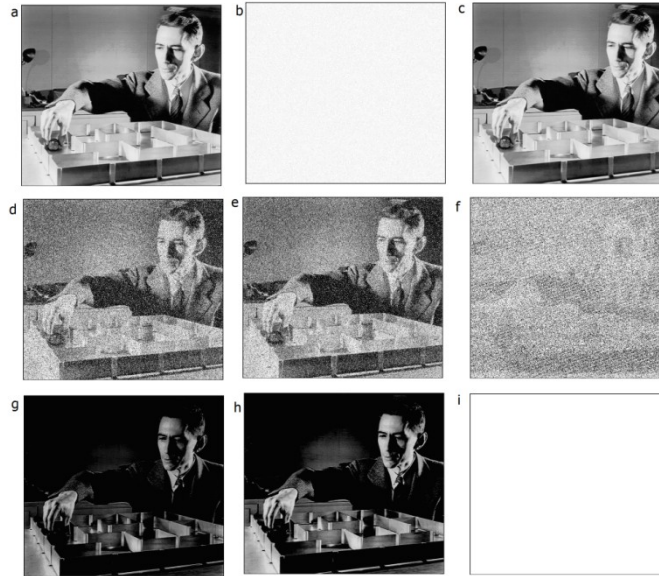
Публикации

1. Купцов П. В. Управление бистабильностью в системе двух одноосных спин-трансферных осцилляторов с полевой связью и RLC-нагрузкой // Физика твердого тела. Т. 65, №6. 2023. С. 943-950 DOI: 10.21883/ФТТ.2023.06.55648.05Н. WoS Q4.
2. Купцов П. В. Синхронизация и управляемая бистабильность двух спин-трансферных осцилляторов с одноосной симметрией и полевой связью / Труды XXVII Международного симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника» // 2023, Т. 1, С. 232-234.
3. Купцов П. В. Синхронизация и бистабильность в системе спин-трансферных осцилляторов с полевой связью / Сборник докладов XVIII Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» // Саратов: Издательство «Техно-Декор» 2023, С. 100-101

Новый метод широкополосной коммуникации, устойчивый к расстройке между передатчиком и приемником

Разработаны новые схемы скрытой широкополосной коммуникации на основе нелинейного подмешивания информации к динамике передатчика и ее декодирования с помощью синхронизованного с ним приемника – двух генераторов сложного сигнала.

- Генераторы гиперболического хаоса и генераторы со странным нехаотическим аттрактором.
- Обобщённая синхронизация приёмника и передатчика
- Декодирование на основе анализа корреляции сигналов приёмника и передатчика



Выявлено преимущество этих схем по сравнению с использованием негрубого хаоса

- *Идентичные приёмник и передатчик*: информационный сигнал (рис. а), замаскированный (рис. б) сложным сигналом передатчика, успешно декодируется (рис. с) для грубого и негрубого хаоса.
- *Расстройка параметров приёмника и передатчика, грубый хаос, странный нехаотический аттрактор*: некоторое ухудшение качества декодирования (рис. d и e, соответственно)
- *Негрубый хаос*: практически полная потеря информации (рис. f).
- *Декодирование на основе анализа корреляций, грубый хаос и СНА*: значительное улучшение качества выделения информации (рис. g,h), в отличие от ситуации использования негрубого хаоса (рис. i).

Разработаны новые схемы скрытой широкополосной коммуникации на основе нелинейного подмешивания информации к динамике передатчика и её декодирования с помощью синхронизованного с ним приёмника – двух генераторов сложного сигнала. Новым является сочетание использования генераторов гиперболического хаоса и генераторов со странным нехаотическим аттрактором, обобщённой синхронизации приёмника и передатчика и декодирования информации на основе анализа корреляций сигналов. На основе качественного анализа проведена оценка преимуществ этих схем по сравнению с ситуацией коммуникации, использующей хаос негрубого негиперболического типа. Оценка проведена посредством контроля за передачей цифрового изображения в численном эксперименте. Информационный сигнал, замаскированный сложным сигналом передатчика, декодируется с приемлемой точностью даже при наличии расстройки параметров приёмника и передатчика. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых систем коммуникации на основе динамического хаоса (**лаб. СФ-7 СФИРЭ; проект РНФ № 21-12-00121**).

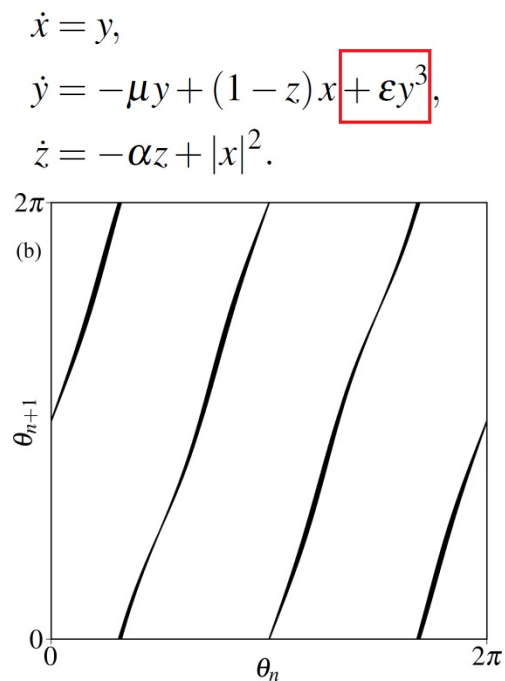
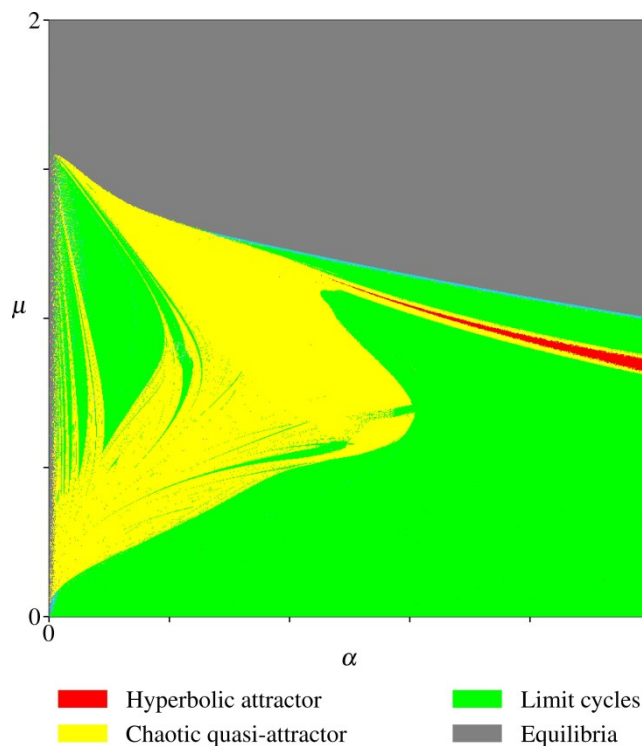
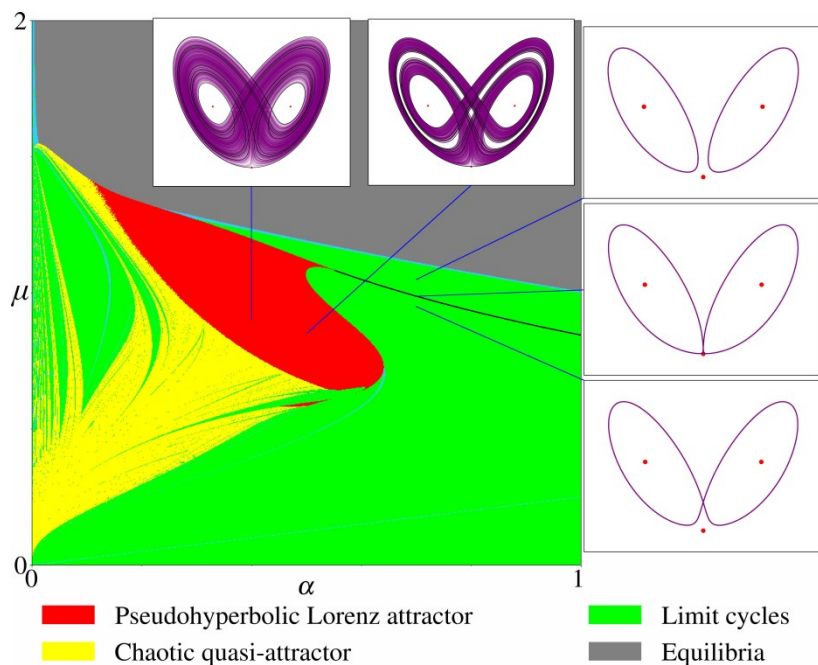
Публикации

1. Исаева О.Б., Любченко Д.О. Сравнительный анализ схем скрытой коммуникации, основанных на генераторах со странным аттрактором гиперболического типа и со странным нехаотическим аттрактором // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. Т.32, 2024, №1 (РНФ, грант №21-12-00121).

2. Любченко Д.О., Исаева О.Б. Влияние шума и частотных искажений в канале связи на коммуникационную схему на основе генератора гиперболического хаоса // Радиотехника и электроника. Т. 68, 2023, №10 С.1008-1010.

Новый механизм рождения грубого хаоса

Впервые показано, что гомоклиническая бифуркация «бабочка», играющая ключевую роль в сценарии рождения классического псевдогиперболического аттрактора Лоренца, является также частью сценария перехода к равномерно гиперболическому хаотическому аттрактору, который представляет собой другой тип грубого хаоса.



- В уравнения Шимицу-Мориока введено возмущение степенного вида
- Обнаружен гиперболический аттрактор типа Смейла-Вильямса в окрестности точек бифуркации «бабочка» с отрицательным седловым индексом (черные линии на рисунках слева).

Впервые показано, что гомоклиническая бифуркация «бабочка», играющая ключевую роль в сценарии рождения классического псевдогиперболического аттрактора Лоренца, является также частью сценария перехода к равномерно гиперболическому хаотическому аттрактору, который представляет собой другой тип грубого хаоса. В этом контексте изучена модифицированная комплексная система Шимицу-Мориока и показано, что в ней реализуется гиперболический аттрактор типа Смейла-Вильямса. Гиперболический аттрактор указанного типа возникает при введении возмущения степенного вида в систему Шимицу-Мориока в окрестности точек бифуркации «бабочка» с отрицательным седловым индексом. Проведено численное исследование устройства пространства параметров системы. Выявлены области в пространстве параметров где для траекторий системы выполняются одновременно необходимые условия, которым должен удовлетворять гиперболический аттрактор типа Смейла-Вильямса. Полученные результаты обогащают теорию динамических систем новым механизмом возникновения гиперболического хаотического аттрактора (**лаб. СФ-7 СФИРЭ; проект РФФИ № 21-12-00121**).

Публикация

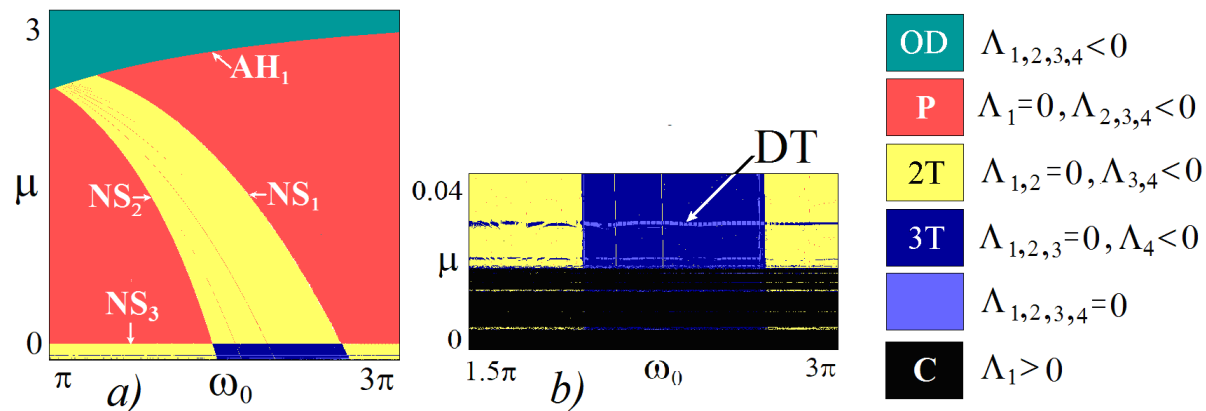
Kruglov V., Sataev I. On hyperbolic attractors in a modified complex Shimizu–Morioka system // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 33 №06, 2023, 063131 <https://doi.org/10.1063/5.0138473> WoS Q1

Динамика связанных разнотипных систем – квазипериодика и хаос

Рассмотрено взаимодействие системы с квазипериодической автономной динамикой и хаосом (система Ресслера):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= y_1, & \dot{x}_2 &= -y_2 - z_2, \\ \dot{y}_1 &= (\lambda + z_1 + x_1^2 - \beta x_1^4) y_1 - \omega_0^2 x_1 - \mu(\dot{x}_1 - \dot{x}_2), & \dot{y}_2 &= x_2 + \rho y_2 + \mu(y_1 - y_2), \\ \dot{z}_1 &= b(\varepsilon - z_1) - k y_1^2, & \dot{z}_2 &= q + (x_2 - r) z_2. \end{aligned}$$

- Малая связь: хаотический режим, два дополнительных нулевых показателя Ляпунова.
- Рост связи: трехчастотный квазипериодический режим => двухчастотный режим => периодический режим => режим гибели колебаний.
- Обнаружены удвоения трехчастотных торов. Описан сценарий (двухпараметрический ляпуновский и бифуркационный анализ).
- Новый сценарий перехода в связанных системах от режима гибели колебаний к квазипериодичности:
 - Состояние равновесия теряет устойчивость через субкритическую бифуркацию Андронова-Хопфа, сталкиваясь с седловым предельным циклом.
 - В свою очередь этот цикл сливается с устойчивым.
 - Последний испытывает бифуркацию Неймарка-Сакера, когда при уменьшении связи от него мягким образом отделяется устойчивый тор.



Карта ляпуновских показателей связанных систем и ее увеличенный фрагмент. P – периодический режим, 2T и 3T – двух- и трехчастотная квазипериодичность, C – хаос, OD – область гибели колебаний, NS – бифуркация Неймарка-Сакера, AH – Андронова-Хопфа, DT – удвоения 3-тора.

Рассмотрено взаимодействие системы с квазипериодической автономной динамикой и хаосом (система Ресслера). При малой связи реализуется хаотический режим, нетривиальной особенностью которого является возможность двух дополнительных нулевых показателей Ляпунова. Показано, что с ростом связи последовательно возникают трехчастотный квазипериодический режим, двухчастотный режим, периодический режим и режим гибели колебаний. В системе возможны удвоения трехчастотных торов. Дан двухпараметрический ляпуновский и бифуркационный анализ, описывающий такой сценарий и его механизмы. Описан новый сценарий перехода в связанных системах от режима гибели колебаний к квазипериодичности. Он состоит в том, что состояние равновесия теряет устойчивость через субкритическую бифуркацию Андронова-Хопфа, сталкиваясь с седловым предельным циклом. В свою очередь этот цикл сливается с устойчивым. Последний испытывает бифуркацию Неймарка-Сакера, когда при уменьшении связи от него мягким образом отделяется устойчивый тор. Полученные результаты расширяют представление о картине синхронизации разнотипных нелинейных систем (**лаб. СФ-7 СФИРЭ; тема госзадания «Союз-2»**).

Публикации:

Kuznetsov A.P., Sedova Y.V., Stankevich N.V. Coupled systems with quasi-periodic and chaotic dynamics // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2023. V. 169, № 4. P. 113278. WoS Q1.

Кузнецов А.П., Седова Ю.В. Динамика связанных квазипериодического генератора и системы Ресслера // *Письма в ЖТФ*. 2023. Т. 49. №. 2. С. 17-20. WoS Q4.

Автоколебательные системы с управляемой фазой воздействия

Рассмотрены автоколебательные системы с адаптивным воздействием: фаза зависит от состояния самой системы. Изучены два случая:

- осциллятор ван дер Поля
- генератор автономных квазипериодических колебаний

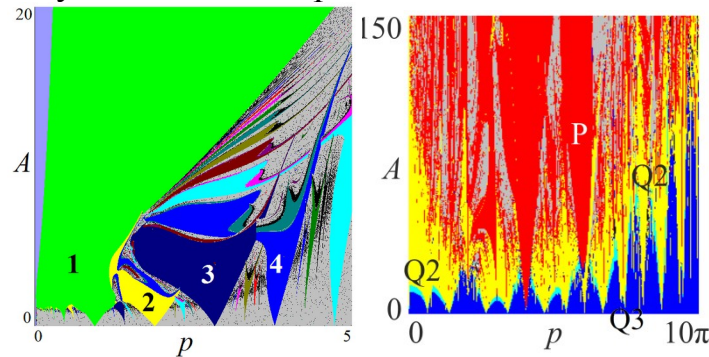
$$\ddot{x} - (\lambda - x^2)\dot{x} + x = A \sin(pt + kx) \quad \dot{z} = b(\varepsilon - z) - \mu \dot{x}^2.$$

Осциллятор ван дер Поля:

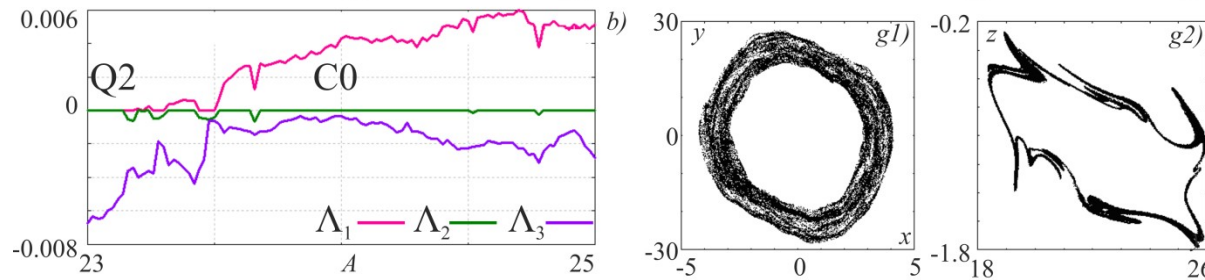
- Расширение языков субгармонических резонансов, слабо выраженных в классическом осцилляторе.

Квазипериодический генератор

- Наблюдаются двухчастотные и трехчастотные торы.
- Возрастание параметра адаптивности: области трехчастотных торов вытесняют языки двухчастотных торов.
- Хаос с близким к нулю дополнительным показателем Ляпунова.
- Гиперхаос в результате разрушения двухчастотного тора.



Карта динамических режимов осциллятора ван дер Поля и ляпуновская карта квазипериодического генератора с адаптивным воздействием; Q2 и Q3 области двух- и трехчастотной квазипериодичности



Графики ляпуновских показателей, фазовые портреты и стробоскопические сечения, иллюстрирующие хаос C0 с близким к нулю дополнительным показателем

Рассмотрены автоколебательные системы с адаптивным воздействием, фаза которого зависит от состояния самой системы. Изучены два случая: осциллятор ван дер Поля и генератор автономных квазипериодических колебаний. Введение такого типа воздействия в первом случае приводит к расширению языков субгармонических резонансов, слабо выраженных в классическом осцилляторе. Для генератора квазипериодических колебаний в неавтономном случае наблюдаются как двухчастотные торы, так и трехчастотные торы. При возрастании параметра адаптивности области последних начинают доминировать, вытесняя языки двухчастотных торов. Обнаружена разновидность многомерного хаоса, характеризующегося близким к нулю дополнительным показателем Ляпунова. Показана возможность развития гиперхаоса в результате разрушения двухчастотного тора. Полученные результаты могут быть использованы для управления различными колебательными системами (**лаб. СФ-7 СФИРЭ; проект РНФ № 21-12-00121**).

Публикация:

Крылосова Д.А., Кузнецов А.П., Седова Ю.В., Станкевич Н.В. Автоколебательные системы с управляемой фазой внешнего воздействия. Известия вузов // Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31. № 5. С. 549-565. WoS Q4, Scopus Q3.

Динамика неидентичных контактов Джозефсона

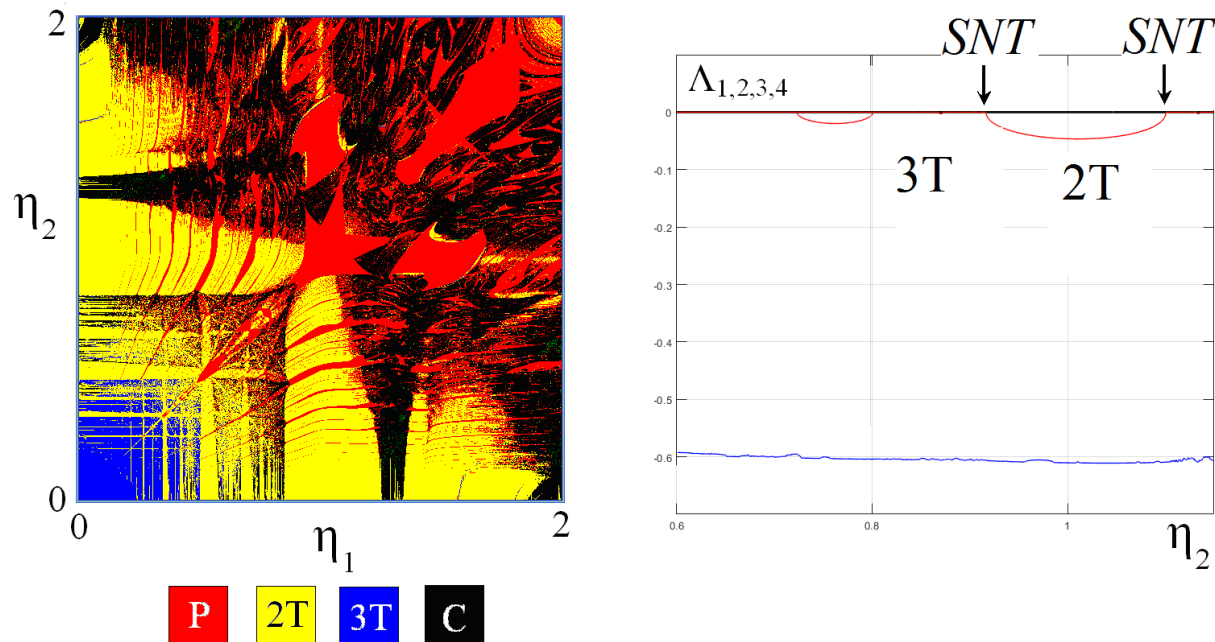
Рассмотрены три контакта Джозефсона, нагруженные на RLC-цепь:

$$\frac{\hbar}{2er_n} \dot{\phi}_n + I_n \sin \phi_n = I - \dot{Q},$$

$$L\ddot{Q} + R\dot{Q} + Q/C = \frac{\hbar}{2e} \sum_{n=1}^3 \dot{\phi}_n.$$

Неидентичность по сопротивлениям r_n .

- Границы областей двухчастотной квазипериодичности – это линии седло-узловых бифуркаций инвариантных торов.
- Изменение типа нагрузки: от RLC к LC и к RC
 - LC: расширение области хаоса и разрушение резонансной паутины Арнольда.
 - RC: подавление хаоса и расширение области занимаемой паутиной Арнольда.



Ляпуновская карта на плоскости параметров неидентичности контактов по величине сопротивлений, иллюстрирующая увеличение области хаоса С при связи через LC-цепь. Графики ляпуновских показателей, иллюстрирующие седло-узловые бифуркации SNT двухчастотных торов 2Т с рождением трехчастотного тора 3Т.

Методами нелинейной динамики рассмотрены три контакта Джозефсона, нагруженные на RLC-цепь. Детально рассмотрен случай неидентичности контактов по величине сопротивлений. Показано, что границами областей двухчастотной квазипериодичности являются линии седло-узловых бифуркаций инвариантных торов. Исследована зависимость картины от типа связи (через RLC-цепь, LC-цепь, RC-цепь). Использование LC-цепи приводит к расширению области хаоса и быстрому разрушению резонансной паутины Арнольда. Использование RC-цепи напротив, приводит к подавлению хаоса и расширению области занимаемой паутиной Арнольда. Полученные результаты могут быть использованы в теории контактов Джозефсона, обогащая представления о возможных колебательных режимах (лаб. СФ-7 СФИРЭ; проект РНФ № 21-12-00121).

Публикация:

Кузнецов А. П., Сатаев И. Р., Седова Ю. В. Анализ трех неидентичных контактов Джозефсона методом карт ляпуновских показателей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2023. Т. 23. №. 1. С. 4-13. Scopus Q4.