



Численное исследование сверхпроводящих процессов и физических характеристик в многопараметрических моделях джозефсоновских структур

Башашин Максим Викторович

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

bashashinmv@jinr.ru

Специальность: 1.2.2 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Земляная Е.В.

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук

Рахмонов И.Р.

Дубна, 2025



Общая характеристика работы

В диссертации представлены методы, комплексы программ и результаты численного исследования физических процессов, протекающих под действием различных факторов в системах джозефсоновских структур. Изучаемые модели описываются многопараметрическими системами нелинейных дифференциальных уравнений. Численные исследования характеризуются значительным объемом вычислений и требуют применения методов и технологий параллельных вычислений для повышения производительности компьютерного моделирования. Проведено исследование следующих моделей:

- модель системы длинных джозефсоновских переходов (ДП) с учетом емкостной и индуктивной связи между соседними ДП. В рамках этой модели проводится расчет вольт-амперных характеристик (ВАХ) и исследуется влияние ряда параметров модели на ее структуру.
- модель точечного аномального ДП с учетом спин-орбитальной связи в ферромагнитном слое, так называемого ϕ_0 -перехода. Здесь основной задачей численного моделирования было исследование переворота магнитного момента (ММ) в ферромагнитном слое под воздействием импульса тока, выявление интервалов параметров, где происходит переворот магнитного момента, и изучение влияния различных факторов на конфигурацию периодической структуры доменов переворота. В диссертации для указанных задач:
- сформулированы математические постановки задач,
- построены вычислительные схемы,
- созданы комплексы проблемно-ориентированных программ с применением технологий параллельного программирования MPI и OpenMP,
- проведен численный анализ изучаемых моделей, на основе которого получены значимые для соответствующих областей знаний численные результаты, позволяющие сделать заключения о свойствах изучаемых физических процессов и о перспективах дальнейших исследований.



Актуальность темы диссертации

Изучение процессов, протекающих в джозефсоновских структурах, является одной из актуальных тем в физике конденсированных сред. Помимо необходимости получения фундаментальных знаний о свойствах джозефсоновских структур различных типов, внимание к их исследованию обусловлено открывающимися возможностями практических приложений в сверхпроводящей электронике.

- Особое внимание исследователей при изучении физических процессов в стеках длинных джозефсоновских переходов вызывают перспективы их использования в качестве элементной базы для квантовых процессоров и сверхпроводящей компьютерной памяти.
- В последние годы активное внимание исследователей привлекают системы, основанные на взаимодействии сверхпроводящего тока с магнитным моментом в джозефсоновских структурах с ферромагнетиком. В структуре сверхпроводник / ферромагнетик / сверхпроводник (SFS) спин-орбитальная связь в ферромагнитном слое без центра инверсии обеспечивает механизм прямой (линейной) связи между магнитным моментом и сверхпроводящим током. Такие ДП называют ϕ_0 -переходами. Возможность контроля магнитных свойств сверхпроводящим током, а также влияние магнитной динамики на сверхпроводимость интенсивно исследуется в последнее время. В этой связи актуальность приобретает определение областей параметров моделей ϕ_0 -переходов, в которых имеет место переворот магнитного момента (ММ), и выявление общих закономерностей этого феномена для выбора наиболее подходящих условий для возможностей практических реализаций устройств на базе ДП, включая СКВИДы (SQUID - superconducting quantum interference device).



Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка и программная реализация методов высокопроизводительного численного исследования сверхпроводящих процессов и их физических характеристик в модели стека длинных джозефсоновских переходов с емкостной и индуктивной связью и в модели ϕ_0 -перехода со спин-орбитальной связью в ферромагнитном слое, а также численное исследование этих моделей для получения новой информации о сверхпроводящих процессах в изучаемых системах.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие **задачи**:

- изучить физические особенности процессов в рассматриваемых системах и литературу, посвященную данной проблемной области,
- в рамках исследуемых моделей сформулировать математические постановки задач и подобрать численные методы решения,
- разработать комплексы программ для реализации вычислительных экспериментов,
- разработать методы повышения производительности вычислений за счет реализации параллельных алгоритмов в созданных комплексах программ,
- провести численное исследование и проанализировать полученные результаты.



Научная новизна

- Разработан и реализован на основе технологии MPI параллельный алгоритм для численного исследования физических характеристик в модели стека длинных джозефсоновских переходов с емкостной и индуктивной связью.
- В результате проведенного на этой основе компьютерного моделирования показано, что наличие связи между ДП инспирирует возникновение новых многофлюксонных состояний в системе ДДП, что приводит к усложнению структуры ВАХ.
- Разработан и реализован с помощью технологий MPI и OpenMP параллельный алгоритм для определения доменов переворота магнитного момента (ММ) в модели ϕ_0 -перехода со спин-орбитальной связью в ферромагнитном слое.
- Получена новая информация о влиянии различных факторов на периодическую структуру доменов переворота ММ.

Практическая значимость

- Разработанные методы и комплексы проблемно-ориентированных программ могут быть использованы в дальнейших исследованиях джозефсоновских структур различного типа.
- Созданные комплексы программ LJJ-CVV-MPI и SPIN-Ga/Gr переданы в библиотеку программ JINRLIB для свободного использования.
- Разработанные программы включены в созданную в ЛИТ ОИЯИ виртуальную среду «Виртуальная исследовательская среда для моделирования физических процессов в гибридных наноструктурах, состоящих из сверхпроводников и магнетиков» на платформе HybriLIT.



Положения, выносимые на защиту

- Математические постановки задач, описывающие динамические процессы в модели стека длинных джозефсоновских переходов с емкостной и индуктивной связью и в модели φ_0 -перехода со спин-орбитальной связью в ферромагнитном слое.
- Вычислительные схемы, реализованные в виде комплексов программ с применением технологий параллельных вычислений для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений, позволяющие моделировать физические процессы и рассчитать их характеристики в системах ДДП и в φ_0 -переходах.
- Результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния различных факторов на структуру вольт-амперной характеристики в системах длинных джозефсоновских переходов и на структуру доменов переворота магнитного момента в φ_0 -переходах.

Достоверность результатов, публикации

Достоверность и обоснованность полученных результатов численного моделирования подтверждена тестированием разработанных методов и программ с использованием известных для некоторых частных случаев решений, соответствием полученных результатов с численными и теоретическими оценками других авторов, согласием результатов, полученных независимо различными численными методами.

По теме диссертации опубликовано 13 работ, 11 из которых в рецензируемых изданиях, соответствующих требованиям к публикациям Положения о присуждении ученых степеней в ОИЯИ.

В диссертационной работе присутствуют результаты, соответствующие пунктам 2, 3, 8 паспорта специальности 1.2.2.



Апробация, личный вклад

Результаты представлены автором на научных семинарах в ЛИТ ОИЯИ и на российских и международных научных конференциях:

- XXIII международная конференция "Математика. Компьютер. Образование" (МКО 2016), Дубна, Россия.
- Meeting of the Program Advisory Committee for Condensed Matter Physics, Дубна, Россия (poster session) - 2016, 2019, 2024, 2025.
- International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS), Dubna, Russia - 2016, 2019, 2022.
- Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems (ITTMM), Moscow, Russia - 2019, 2024.
- Mathematical Modeling and Computational Physics" (MMCP), Stará Lesná - 2019.
- 10th International Conference `Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education` (GRID`2023), Dubna, Russia.

Личный вклад автора отражен в содержании диссертации, в положениях вынесенных на защиту. Автор участвовал в формулировке задач, методов решений, обсуждении результатов, подготовки публикаций. Разработка, реализация и тестирование параллельных алгоритмов, проведение компьютерного моделирования выполнены автором.



Структура и объем работы. Введение

Диссертационная работа состоит из

- введения,
- трех глав,
- заключения,
- списка публикаций автора по теме диссертации (13 пунктов),
- списка цитируемой литературы (105 пунктов).

Работа содержит 101 страниц и включает в себя 38 рисунков и 9 таблиц.

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи, излагаются научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность работы, методология и методы исследования, приводятся положения, выносимые на защиту.

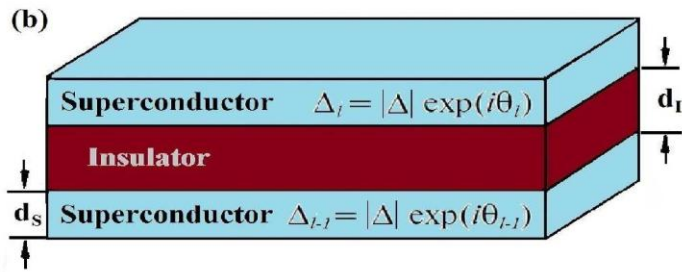
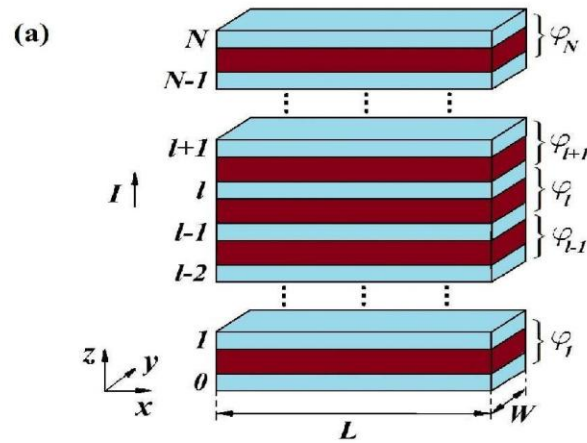


Первая глава

- Представлен обзор основных направлений и методов моделирования сверхпроводящих структур.
- Описаны методы численного решения изучаемых задач, использованные в диссертации. Дана характеристика технологий MPI и OpenMP, а также технологии SIMD-оптимизации AVX-512.
- Дано краткое описание разрабатываемых в ЛИТ ОИЯИ виртуальных вычислительных сред для математического моделирования сложных физических систем, в том числе «Виртуальная исследовательская среда для моделирования физических процессов в гибридных наноструктурах, состоящих из сверхпроводников и магнетиков», куда включены разработанные автором комплексы программ.
- Представлены переданные в библиотеку программ JINRLIB разработанные комплексы программ использованные для получения результатов представленных в диссертации.
 - LJJ-CVV-MPI: <http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/ljj-cvv-mpi/index.html>
 - SPIN-Ga/Gr: <http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/spin-ga-gr/index.html>



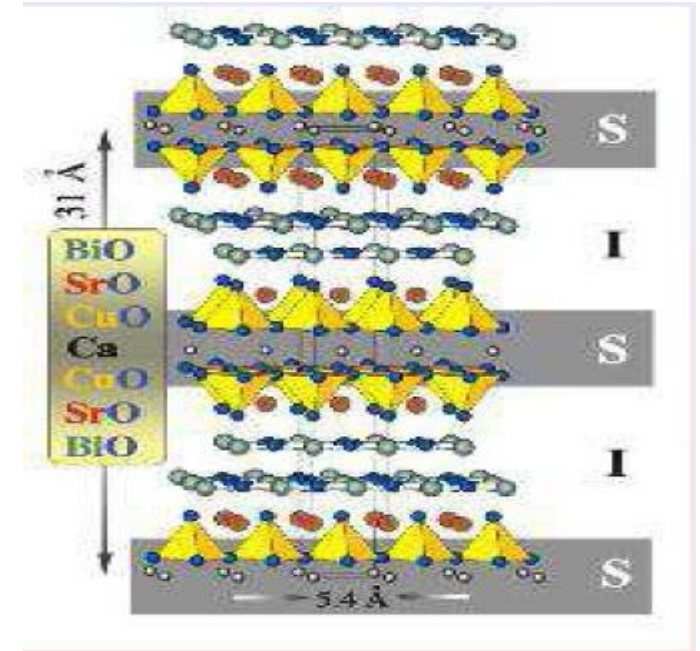
Вторая глава: Численное исследование модели стека длинных джозефсоновских переходов с емкостной и индуктивной связью



Рассматривается обобщенная модель, учитывающая индуктивную и емкостную связь между ДП.

Система связанных ДДП предполагается состоящей из сверхпроводящих слоев с промежуточными диэлектрическими слоями длины L .

Все величины безразмерные.



Структура природного кристалла $Bi_2Cr_2CaCu_2O_8$

- (a) Схематический вид системы длинных джозефсоновских переходов. Ось x выбрана вдоль длины L ДП, ось y вдоль ширины W и ось z перпендикулярна слоям.
- (b) Схема l -го джозефсоновского перехода, d_s - толщина сверхпроводящего слоя, d_i - толщина диэлектрика.



Вторая глава: Постановка задачи

Фазовая динамика системы ДДП с учетом емкостной и индуктивной связи между контактами описывается системой уравнений относительно разности фаз φ_l и напряжения V_l на каждом l -м контакте:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_l}{\partial t} = D_c V_l + s_c V_{l+1} + s_c V_{l-1} \\ \frac{\partial V_l}{\partial t} = \sum_{n=1}^N (\mathcal{L}_{l,n}^{-1} \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x^2}) - \sin \varphi_l - \beta \frac{\partial \varphi_l}{\partial t} + I \end{cases} \quad (1)$$

где \mathcal{L} - матрица индуктивной связи.

$$\mathcal{L} = \begin{pmatrix} 1 & S & 0 & \dots & & & S \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & 0 & S & 1 & S & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S & & \dots & 0 & S & 1 & \end{pmatrix} \quad (2)$$

Здесь $\beta = \sigma V_0 / (d_l j_c)$ - параметр диссипации, параметр индуктивной связи S принимает значение на интервале $0 < |S| < 0.5$. D_c - эффективная электрическая толщина ДП, нормированная на толщину диэлектрического слоя. s_c - параметр емкостной связи. V_l - напряжение на l -м ДП, I - внешний ток. Все величины в системе (1) переведены в безразмерные.

Граничные условия:

$$V_l(0, t) = V_l(L, t) = \frac{\partial \varphi_l(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_l(L, t)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$



Вторая глава: Численный подход

Численное решение системы (1-3).

- Вводится равномерная дискретная сетка по пространственной координате x с шагом Δx и по координате времени t с шагом Δt .
- Для аппроксимации производных по пространственной координате используются стандартные трех-точечные конечно-разностные формулы.
- Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно значений разностей фаз и напряжений в узлах дискретной сетки по x решается численно с использованием метода Рунге-Кутты (РК) четвертого порядка.

При моделировании ВАХ имитируется эффект включения/выключения источника тока, поэтому сначала происходит увеличение значений тока до заданного значения, а затем уменьшение до 0. Для каждого значения тока решается задача (1-3), начальные условия соответствуют решению для предыдущего значения тока. Далее вычисляется ВАХ по следующей схеме:

На каждом шаге для каждого l по времени вычисляется интеграл

$$\bar{V}_l(t) = (1/L) \int_0^L V_l(x, t) dx$$

с использованием формулы Симпсона.

Далее вычисляется интеграл

$$\langle V_l \rangle = 1 / (T_{max} - T_{min}) \int_{T_{min}}^{T_{max}} \bar{V}_l(t) dt$$

на основе метода прямоугольников

Далее напряжение суммируется по числу контактов

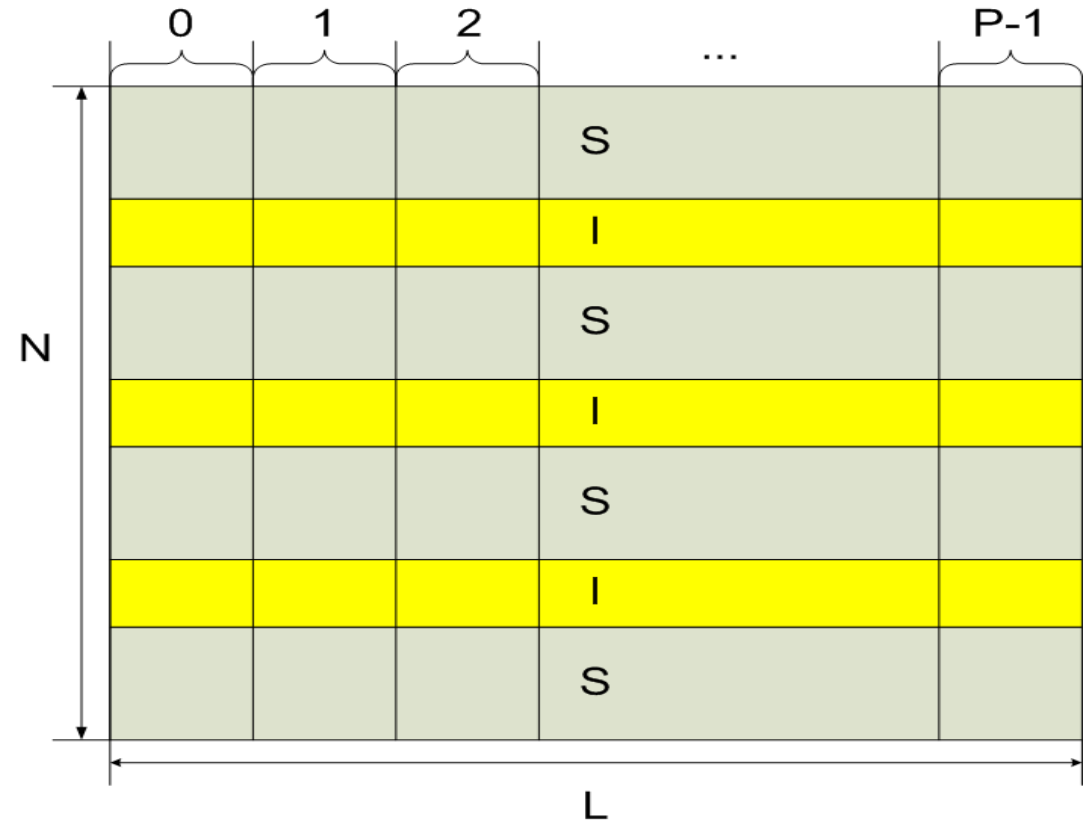
$$\langle V \rangle = \sum_{l=1}^N \langle V_l \rangle$$



Вторая глава: Схема распараллеливания

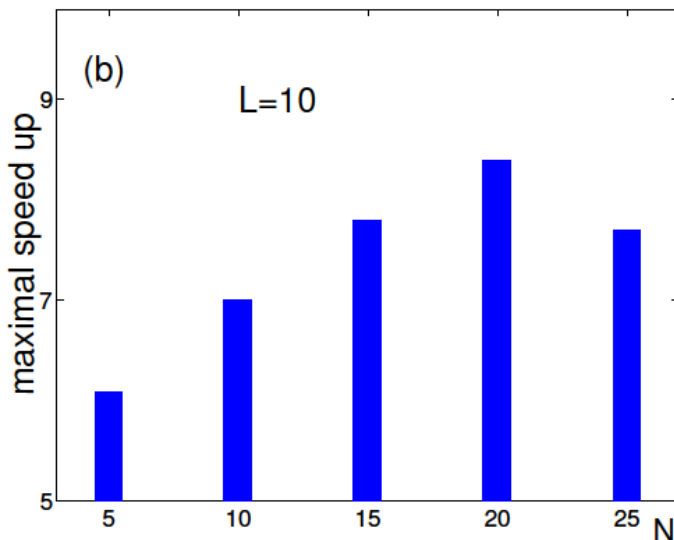
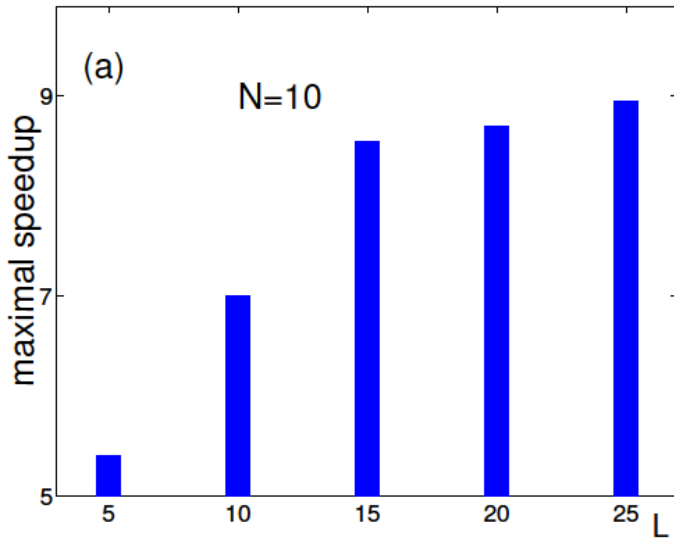
Расчет ВАХ происходит рекурсивно. Разработанный параллельный алгоритм основан на блочном распределении вычислений по узлам дискретной сетки по координате x при решении задачи (1-3) для каждого фиксированного значения тока.

- Каждому из задействованных в расчете параллельных MPI-процессов назначается своя порция узлов дискретной сетки по координате. Каждый процесс в назначенных ему узлах в параллельном режиме вычисляет рекурсивно коэффициенты Рунге-Кутты и затем решения системы уравнений.
- После расчета каждого из коэффициентов Рунге-Кутты происходит обмен значениями между соседними процессами.
- При расчете ВАХ сначала каждым процессом вычисляются частичные суммы в соответствии с формулой Симпсона, далее производится сборка в O_i процесс, где и осуществляются окончательные вычисления ВАХ и запись в файлы.
- При необходимости аналогичным образом осуществляются расчеты других физических характеристик стека ДДП.
- Дополнительно оценена применимость к данной схеме инструкций векторизации AVX-512.

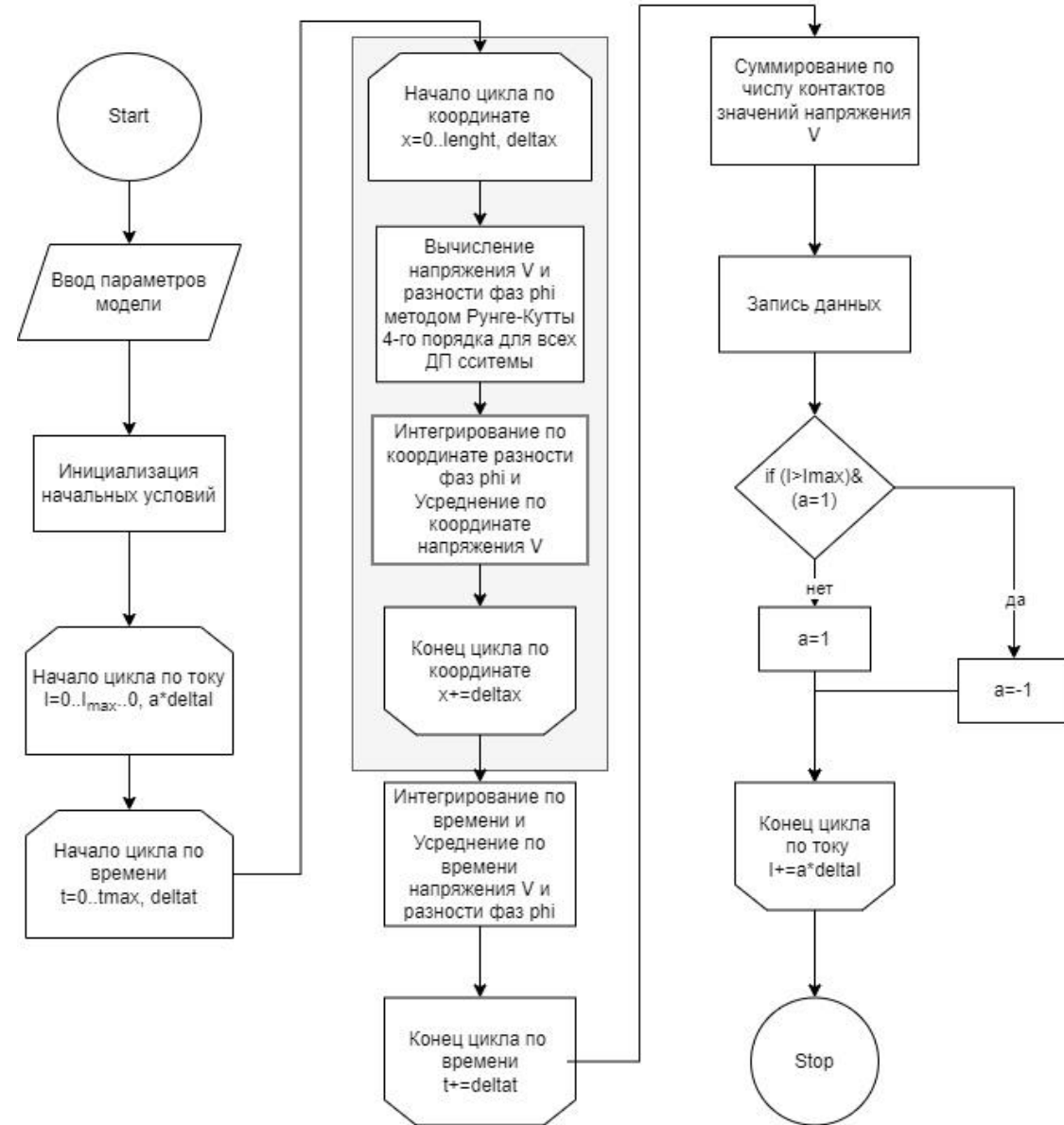




Вторая глава: Параллельная реализация

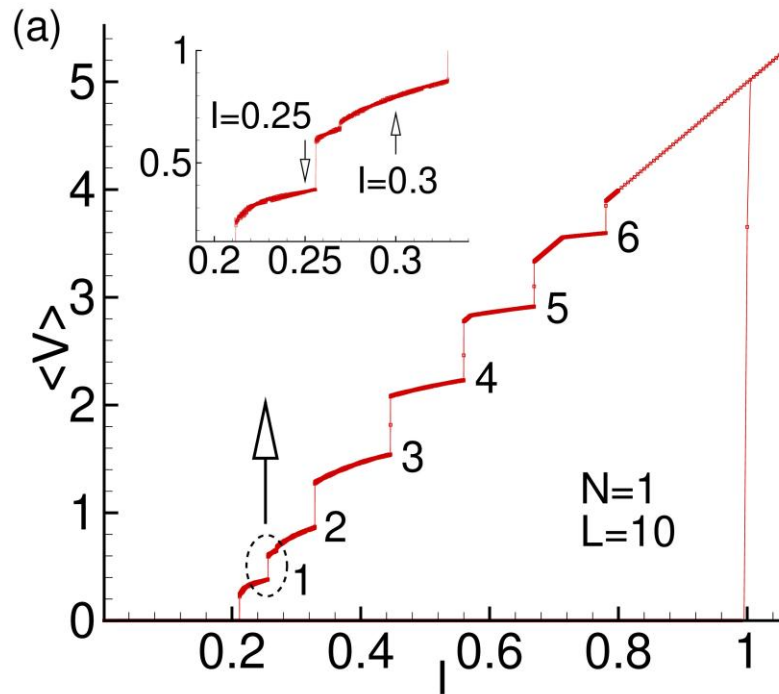


Максимально достигаемое при расчетах на ЦИВК ускорение в зависимости (a) от длины ДП и (b) от числа ДП, рассчитанное как отношение времени счета в однопроцессорном режиме к минимальному времени счета, возможному для данного набора параметров при расчетах в параллельном режиме.



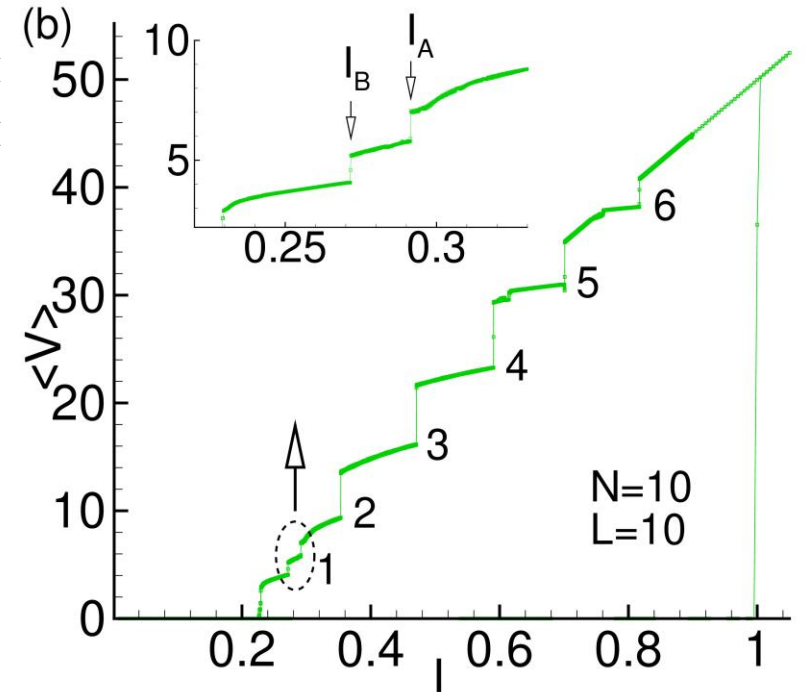


Вторая глава: Исследование влияния емкостной и индуктивной связи на структуру ВАХ (1/3)



Однопетлевые ВАХ для одиночного ДП (a) и для стека ДП (b).

Параметры счета: $L=10$,
 $N=10$, $I_{min}=0.01$, $I_{max}=1.1$,
 $\Delta I=0.005$, $\Delta x=0.1$,
 $t_{max}=200$, $\Delta t=\Delta x/5$,
 $S=-0.05$, $s_c=-0.05$.



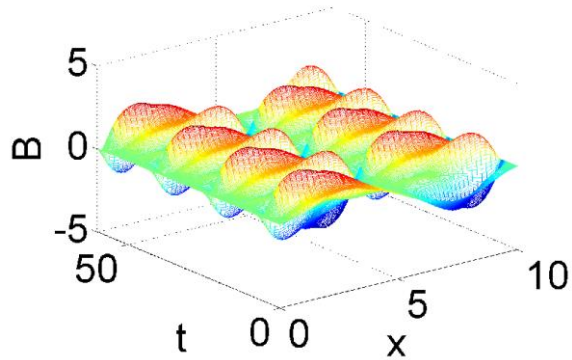
На вставке к рисунку (b) в крупном масштабе показана область ВАХ, соответствующая однофлюксонному и двухфлюксонному состояниям. При $I_A=0.2915$ система переходит из состояния с двумя флюксонами в состояние, соответствующее дополнительной ветви, из которого она переключается в состояние с одним флюксонном при $I_B=0.2717$. В случае одиночного ДП в указанной области ветвление ВАХ не наблюдается, о чем свидетельствует вставка к рисунку (a).



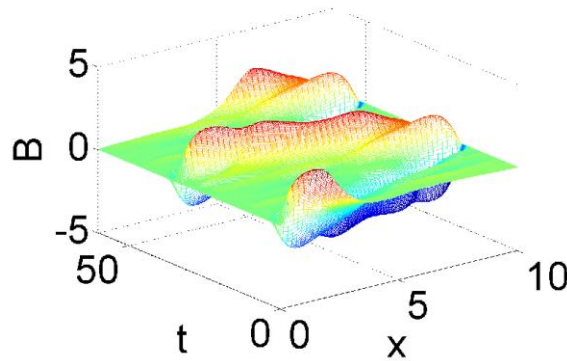
Вторая глава: Исследование емкостной и индуктивной связи на структуру ВАХ (2/3)

Для того, чтобы понять причину ветвления, был проведен анализ пространственно-временных зависимостей магнитного поля B и разности фаз ϕ в различных точках ВАХ в системе связанных ДП. На рисунках демонстрируется динамика изменения числа флюксонов на контактах стека: (a) справа от точки I_A ; (b) внутри интервала $[I_B, I_A]$, соответствующего новой ступеньке; (c) слева от точки I_B .

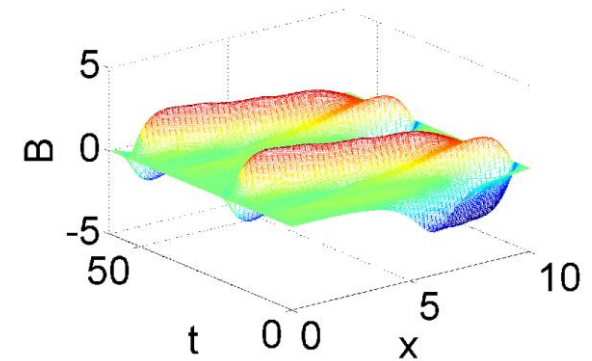
(a) $N=10, I=0.295, J1$



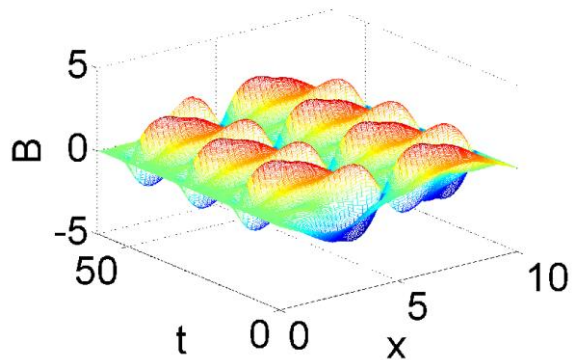
(b) $N=10, I=0.285, J1$



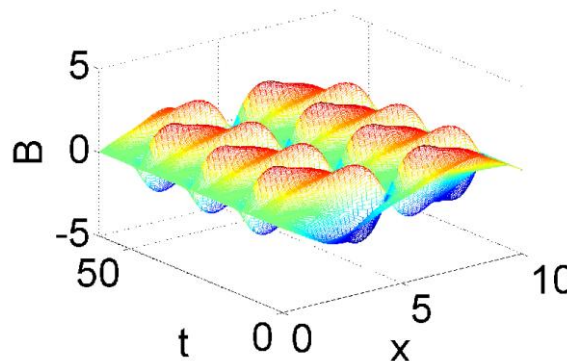
(c) $N=10, I=0.26, J1$



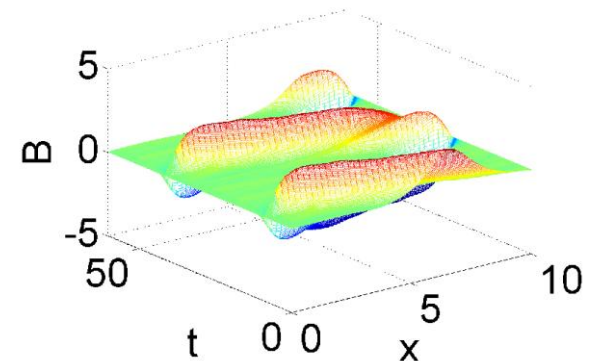
$N=10, I=0.295, J2$



$N=10, I=0.285, J2$



$N=10, I=0.26, J2$





Вторая глава: Влияние емкостной и индуктивной связи на электромагнитное излучение системы ДП (1/3)

Для отдельного ДП вводится импеданс излучения Z , связывающего локальную переменную часть электрического поля E_{ac} и магнитного поля H_{ac} на краях ДП:

$$Z = \frac{E_{ac}}{H_{ac}}$$

Мощность излучения определяется выражением:

$$\wp = \frac{V_{ac}^2}{R_z}$$

где $V_{ac} = d_f E_{ac}$ и $R_z = (d_f/W)Z$, W - ширина ДП.

При расчете интенсивности когерентного излучения, обусловленного движением флюксонов вдоль длины ДП, граничные условия формулируются с учетом когерентного излучения и имеют следующий вид

$$\frac{d\varphi}{dx}(t, x = 0, L) = V_{ext} \pm \frac{E_{ac}(t, x = 0, L)}{Z}$$

Переменная часть безразмерного электрического поля на краях ДП определяется выражениями:

$$E_{ac}(t, x = 0) = V(t, x = 0) - \langle V \rangle_x(t) \quad E_{ac}(t, x = L) = V(t, x = L) - \langle V \rangle_x(t),$$

где $\langle V \rangle_x(t)$ - усредненное напряжение по координате при фиксированном значении времени.

При вычислении мощности излучения из системы необходимо учитывать потери тока, которые вычисляются как:

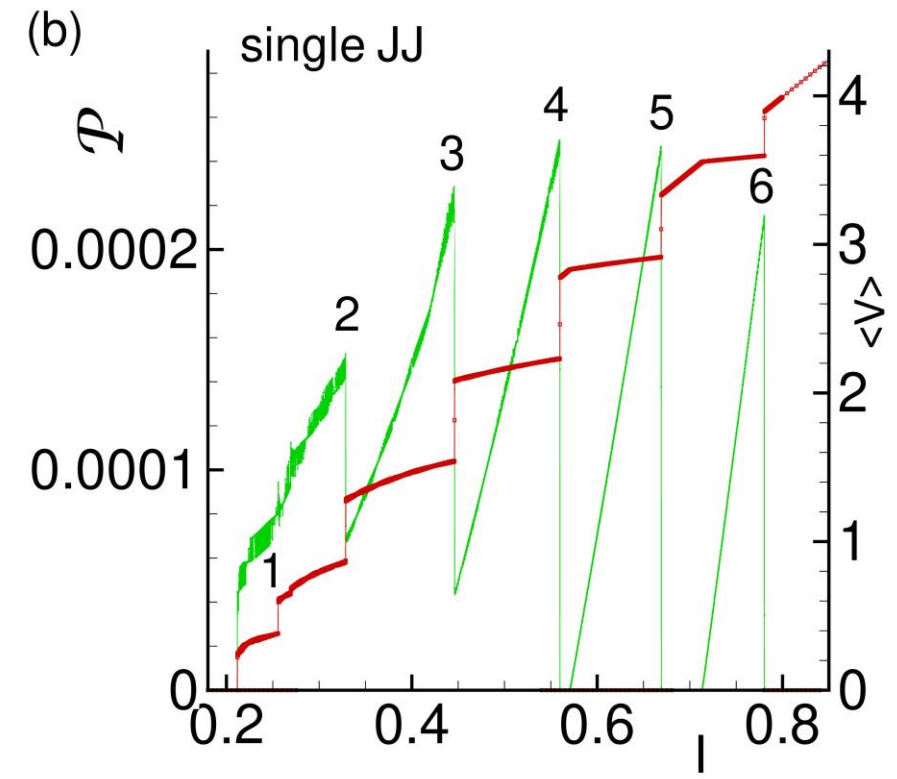
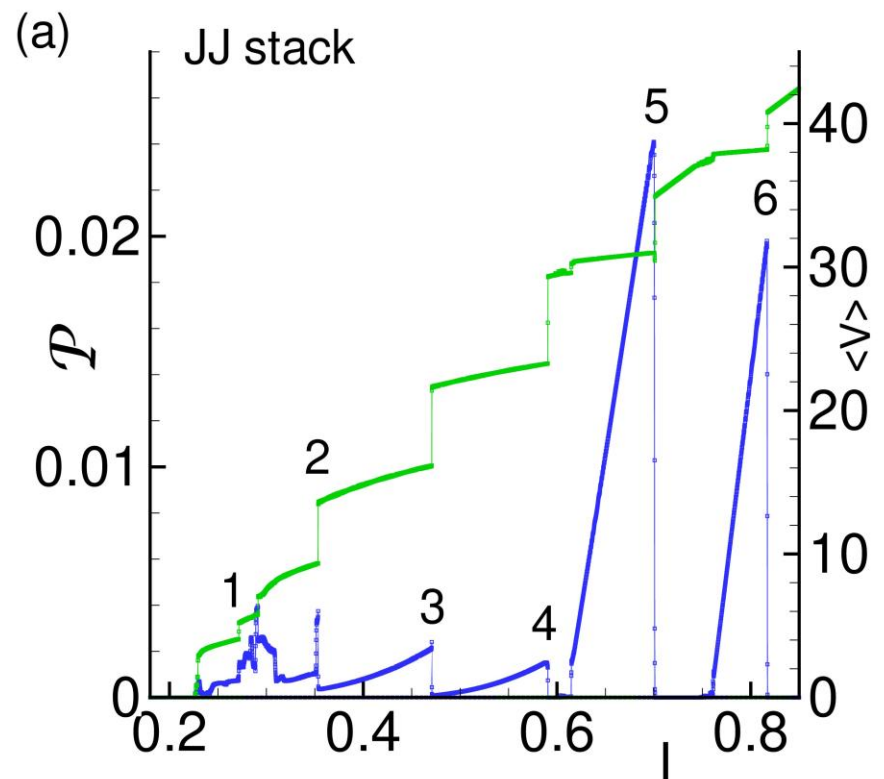
$$\Delta I_{rad}(t, x = 0) = \frac{E_{ac}(t, x = 0)}{Z}, \quad \Delta I_{rad}(t, x = L) = \frac{E_{ac}(t, x = L)}{Z}.$$

Все величины безразмерные. Импеданс излучения Z в расчетах полагали равным 10^6 .



Вторая глава: Влияние емкостной и индуктивной связи на электромагнитное излучение системы ДП (2/3)

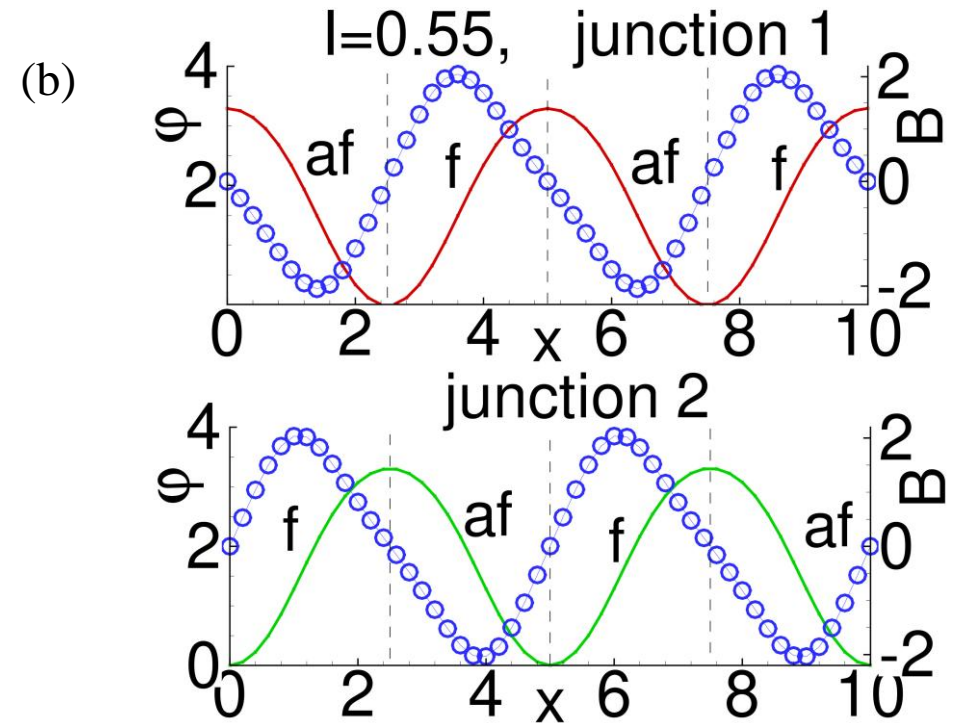
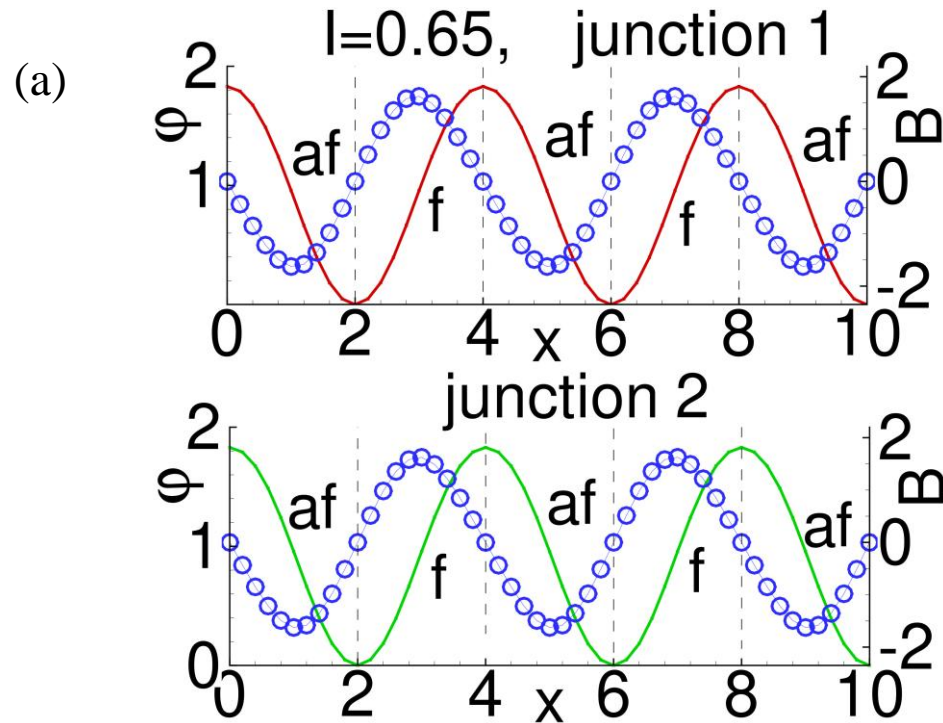
Для того, чтобы оценить влияние связи на когерентное излучение, обусловленное движением флюксонов, рассчитана зависимость мощности излучения от базового тока для одиночного ДП и системы связанных ДП, и проведен сравнительный анализ этих двух случаев.





Влияние емкостной и индуктивной связи на электромагнитное излучение системы ДП (3/3)

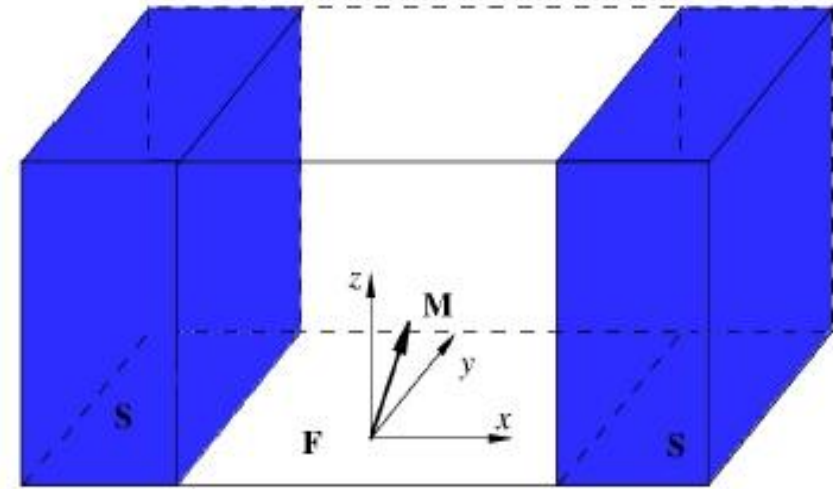
Для объяснения изменения интенсивности излучения при переходах между флюксонными состояниями $n=5$ и $n=4$, нами проведен сравнительный анализ пространственно-временной зависимости разности фаз и магнитного поля в различных ДП системы.



Распределение разности фаз и магнитного поля в первом и втором ДП системы при фиксированном значении времени при $I=0.65$ и $t=11.44$; (b) То же, что и в случае (a), но при $I=0.55$ и $t=5.04$. f - флюксон, af - антифлюксон.



Третья глава: Модель ϕ_0 -перехода



В структурах сверхпроводник-ферромагнит-сверхпроводник (SFS) спин-орбитальная связь в ферромагнитном слое без инверсионной симметрии обеспечивает механизм прямой (линейной) связи между магнитным моментом и сверхпроводящим током. Такие джозефсоновские контакты называются ϕ_0 -переходами.

На рисунке схематично показан одиночный ϕ_0 -переход. S – сверхпроводник, F – ферромагнетик, M – вектор магнитного момента ферромагнитного слоя легкая ось которого направлена вдоль оси z , которая также совпадает с направлением градиента спин-орбитального потенциала. Компонента магнитного момента (ММ) m_y связана с сверхпроводящим (джозефсоновским) током, который направлен вдоль оси x . Импульс внешнего тока направлен вдоль оси x .



Третья глава: Постановка задачи(1/2)

Динамика намагниченности в ферромагнитном слое в φ_0 -джозефсоновском переходе описывается уравнением Ландау-Лившица-Гилберта.

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\frac{\omega_F}{1+\vec{m}^2\alpha^2} \{ [\vec{m} \times \vec{H}] + \alpha [\vec{m}(\vec{m}\vec{H}) - \vec{H}\vec{m}^2] \}, \quad (7)$$

где α – параметр диссипации, ω_F – нормализованная частота ферромагнитного резонанса. Здесь \vec{H} эффективное магнитное поле с компонентами

$$\begin{cases} H_x = 0 \\ H_y = Gr \sin(\varphi(t) - rm_y(t)) \\ H_z = m_z(t) \end{cases} \quad (8)$$

где G – отношение энергии Джозефсона к энергии магнитной анизотропии, r – параметр спин-орбитальной связи, $m_{x,y,z}$ – x,y,z -компоненты магнитного момента \vec{m} .

Начальные условия: $m_x(0)=0$, $m_y(0)=0$, $m_z(0)=1$.



Третья глава: Постановка задачи(2/2)

Джозефсоновская разность фаз φ может быть найдена с помощью уравнения:

$$\frac{d\varphi}{dt} = I_{pulse}(t) - \sin(\varphi - rm_y), \quad (9)$$

Где импульсный ток определяется как:

$$I_{pulse} = \begin{cases} A_s, & t \in [t_0 - 1/2\Delta t, t_0 + 1/2\Delta t] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (10)$$

Здесь A_s – амплитуда импульса тока, Δt – временной интервал, в который подается импульс, t_0 – момент времени максимальной амплитуды импульса.

Таким образом, система уравнений (7) с эффективным полем (8), разностью фаз (9) и импульсом тока (10) описывает динамику φ_0 -перехода.



Третья глава: Метод численного исследования и параллельная реализация

Задача (7-10) представляет собой задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Расчеты проводились двумя способами: на основе четырехшагового метода Рунге-Кутты и на основе двухшагового метода Гаусса-Лежандра.

Метод Гаусса-Лежандра требует большего объема вычислений по сравнению с методом Рунге-Кутты, однако в данной задаче, является более устойчивым при определенных значениях параметров с точки зрения сохранения условия нормировки по сравнению с методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

Расчет сводится к множественному решению задачи Коши, в широком диапазоне параметров, что приводит к увеличению затрат компьютерного времени.

Время выполнения последовательной C++ программы по моделированию доменов переворота магнитного момента на плоскости (G, r) составило 25 минут.

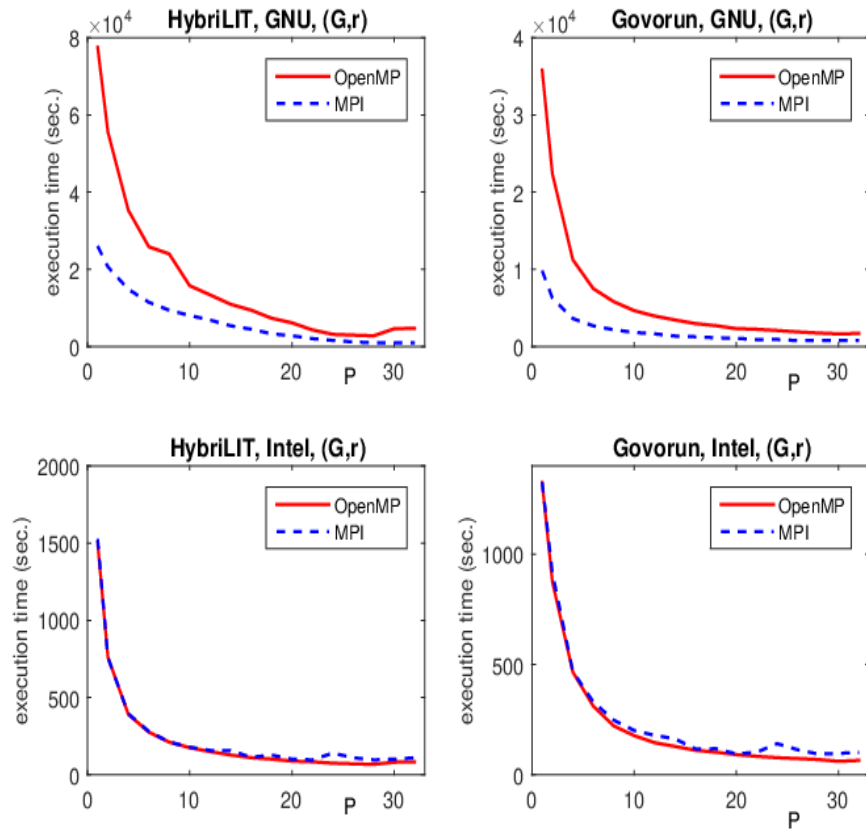
Для повышения производительности вычислений были разработаны параллельные версии программ на основе технологий MPI и OpenMP. В основе обеих версий лежит язык программирования C++.

Распараллеливание основано на распределении точек плоскости (G, r) между параллельными процессами/нитеями. Значения G, r в которых выполняется условие $|m_z(T_{max})+1| < \epsilon$ сохраняются в структуру и записываются в выходной файл.

Аналогичная схема распараллеливания использована при моделировании других плоскостей.

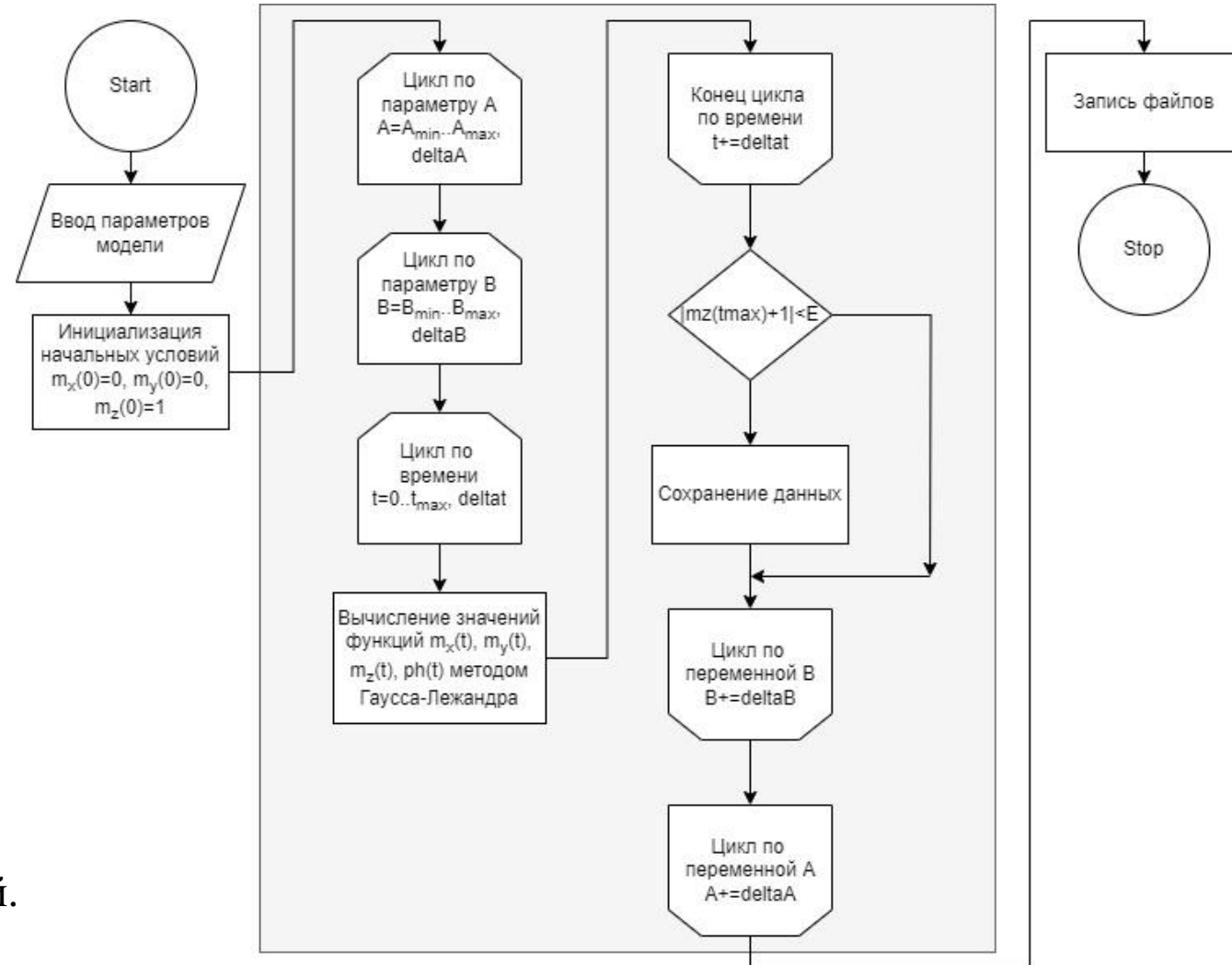


Третья глава: Параллельная реализация



Время вычисления в зависимости количества MPI-процессов / OpenMP нитей.

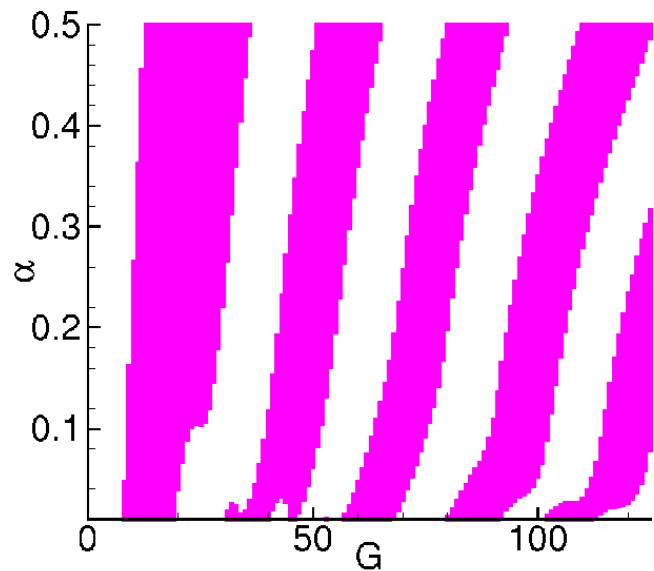
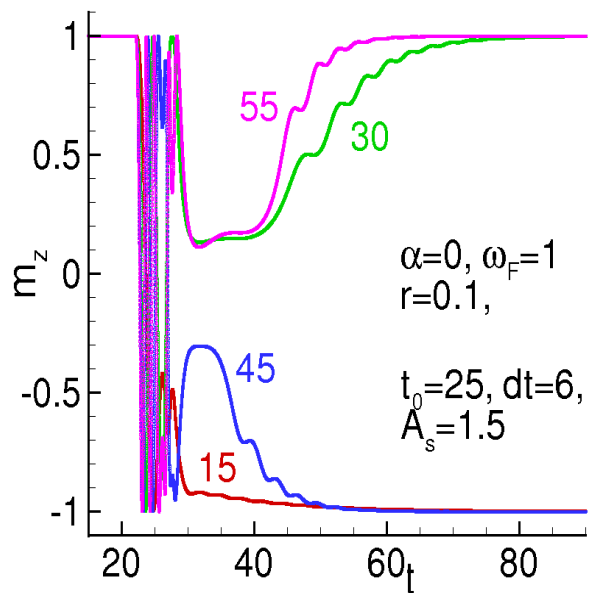
Вычисления выполнены на платформе HybriLIT



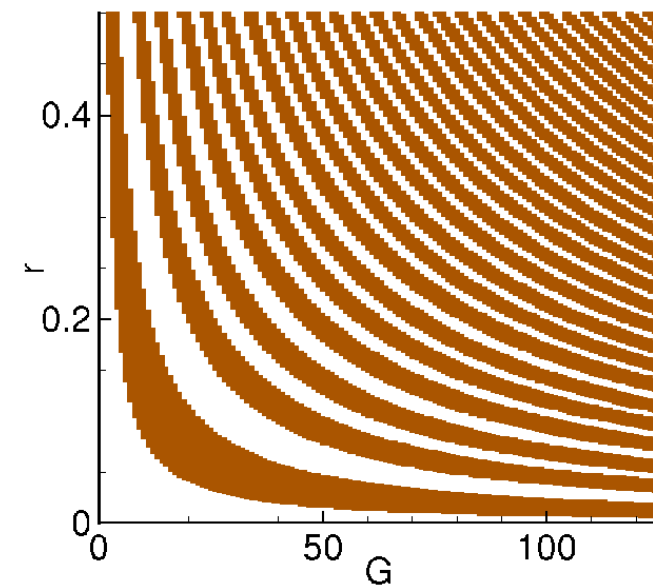


Третья глава: Переворот магнитного момента (1/3)

Переворот магнитного момента – это эффект когда m_z -компонента магнитного поля меняет свое значение на -1 при изначальном значении $+1$. Рисунок слева показывает временную зависимость m_z -компоненты при различных значениях G :



Демонстрация периодичности интервалов переворота в плоскости (G, α) . Результаты получены с шагом $\Delta G=1$ и $\Delta \alpha=0.001$ при $A_s=1.5$, $r=0.1$, $t_0=25$, $\Delta t=6$.



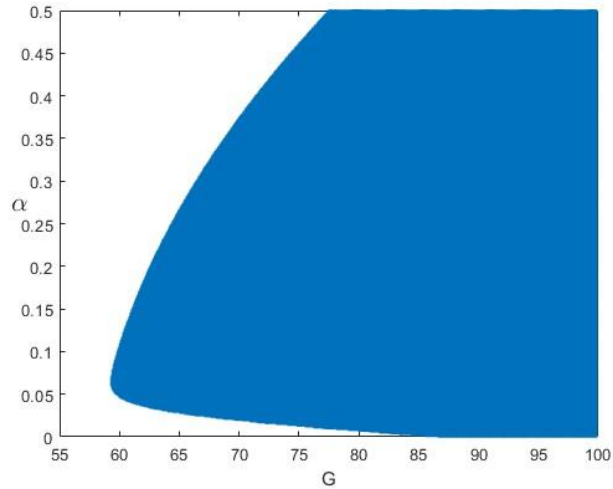
Демонстрация периодичности интервалов переворота в плоскости (G, r) . Результаты получены с шагом $\Delta G=1$ и $\Delta r=0.001$ при $A_s=1.5$, $\alpha=0.1$, $t_0=25$, $\Delta t=6$.



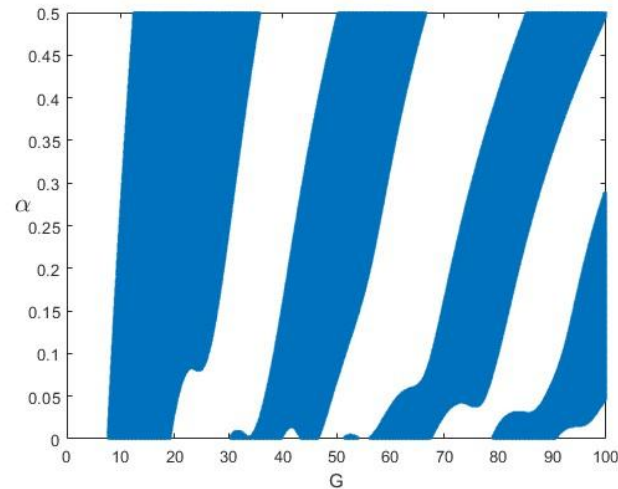
Третья глава: Переворот магнитного момента (2/3)

Рассмотрим теперь зависимость конфигурации интервалов реализации переворота ММ от параметра ω_F (нормированная частота ферромагнитного резонанса). Моделирование на плоскостях (G, α) и (G, r) с использованием различных значений ω_F . Результаты получены с шагом $\Delta G=0.1$, $\Delta \alpha=0.001$, $r=0.1$ для (G, α) и $\Delta G=0.1$, $\Delta r=0.001$, $\alpha=0.1$ для (G, r) при $A_s=1.5$, $t_0=25$, $\Delta t=6$.

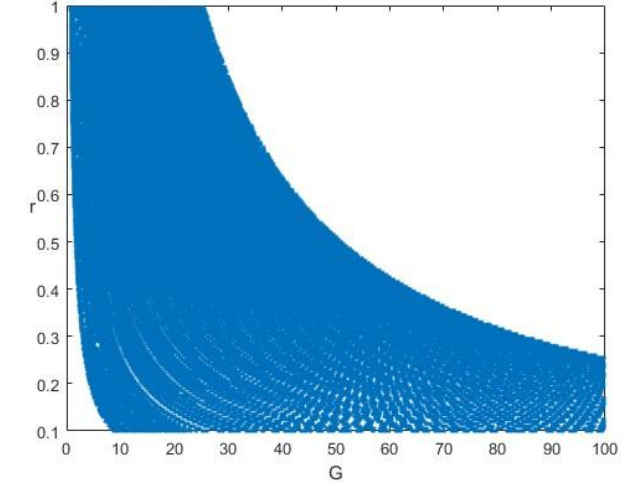
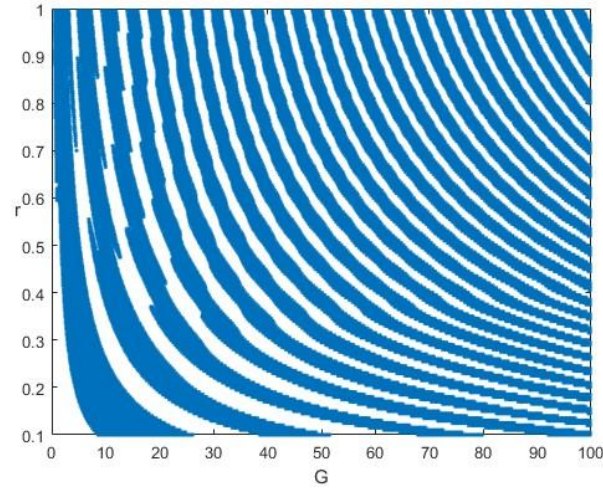
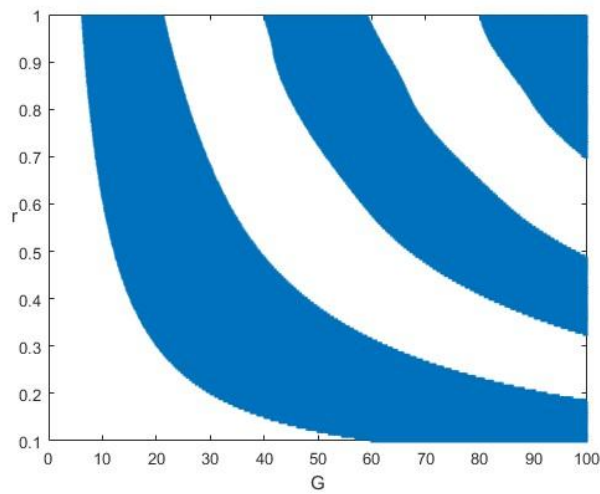
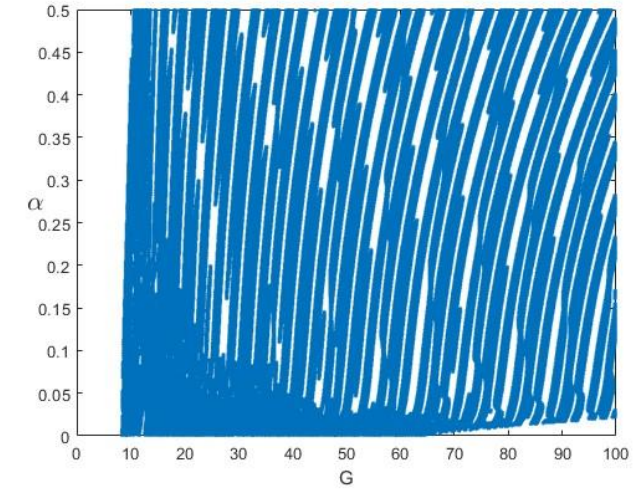
$\omega_F=0.1$



$\omega_F=1$



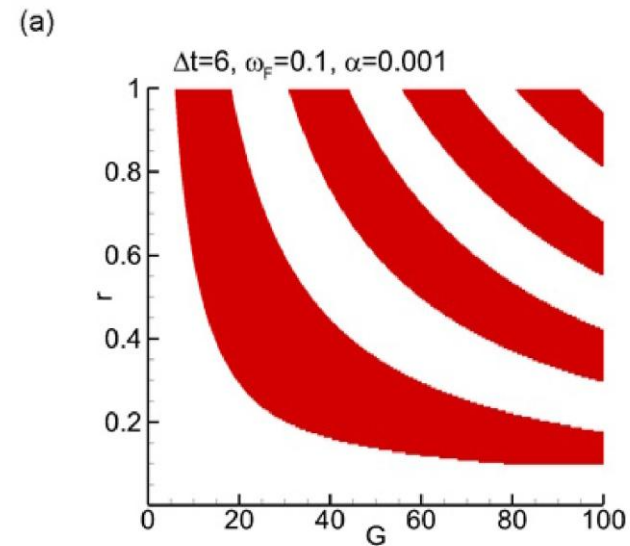
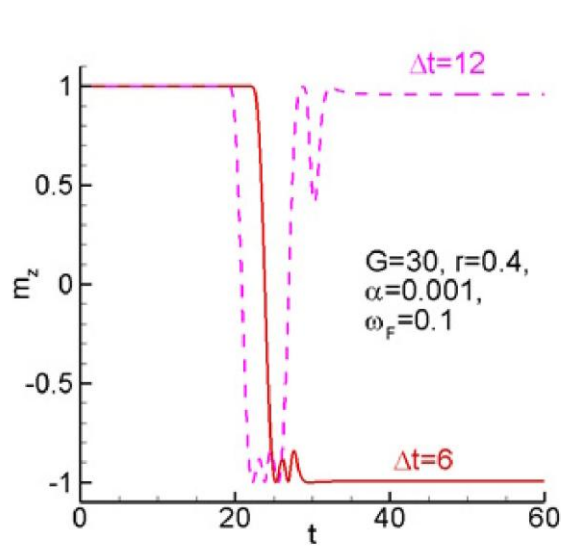
$\omega_F=10$





Третья глава: Переворот магнитного момента (3/3)

Проведено исследование по изучению влияния длительности импульса тока Δt на реализацию переворота ММ в случае малого параметра диссипации ($\alpha=0.001$).



(b) (a) Зависимость m_z от времени для $\Delta t = 6$ (красная сплошная линия) и $\Delta t = 12$ (пунктирная пурпурная линия);

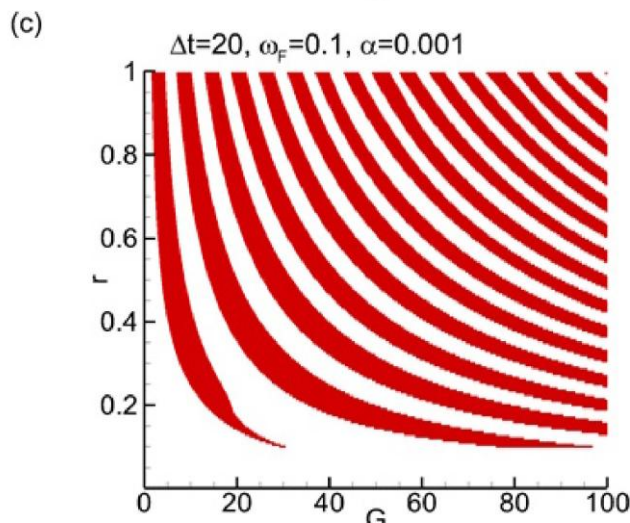
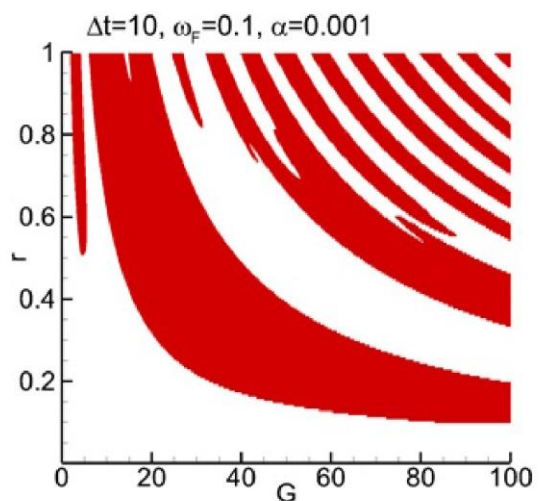
Периодическая структура доменов переворота ММ на плоскости (G, r) для:

(b) $\Delta t = 6$;

(c) $\Delta t = 10$;

(d) $\Delta t = 20$.

Закрашенные полосы указывают места, где реализуется переворот ММ.



(d) Увеличение длительности импульса тока приводит к уменьшению ширины интервалов переворота ММ и увеличению их частоты. Широкий интервал переворота ММ предпочтителен с точки зрения более простой технической реализации в реальном эксперименте.



Заключение (1/2)

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

- Разработан и реализован с использованием языка программирования C++ и технологии MPI параллельный алгоритм для моделирования сверхпроводящих процессов и расчета ВАХ в системе длинных джозефсоновских переходов с учетом емкостной и индуктивной связи между соседними ДП. Реализация параллелизма позволила сократить время выполнения программы до 10 раз.
- Проведенное компьютерное моделирование показало различие в динамике флюксонов в отдельных переходах системы под воздействием связи между соседними контактами, приводящее к усложнению структуры ВАХ и скачкам интенсивности электромагнитного излучения.
- Разработан и реализован с использованием языка программирования C++ и технологий MPI и OpenMP параллельный алгоритм построения доменов переворота ММ на плоскости параметров модели ϕ_0 -перехода со спин-орбитальной связью в ферромагнитном слое, позволивший до 30 раз сократить время расчетов в широком диапазоне параметров.



Заключение (2/2)

- В результате проведенного компьютерного моделирования выявлены особенности периодической структуры интервалов переворота магнитного момента при изменении параметров спин-орбитальной связи, гильбертовского затухания, отношения джозефсоновской энергии к магнитной, времени воздействия импульса тока и нормированной частоты ферромагнитного резонанса.
- Разработанные комплексы программ продолжают активно использоваться для проведения дальнейших исследований. В том числе, программа для моделирования доменов переворота ММ включена в виртуальную среду для математического моделирования сверхпроводящих наноструктур с магнетиком.
- Разработанные комплексы проблемно-ориентированных программ LJJ-CVV-MPI для моделирования вольт-амперных характеристик в системах длинных джозефсоновских переходов и SPIN-Ga/Gr для моделирования переворота магнитного момента в ϕ_0 -переходах переданы в библиотеку компьютерных программ JINRLIB для свободного доступа.



Публикации

1. **Башашин М.В.**, Земляная Е.В., Шукринов Ю.М., Рахмонов И.Р. MPI-реализация численного решения системы уравнений, описывающих модель длинных джозефсоновских переходов. // Системный анализ в науке и образовании, 2015. -№ 4.
2. **Башашин М.В.**, Земляная Е.В., Рахмонов И.Р., Шукринов Ю.М., Атанасова П.Х., Волохова А.В. Вычислительная схема и параллельная реализация для моделирования системы длинных джозефсоновских переходов. // Компьютерные исследования и моделирование, 2016. -т. 8, № 4. -стр.593–604.
3. Rahmonov I.R., Shukrinov Yu.M., Plecenik A., Zemlyanaya E.V., **Bashashin M.V.** Numerical Study of System of Long Josephson Junctions with Inductive and Capacitive Couplings. // EPJ Web of Conferences, 2016. -v.108. -p.02038.
4. Zemlyanaya E.V., **Bashashin M.V.**, Rahmonov I.R., Shukrinov Yu.M., Atanasova P.Kh., Volokhova A.V. Model of stacked long Josephson junctions: Parallel algorithm and numerical results in case of weak coupling, // AIP Conference Proceedings, 2016. -v. 1773. -p. 110018.
5. Рахмонов И.Р., Шукринов Ю.М., Атанасова П. Х., Земляная Е.В., **Башашин М.В.** Вольт-амперные характеристики и электромагнитное излучение в системе длинных джозефсоновских переходов с индуктивной и емкостной связью, // Материалы XX международного симпозиума «Нанопфизика и наноэлектроника», Изд-во Нижегородского государственного университета, 2016. -т. 1. -стр. 105-106.
6. Рахмонов И.Р., Шукринов Ю.М., Атанасова П.Х., Земляная Е.В., **Башашин М.В.** Влияние индуктивной и емкостной связи на вольтамперную характеристику и электромагнитное излучение системы длинных джозефсоновских переходов, // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, 2017. -т.151, №1. -стр. 151-159.



Публикации

7. Атанасова П.Х., Панайотова С.А., Рахмонов И.Р., Шукринов Ю.М., Земляная Е.В., **Башашин М.В.** Периодичность в возникновении интервалов переворота магнитного момента φ_0 -перехода, // Письма в ЖЭТФ, 2019. -т.110, №11. -стр.736-740.
8. **Башашин М.В.**, Земляная Е.В., Шукринов Ю.М., Рахмонов И.Р., Атанасова П.Х., Панайотова С.А. Высокопроизводительное компьютерное исследование эффекта перемагничивания в джозефсоновском φ_0 -переходе в рамках модели спинтроники, // Материалы Всероссийской конференции с международным участием Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем - 2019, -стр. 366-370.
9. Panayotova S., **Bashashin M.**, Zemlyanaya E., Atanasova P., Shukrinov Yu., Rahmonov I. Parallel Numerical Simulation of the Magnetic Moment Reversal within the φ_0 -Josephson Junction Spintronic Model, // European Physics Journal, Web of Conferences, 2020. -v. 226. -p. 02018.
10. **Башашин М.В.**, Земляная Е.В. Сравнительный анализ производительности MPI- и OpenMP-программ на примере параллельных расчетов в рамках модели ядро-ядерного потенциала и модели φ_0 -спинтроники, // Современные информационные технологии и ИТ-образование, 2022. -т. 18, № 3. -стр. 545-557.
11. **Bashashin M.**, Zemlyanaya E., Rahmonov I. Parallel simulation of the magnetic moment reversal within the φ_0 -Josephson Junction model, // Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters, 2023. -v. 12, No. 5. -p. 1157-1160.
12. **Башашин М.В.**, Рахмонов И.Р., Земляная Е.В. Численное исследование влияния индуктивной связи на вольт-амперную характеристику в системе длинных джозефсоновских переходов, // Материалы Всероссийской конференции с международным участием Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем - 2024. -стр. 341-346.
13. **Bashashin M.V.**, Zemlyanaya E.V., Rahmonov I.R. Simulation of the magnetization reversal effect depending on the current pulse duration within the φ_0 -Josephson junction model using MPI and OpenMP parallel computing techniques, // Physics of Particles and Nuclei, 2024. -v. 55, No. 3. -p. 498–501.



Спасибо за внимание