



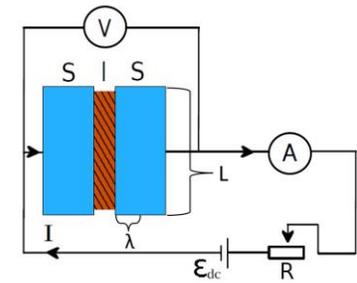
Численное исследование сверхпроводящих процессов в моделях джозефсоновских структур

м.н.с. Башашин М.В.

Дубна, 2024



Введение (1/2)



- Понятие «эффект Джозефсона» описывает совокупность явлений, возникающих в контактах двух сверхпроводников через слабую связь.
- Изучение процессов, протекающих в джозефсоновских структурах, является одной из актуальных тем в физике конденсированных сред.
- Интерес к математическому моделированию физических процессов в стеках длинных джозефсоновских переходов (ДДП) обусловлен, помимо необходимости получения фундаментальных знаний о свойствах слоистых джозефсоновских структур, открывающейся перспективой практических приложений.
- Большинство физических процессов, происходящих внутри ДДП, отражается на ее вольт-амперной характеристике (ВАХ). Примером можно назвать появление ступеньки Шапиро на ВАХ, свидетельствующее о захвате внешним излучением джозефсоновской частоты, а также ступенек нулевого поля, обусловленных наличием флюксонов в длинном ДДП.
- 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 ДДП называют ϕ_0 -переходами. Возможность контроля магнитных свойств сверхпроводящим током, а также влияние магнитной динамики на сверхпроводимость интенсивно исследуется.
- Помимо фундаментальных исследований большое значение имеет также и практическое применение эффекта Джозефсона в первую очередь в микроэлектронике.



Введение (2/2)

В данном докладе представлены методы, комплексы программ и результаты численного исследования физических процессов, протекающих под действием различных факторов в системах джозефсоновских структур полученные на протяжении последних 9 лет.

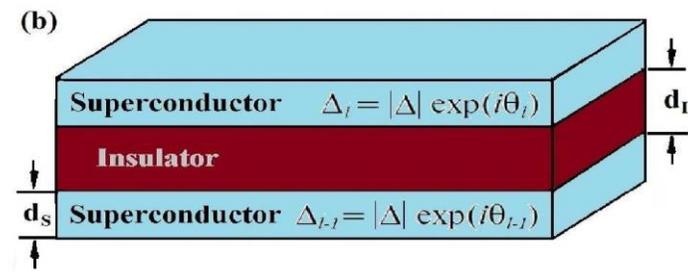
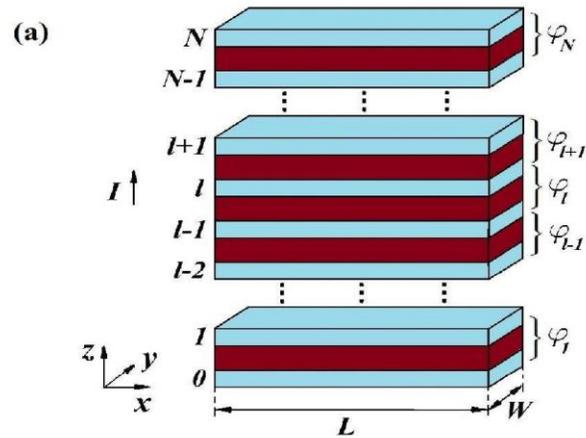
Проведено исследование следующих моделей.

- Первая модель описывает систему 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.
- Вторая модель - это модель точечного аномального ДП с учетом спин-орбитальной и ферромагнитной связи, так называемого ϕ_0 -перехода. Здесь основной задачей численного моделирования было выявление интервалов параметров, где происходит переворот магнитного момента, и изучение влияния различных факторов на конфигурацию периодической структуры доменов переворота.

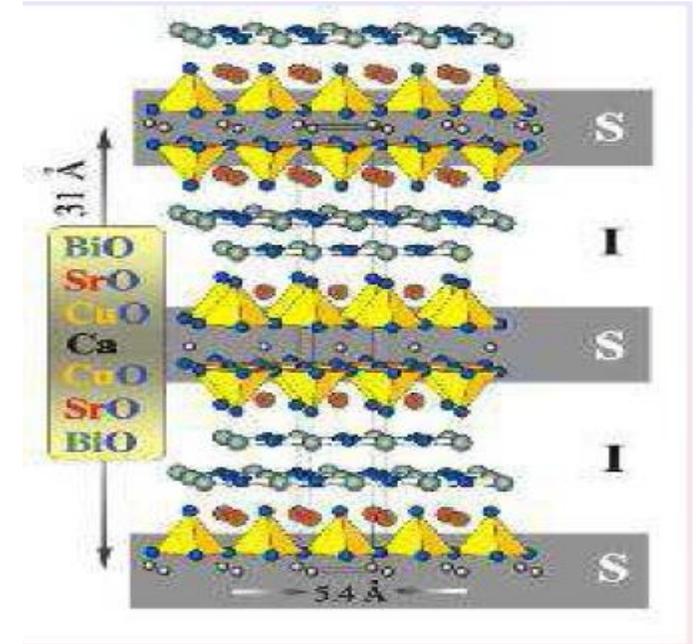
Обе модели описываются многопараметрическими системами нелинейных дифференциальных уравнений. Численные исследования характеризуются значительным объемом вычислений и требуют применения методов и технологий параллельных вычислений для организации высокопроизводительного компьютерного моделирования.



Модель системы длинных джозефсоновских переходов



Рассматривается обобщенная модель, учитывающая индуктивную и емкостную связь между ДП. Система связанных ДДП предполагается состоящей из сверхпроводящих слоев с промежуточными диэлектрическими слоями длины L .



Структура природного кристалла $\text{Bi}_2\text{Cr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$

- (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.



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:

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



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.



Численный подход к построению ВАХ

При моделировании ВАХ имитируется эффект включения/выключения источника тока, поэтому при сначала происходит увеличение значений тока до заданного значения, а затем уменьшение до 0. Для каждого значения тока вычисляется ВАХ по следующей схеме:

На каждом шаге по времени вычисляется интеграл

$$\bar{V}_l(t) = (1/L) \int_0^L V_l(x, t) dx \quad (4)$$

с использованием формулы Симпсона.

Далее вычисляется интеграл

$$\langle V_l \rangle = 1 / (T_{max} - T_{min}) \int_{T_{min}}^{T_{max}} \bar{V}_l(t) dt \quad (5)$$

на основе метода прямоугольников и, наконец, напряжение усредняется по числу контактов

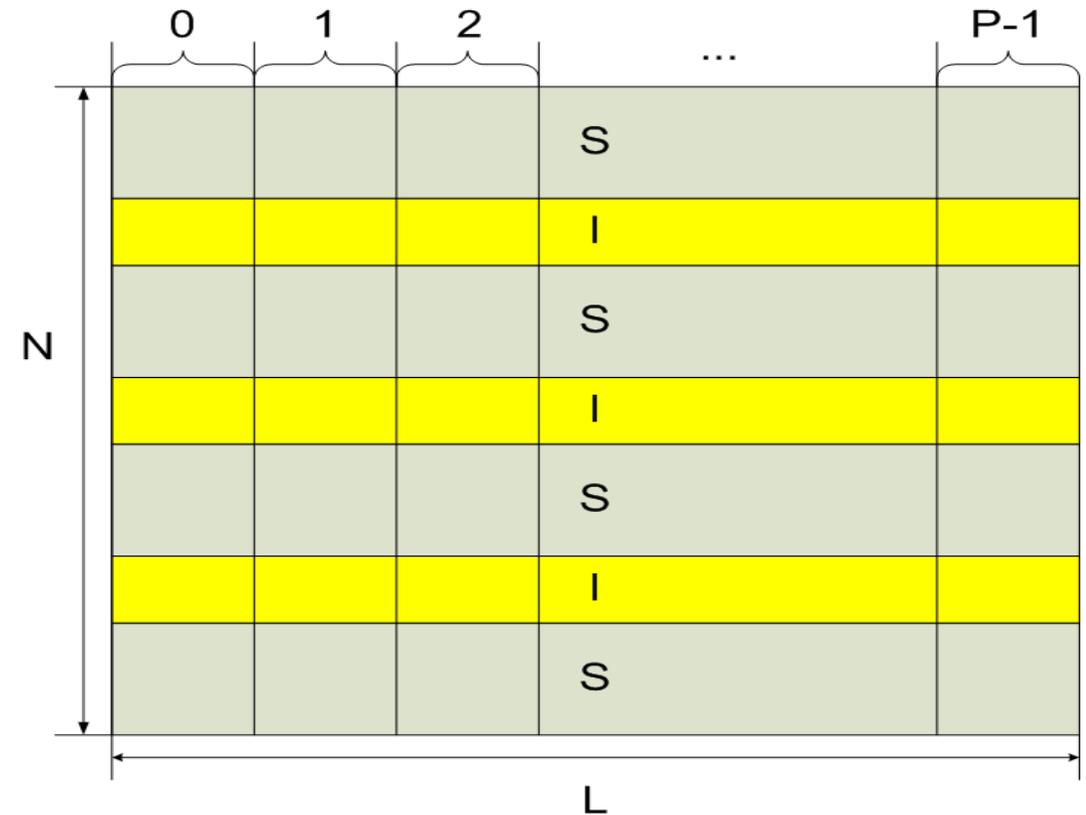
$$\langle V \rangle = \sum_{l=1}^N \langle V_l \rangle \quad (6)$$



Схема распараллеливания

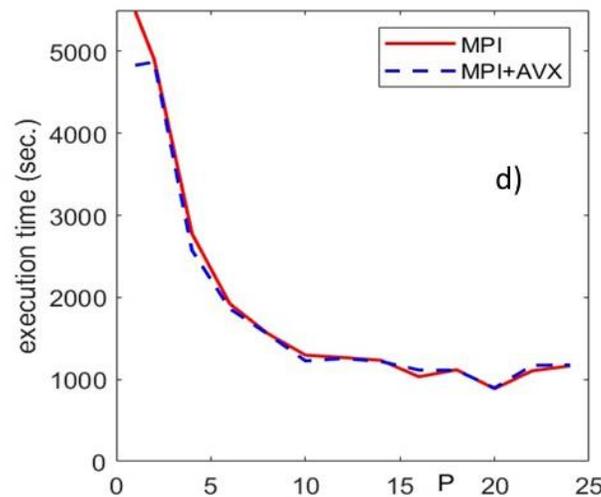
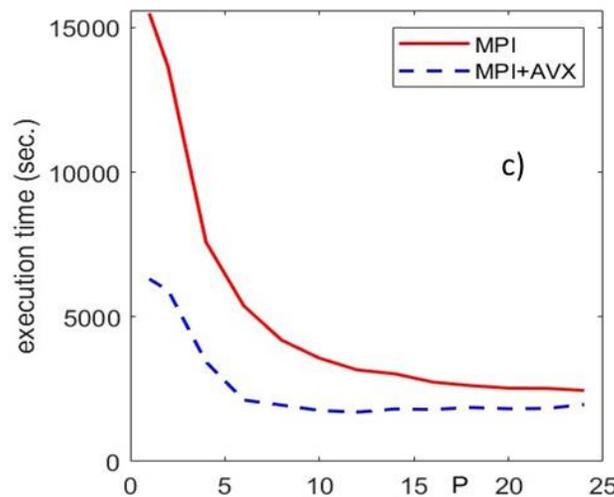
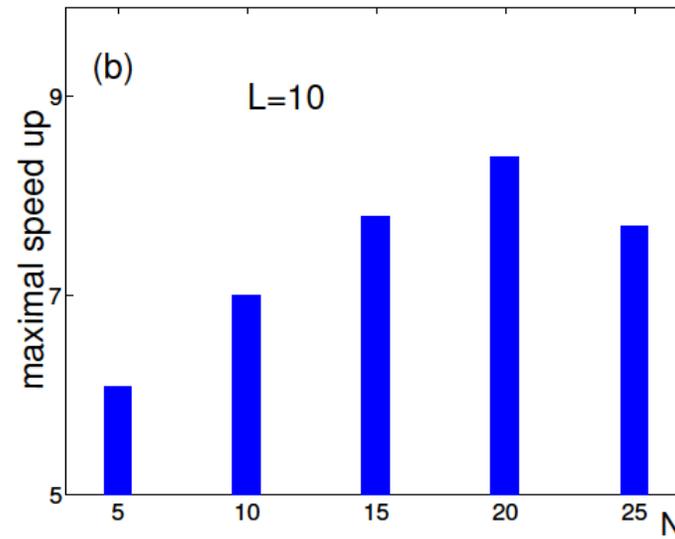
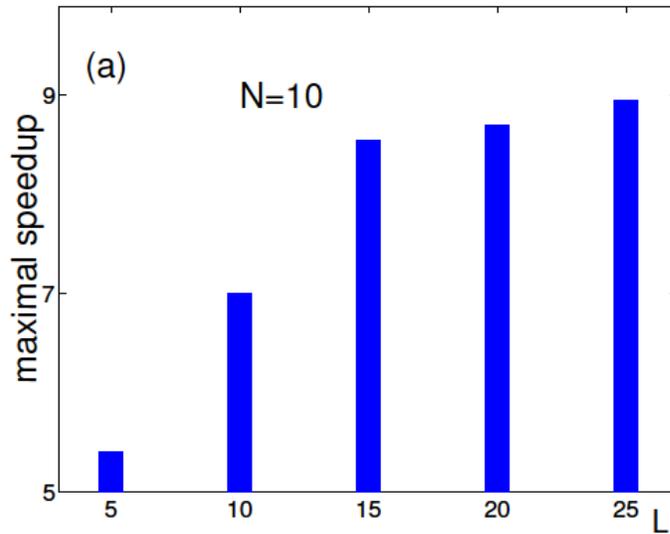
Разработанный параллельный алгоритм основан на распределении вычислений по узлам дискретной сетки по координате x вдоль длины контакта.

- 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 4 коэффициента Рунге-Кутты и затем решения системы уравнений.
- После расчета каждого из коэффициентов Рунге-Кутты происходит обмен значениями между соседними процессам.
- При расчете ВАХ сначала каждым процессом вычисляются частичные суммы в соответствии с формулой Симпсона, далее производится сборка в 0й 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.





Параллельная реализация

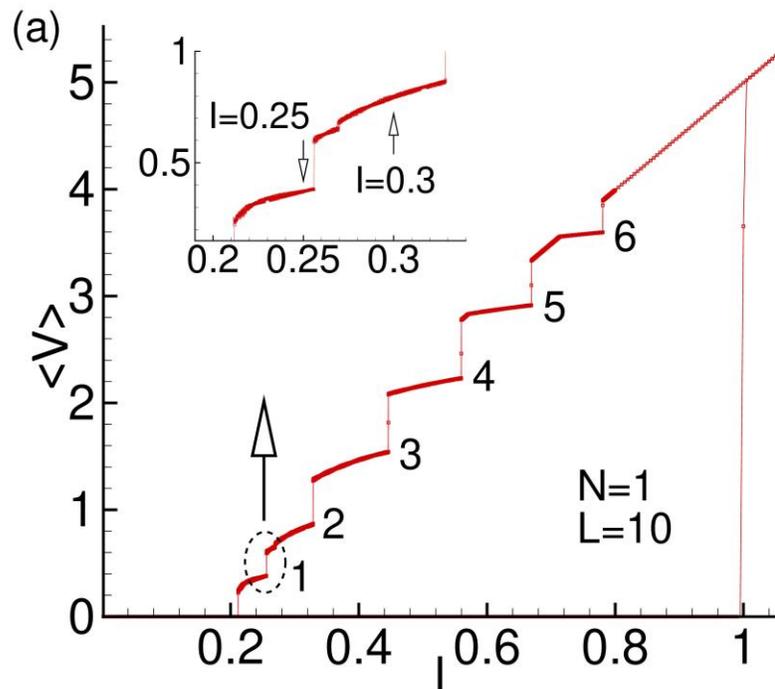


Максимально достигаемое при расчетах на ЦИВК ускорение в зависимости (a) от длины ДП и (b) от числа ДП, рассчитанное как отношение времени счета в однопроцессорном режиме к минимальному времени счета, возможному для данного набора параметров при расчетах в параллельном режиме.

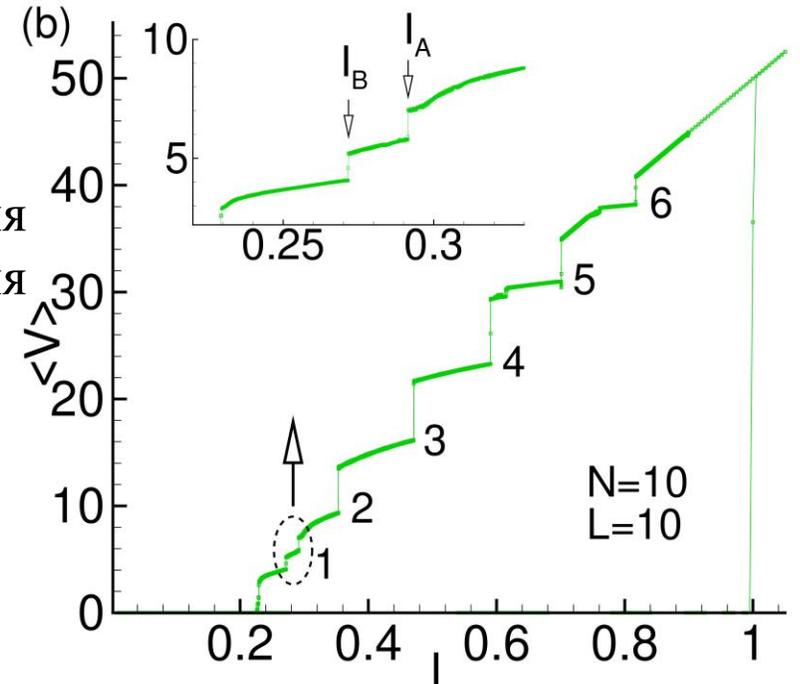
Время работы параллельной MPI-программы в зависимости от количества P задействованных параллельных MPI-процессов с использованием и без использования AVX-512 при длине контакта $L=25$ и количестве узлов дискретной сетки $M=5 \cdot 10^3$ для случая $N=1$ (c) и для случая $N=10$ (d). Расчеты выполнены на суперкомпьютере «Говорун».



Исследование влияния емкостной и индуктивной связи на структуру ВАХ (1/4)



Однопетлевые ВАХ для одиночного ДП (а) и для стека ДП (б).



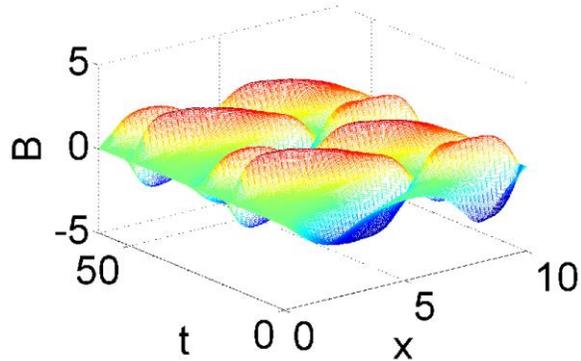
На вставке к рисунку (b) в крупном масштабе показана область ВАХ, соответствующая однофлюксонному и двухфлюксонному состояниям. При $I_A=0.2915$ система переходит из состояния с двумя флюксонами в состояние, соответствующее дополнительной ветви, из которого она переключается в состояние с одним флюксонном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



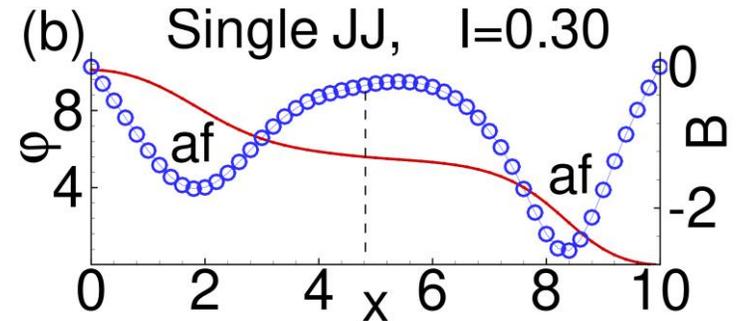
Исследование емкостной и индуктивной связи на структуру ВАХ (2/4)

Для того, чтобы понять причину ветвления, был проведен анализ пространственно-временных зависимостей магнитного поля B и разности фаз ϕ в различных точках ВАХ.

(a) $N=1, L=10, I=0.30$

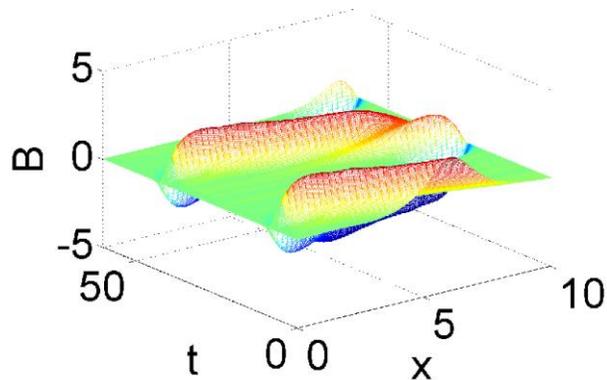


(a) Пространственно-временная зависимость магнитного поля B в одиночном ДП при $I=0.30$;

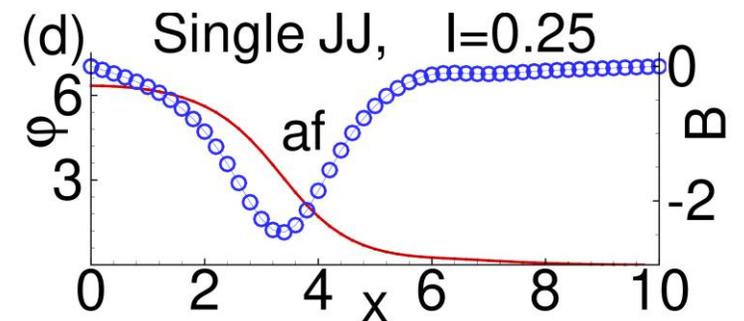


(b) Распределение разности фаз и магнитного поля вдоль оси x при $I=0.3$ при фиксированном времени

(c) $N=1, L=10, I=0.250$



(c) То же, что и в случае (a), но при $I=0.25$;



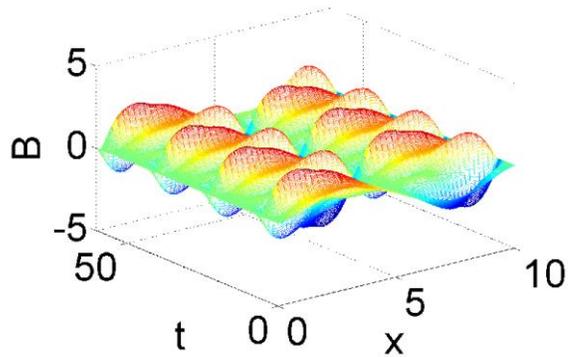
(d) То же, что и в случае (b), но при $I=0.25$ и $t=15.92$.



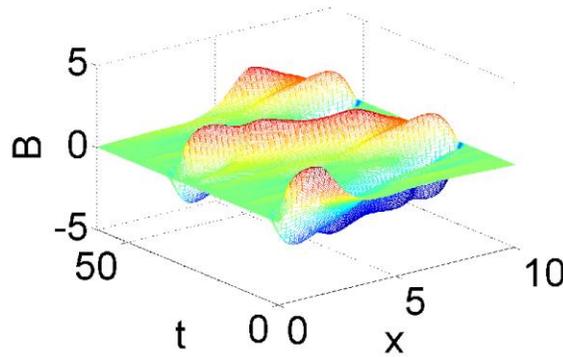
Исследование емкостной и индуктивной связи на структуру ВАХ (3/4)

Теперь обсудим динамику флюксонов в системе связанных ДП. Поскольку интересующее нас ветвление ВАХ наблюдается в интервале $[I_B, I_A]$, целесообразно проследить динамику изменения количества флюксонов на контактах справа от точки I_A интервала $[I_B, I_A]$ и слева от точки I_B .

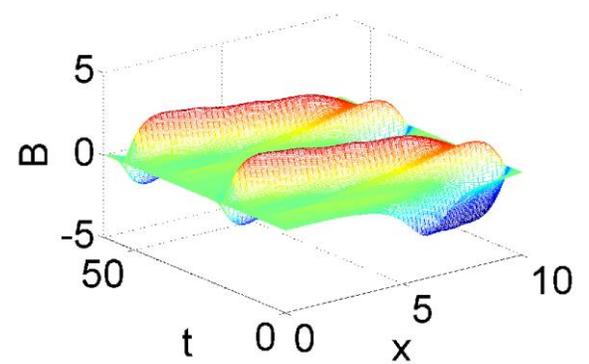
a $N=10, I=0.295, J1$



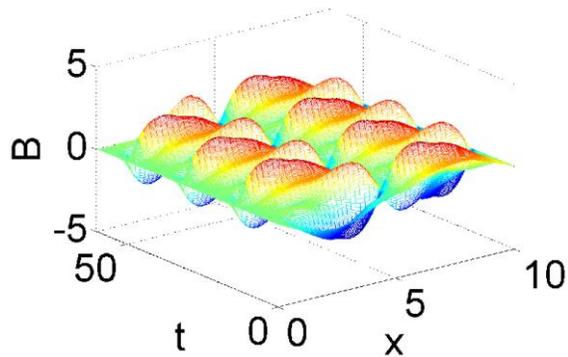
b $N=10, I=0.285, J1$



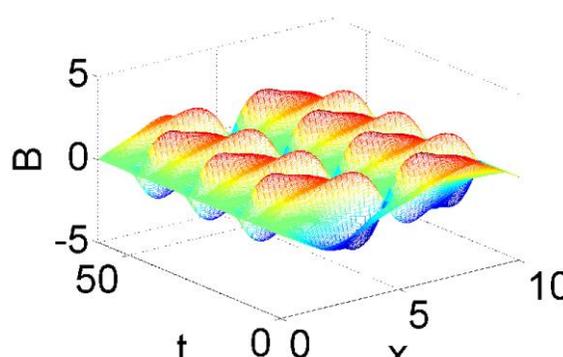
c $N=10, I=0.26, J1$



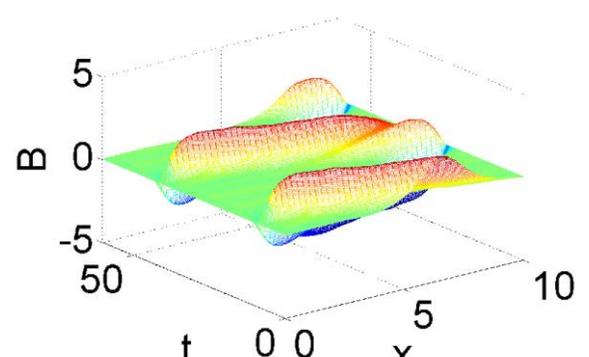
$N=10, I=0.295, J2$



$N=10, I=0.285, J2$



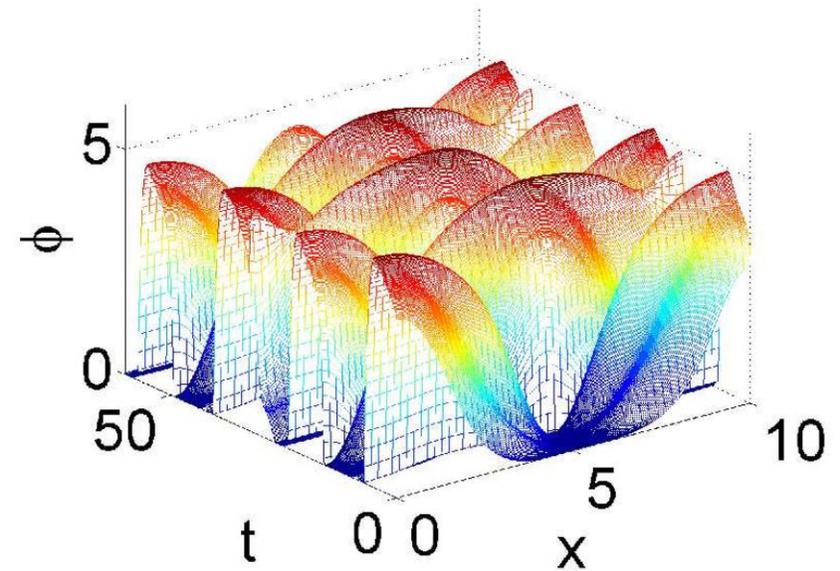
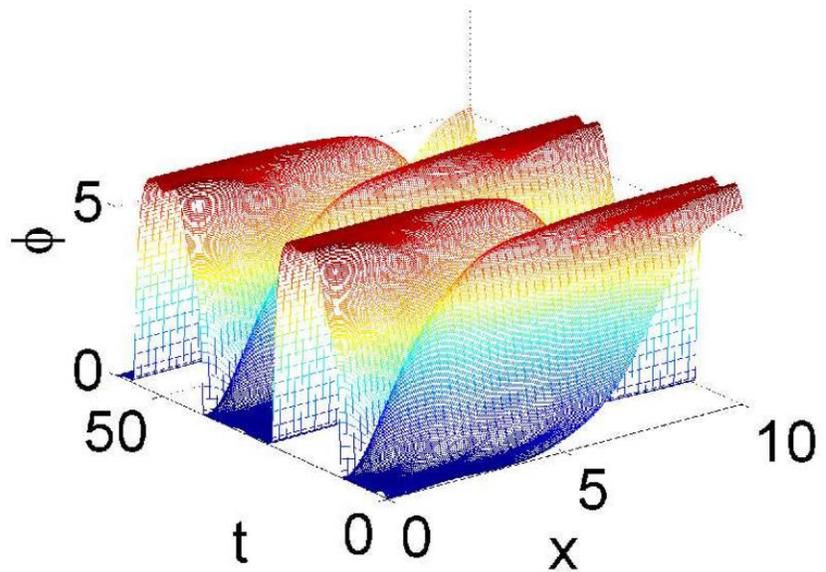
$N=10, I=0.26, J2$





Исследование емкостной и индуктивной связи на структуру ВАХ (4/4)

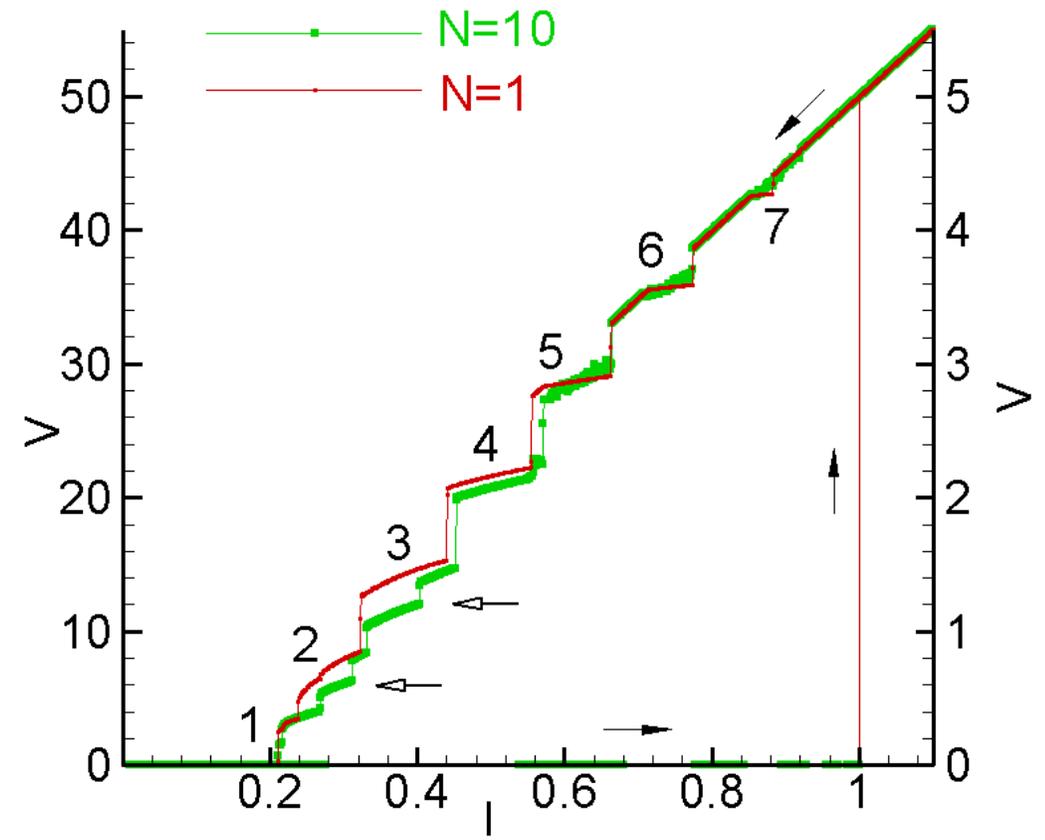
При изменении I , переход в состояние с иным числом флюксонов может происходить не на всех ДП сразу. Так, при $I=0.287$ наблюдается состояние с разным числом флюксонов на ДП с четными номерами: однофлюксонное состояние для $l=2$ (левый рисунок) и двухфлюксонное состояние при $l=8$ (правый рисунок).





Исследование влияния индуктивной связи на структуру ВАХ при отсутствии емкостной

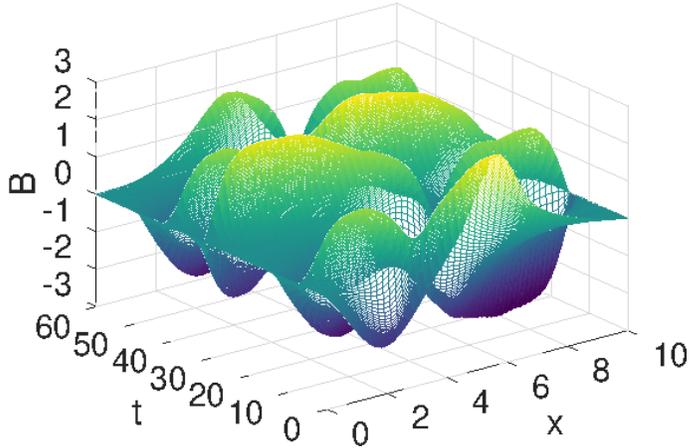
- На рисунке представлены ВАХ, рассчитанные для одиночного (красная тонкая кривая) и системы 10 ДДП (зеленая жирная кривая) с учетом только индуктивной связи.
- При обратном ходе тока на ВАХ наблюдаются так называемые ступеньки нулевого поля, которые связаны с возникновением определенных количеств флюксонов. Для каждой ступеньки указано цифрами число возникающих флюксонов.
- Если сравнивать ВАХ системы ДП с ВАХ одиночного ДП, то можно увидеть, что между ступеньками с 1, 2 и 3 флюксонов в случае системы ДП появляются дополнительные ступеньки, которые показаны полыми стрелками, они возникают из-за наличия индуктивной связи.



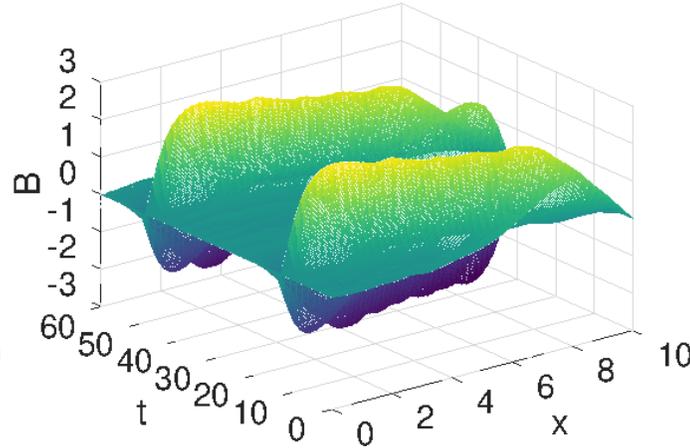


Чтобы понять причину возникновения этих ветвей, рассчитаны пространственно-временные зависимости в каждом ДП системы при значении тока $I=0.27$. $J1, J2, \dots$ – номер ДП в системе, B – величина магнитного поля.

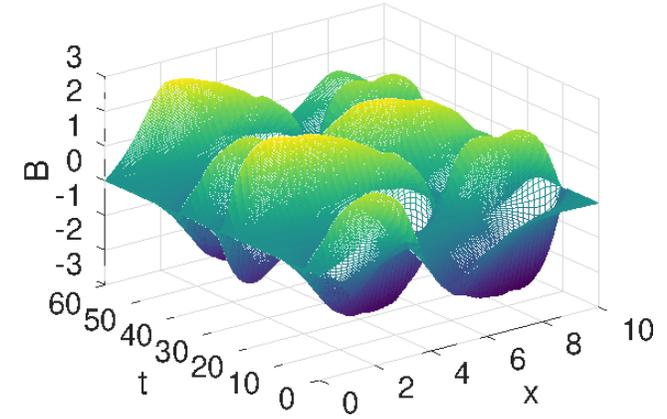
$L=10, I=0.27, J1$



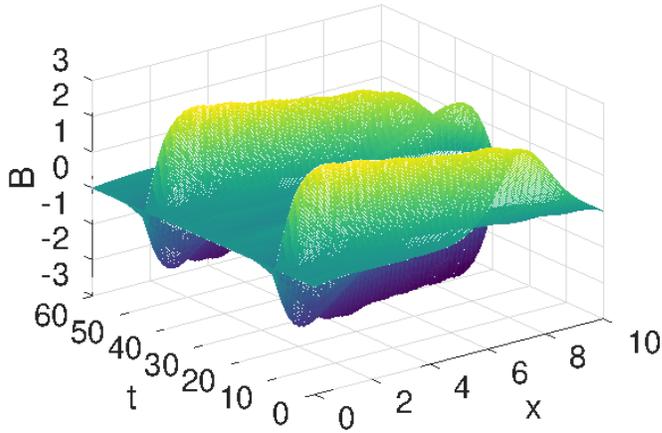
$L=10, I=0.27, J2$



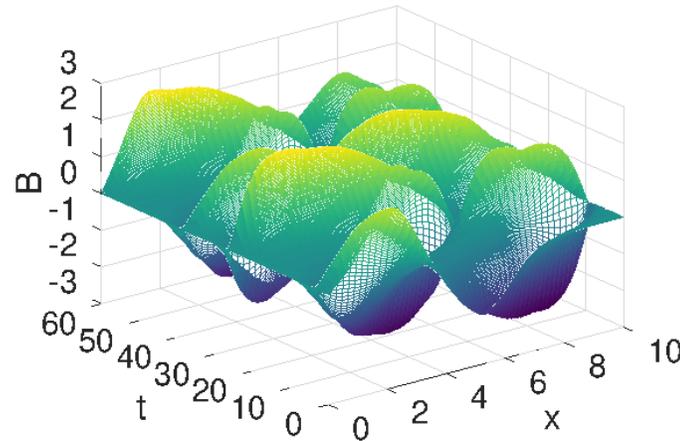
$L=10, I=0.27, J3$



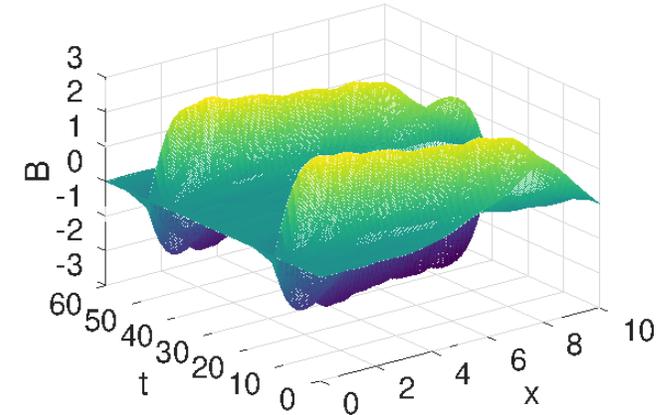
$L=10, I=0.27, J4$

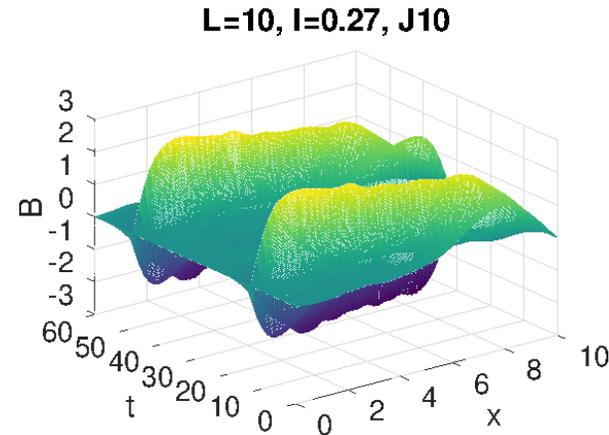
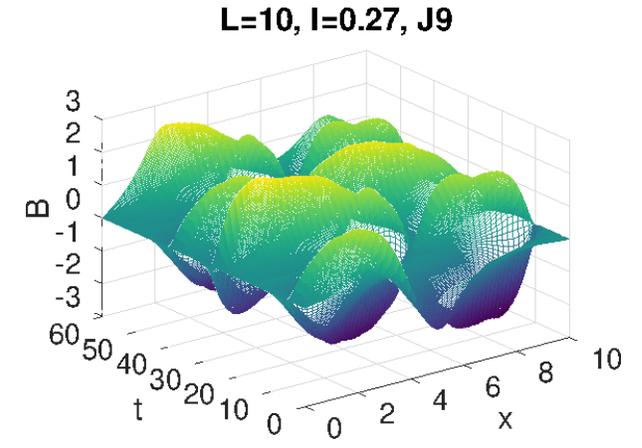
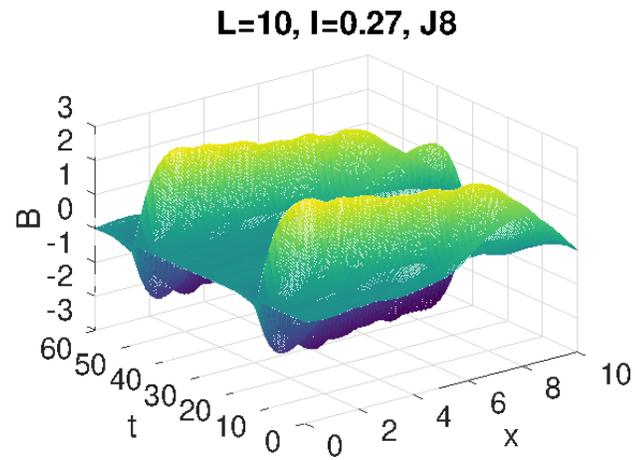
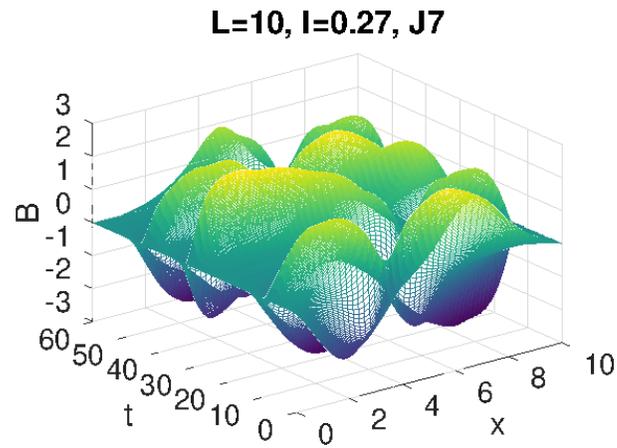


$L=10, I=0.27, J5$



$L=10, I=0.27, J6$





В ДП с нечетными номерами возникают по два флюксона, а в ДП с четными номерами - по одному. Это обстоятельство и является причиной возникновения дополнительной ветви. Возникновение таких состояний связано с индуктивной связью, т.е. без учета индуктивной связи количество флюксонов одинаково во всех переходах, а при наличии индуктивной связи некоторые переходы переключаются из двухфлюксонных состояний в однофлюксонные, в то время как другие остаются в двухфлюксонном состоянии.



Влияние емкостной и индуктивной связи на электромагнитное излучение системы ДП (1/5)

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:

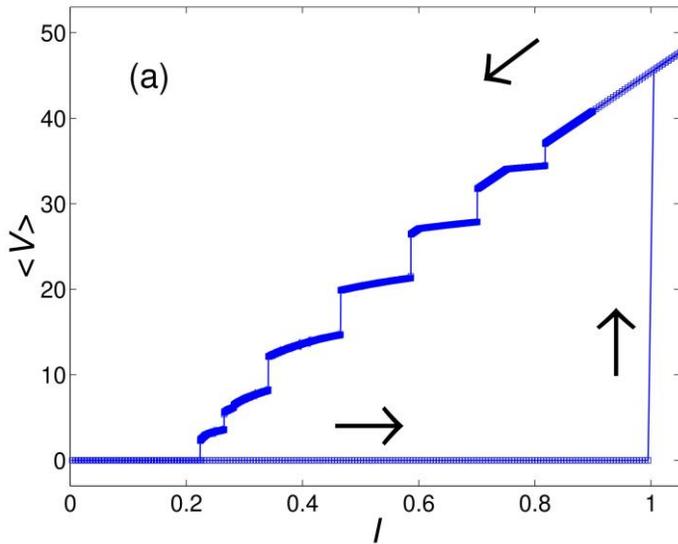
$$\Delta I_{rad}(t, x = 0) = \frac{E_{ac}(t, x = 0)}{Z}, \quad \Delta I_{rad}(t, x = L) = \frac{E_{ac}(t, x = L)}{Z}.$$

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



Влияние емкостной и индуктивной связи на электромагнитное излучение системы ДП (2/5)

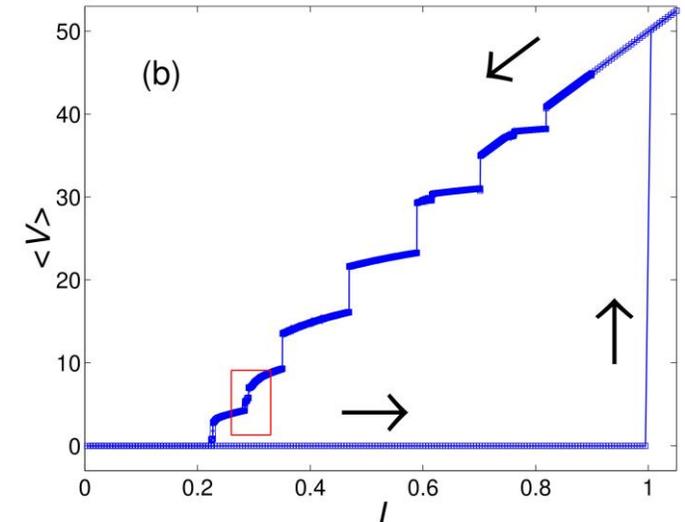
Рассмотрим влияние связи между соседними ДП на электромагнитное излучение системы ДП.



ВАХ для случая системы ДП с $N=L=10$, $\beta=0.2$.

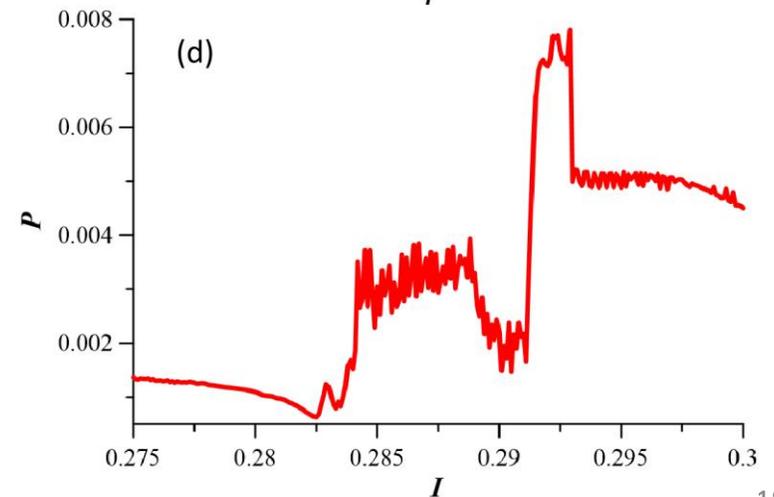
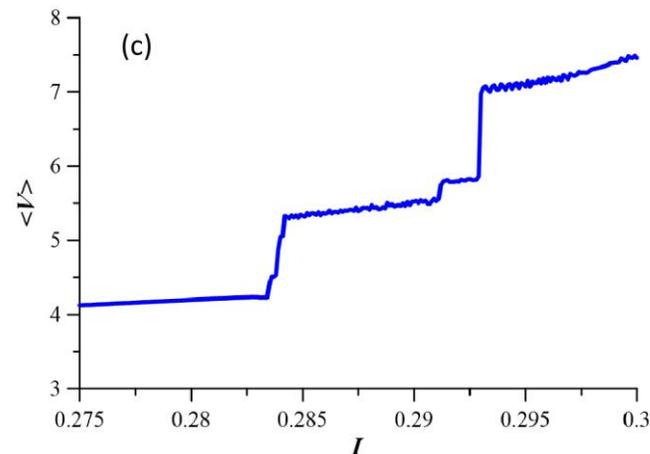
(a) Расчет сделан без учета связи между ДП ($S=s_c=0$);

(b) с учетом связи между ДП при $S=-0.05$, $s_c=-0.05$;



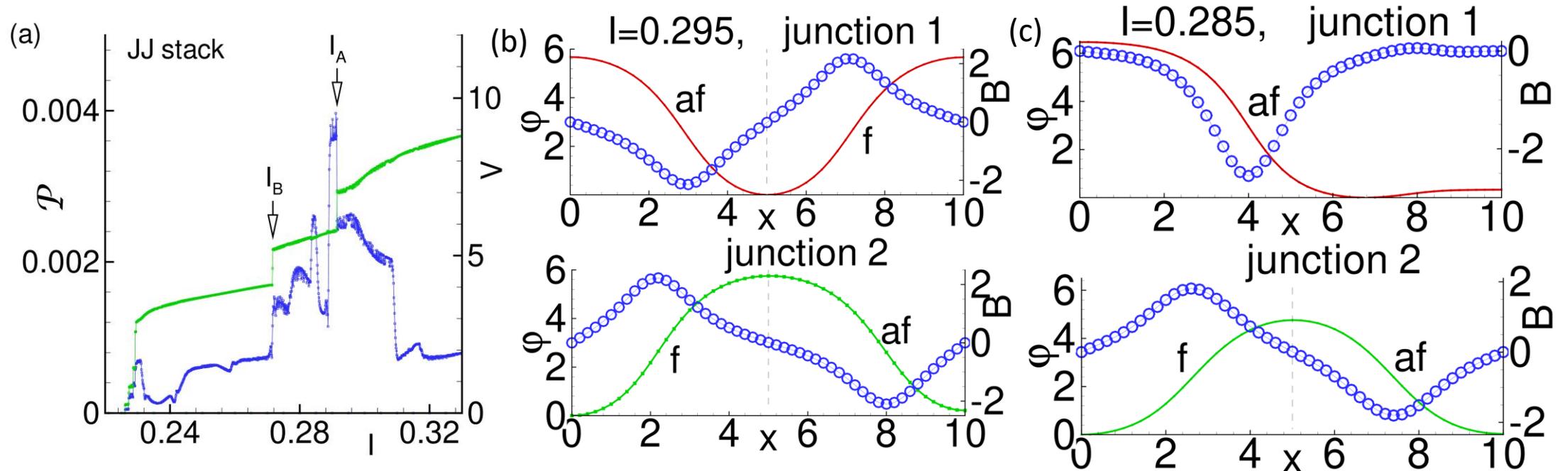
(c) увеличение выделенного фрагмента ВАХ на (b);

(d) соответствующая мощность излучения \mathcal{P}





Влияние емкостной и индуктивной связи на электромагнитное излучение системы ДП (3/5)

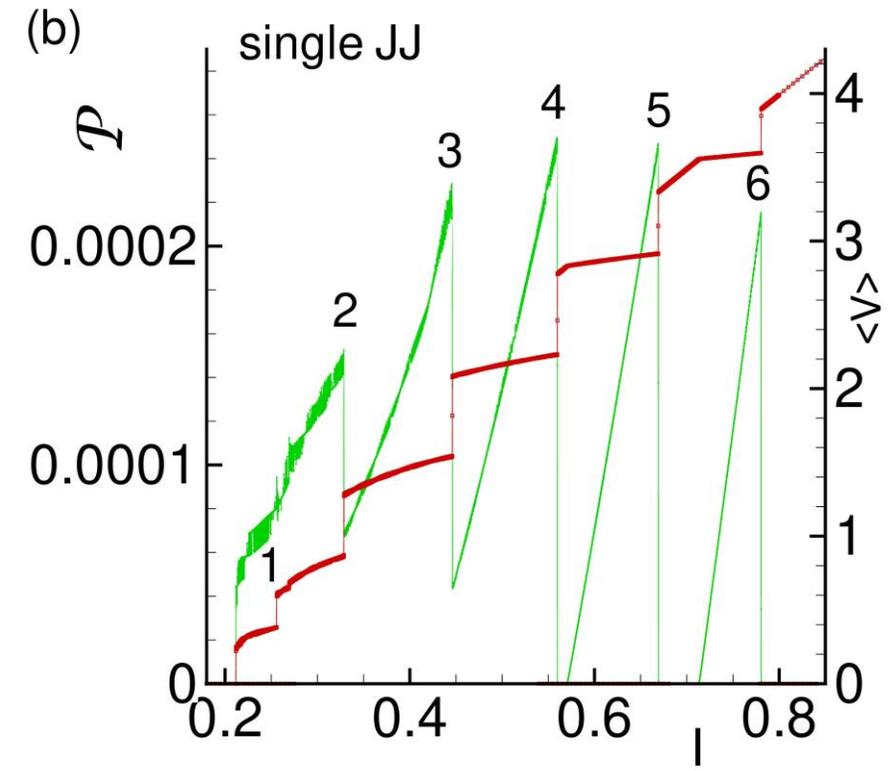
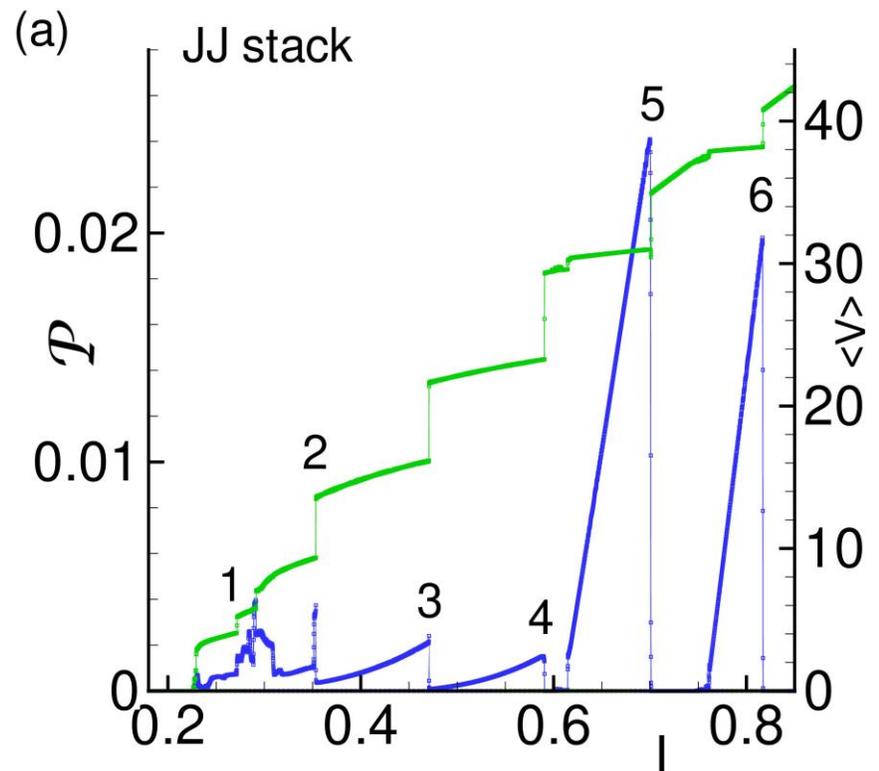


(a) Зависимость интенсивности излучения от величины базового тока вместе с ВАХ в области ветвления для системы 10 связанных ДП длиной $L=10$ при $s_c=-0.05$, $D_c=1.1$, $S=-0.05$; (b) Распределение разности фаз и магнитного поля в фиксированный момент времени при $I=0.295$ и $t=12.44$; (c) То же, что и в случае (b), при $I=0.285$ $t=10.24$. f - флюксон, af - антифлюксон.



Влияние емкостной и индуктивной связи на электромагнитное излучение системы ДП (4/5)

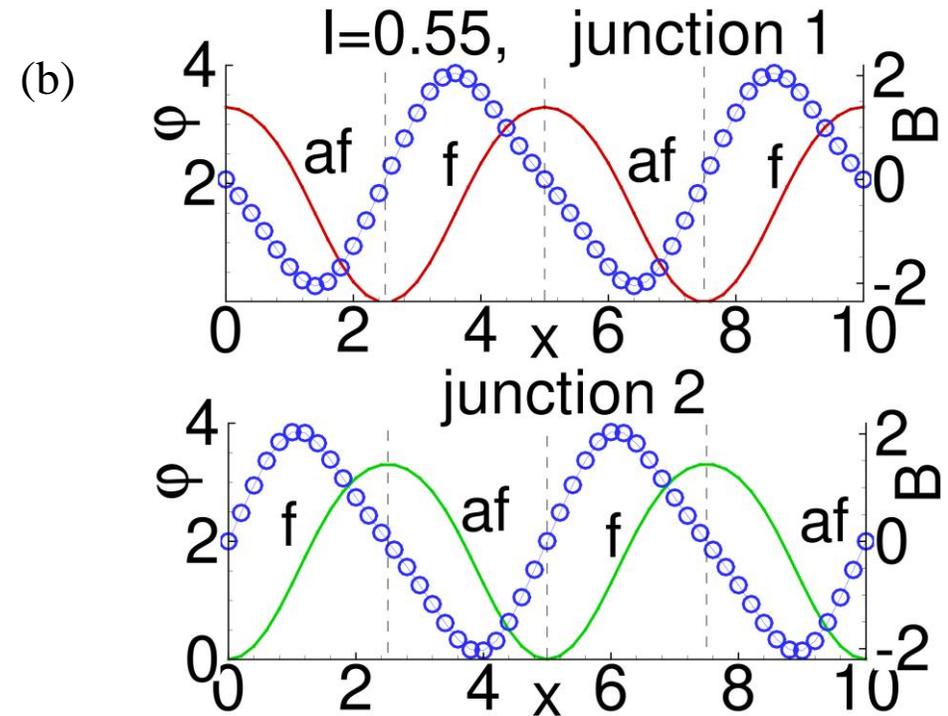
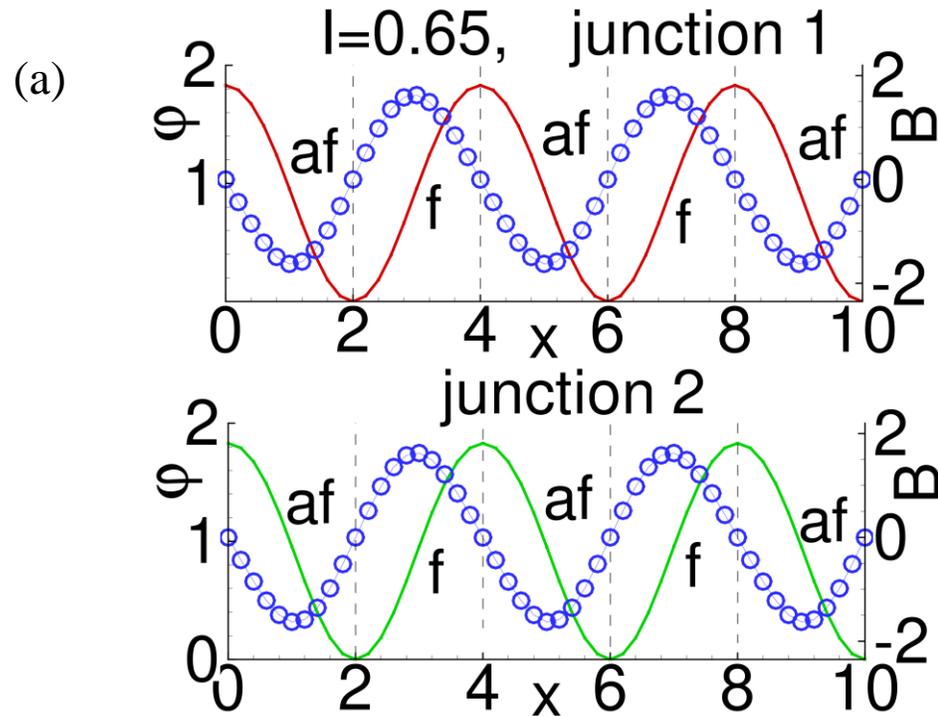
Для того, чтобы оценить влияние связи на когерентное излучение, обусловленное движением флюксонов, рассчитана зависимость мощности излучения от базового тока для одиночного ДП и системы связанных ДП, и проведен сравнительный анализ этих двух случаев.





Влияние емкостной и индуктивной связи на электромагнитное излучение системы ДП (5/5)

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.

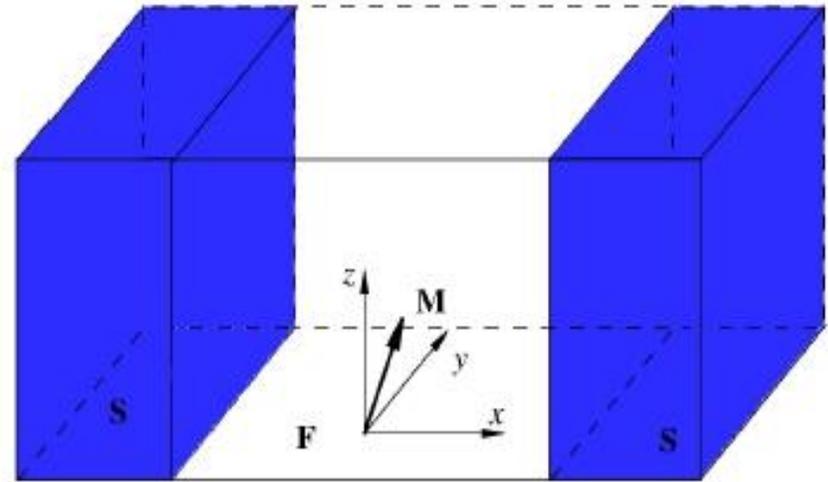


Выводы

- На основе проведенного математического моделирования показано различие в динамике флюксонов в отдельных переходах рассматриваемой системы ДДП, что приводит к ветвлению ВАХ и к скачкам интенсивности электромагнитного излучения в зависимости от флюксонных состояний в отдельных ДП стека.
- Было проведено компьютерное моделирование влияния емкостной и индуктивной связи на структуру ВАХ. Полученные результаты показывают, что именно индуктивная связь инспирирует возникновение новых состояний системы ДДП, что находит отражение в образовании дополнительных ступеней в структуре ВАХ. Таким образом, проведенное компьютерное моделирование продемонстрировало влияние индуктивной связи на структуру ВАХ в системе связанных ДДП.
- Проведенные тестовые расчеты на суперкомпьютере «Говорун» показали возможность уменьшения времени счета до 9 раз при расчетах в параллельном режиме. При этом для определенных конфигураций стека ДДП использование инструкций AVX-512 обеспечивает за счет внутрипроцессорного параллелизма дополнительное сокращение времени счета более чем в два раза. Тем самым, реализация параллелизма позволяет успешно проводить компьютерное моделирование в более короткие сроки по сравнению с последовательными вычислениями.



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. Возможность управления магнитными свойствами посредством сверхпроводящего тока, а также влияние магнитной динамики на сверхпроводящий ток привлекают к себе пристальное внимание в связи с перспективами практических приложений в микроэлектронике.



Постановка задачи

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



Постановка задачи

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),(9) и импульсом тока (10) описывает динамику φ_0 перехода.



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.

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

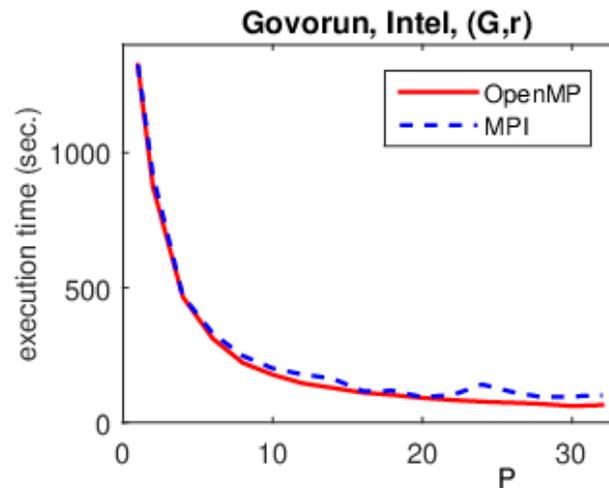
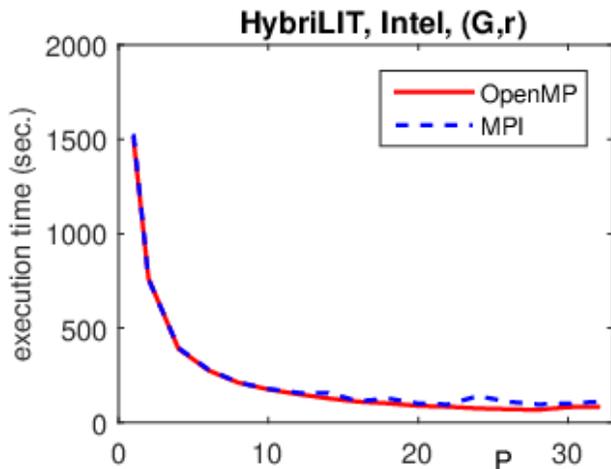
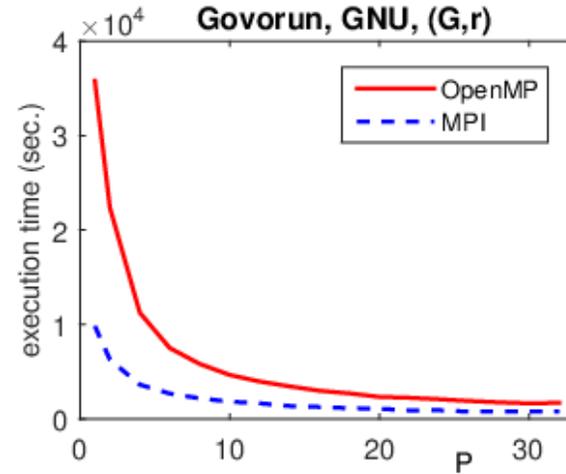
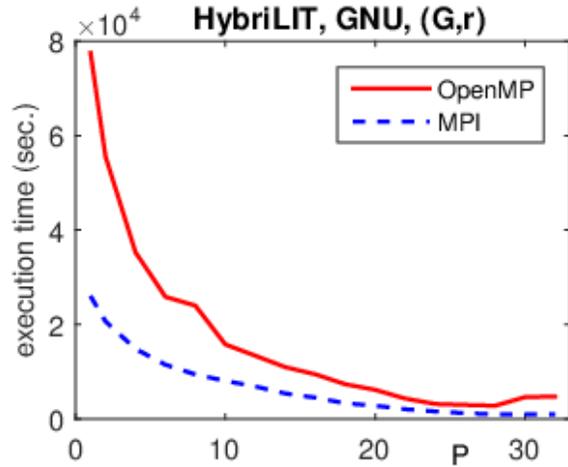
В дополнение к разработанной в 2019 году параллельной MPI версии в 2022 была разработана параллельная OpenMP. В основе обеих версий лежит язык программирования C++.

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.



Параллельная реализация



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

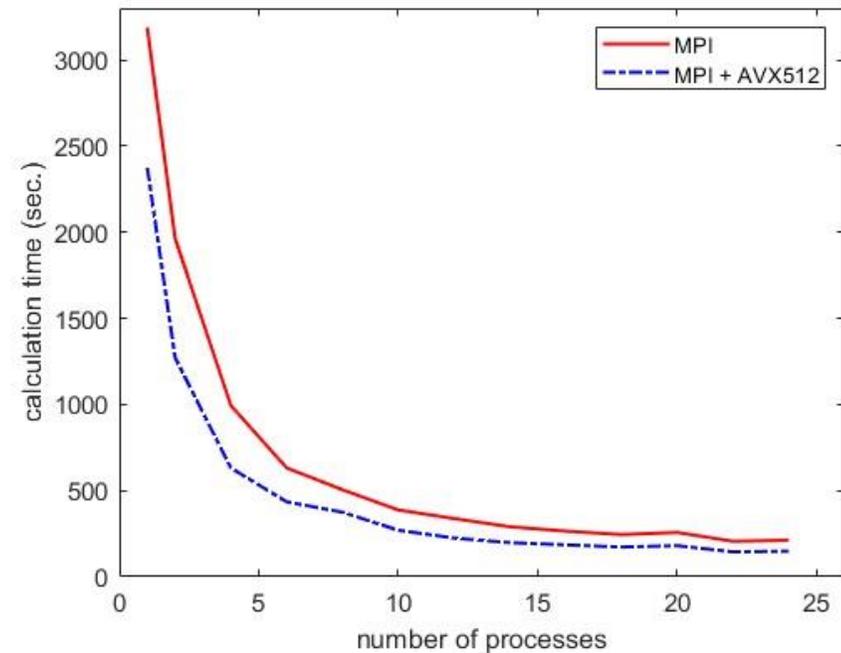
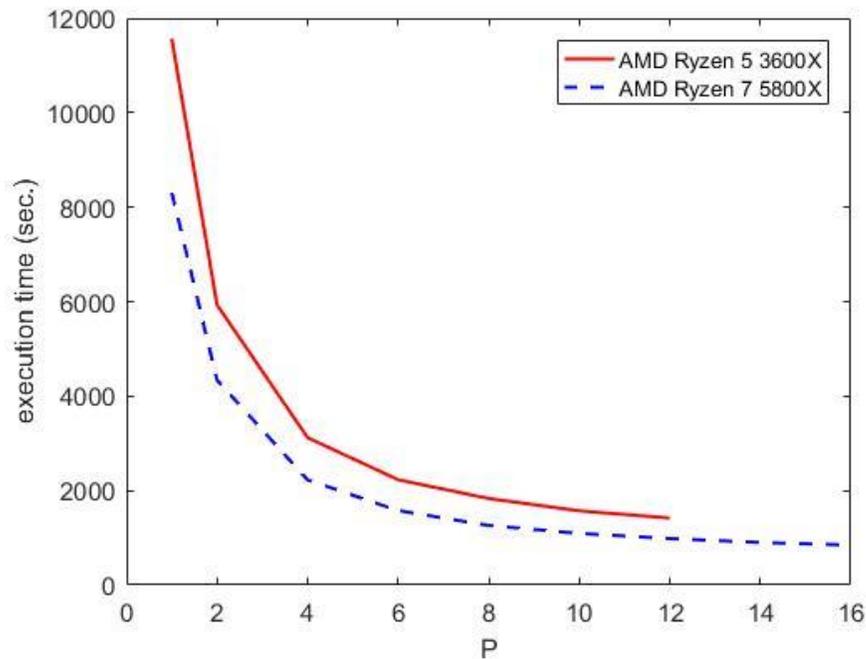
Вычисления выполнены на платформе HybriLIT



Параллельная реализация

OpenMP версия данной программы также тестировалась на персональных компьютерах общего назначения. Реализация OpenMP была скомпилирована с использованием Microsoft Visual Studio в операционной системе Windows 10. Тестирование проводилось с использованием процессоров AMD Ryzen 5 3600X (6 ядер, 12 потоков) и AMD Ryzen 7 5800X (8 ядер, 16 потоков) (левый рисунок).

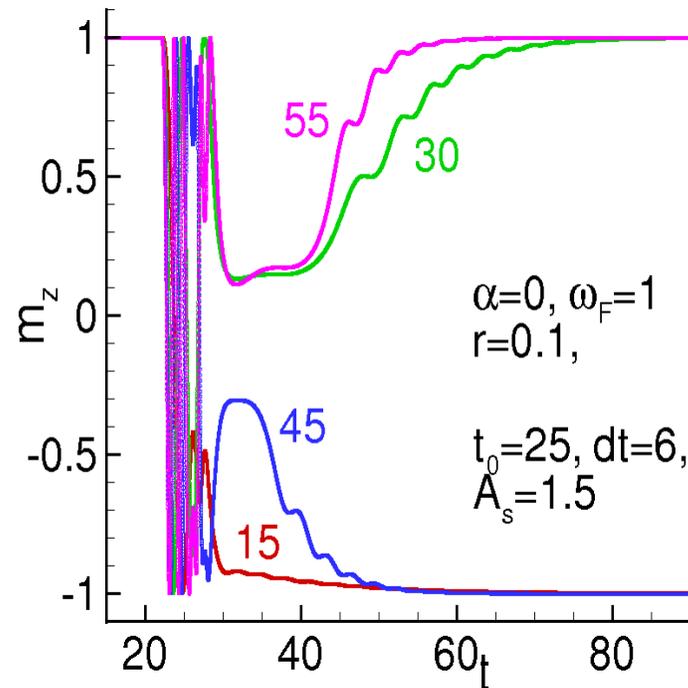
Также на основе MPI версии программы было проведено тестирование векторных инструкций AVX-512. Как показало тестирование, использование инструкций AVX-512 позволяет дополнительно ускорить программу в 1.3-1.6 раза без какого-либо преобразования кода (правый рисунок).





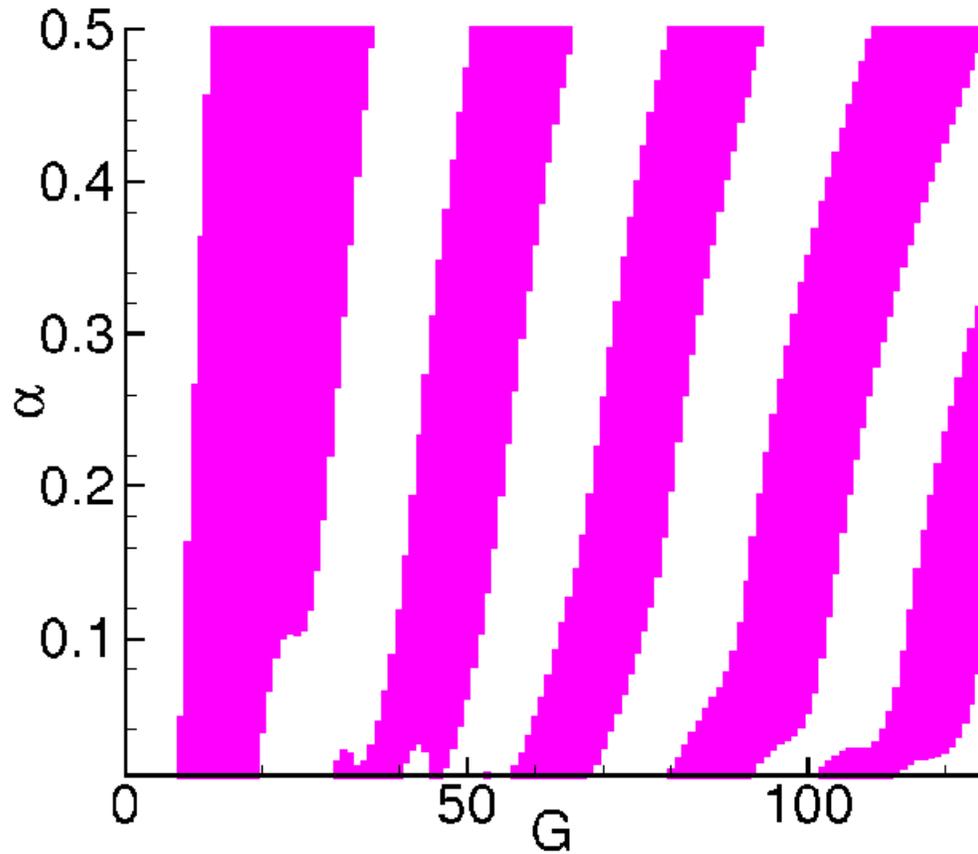
Переворот магнитного момента (1/4)

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

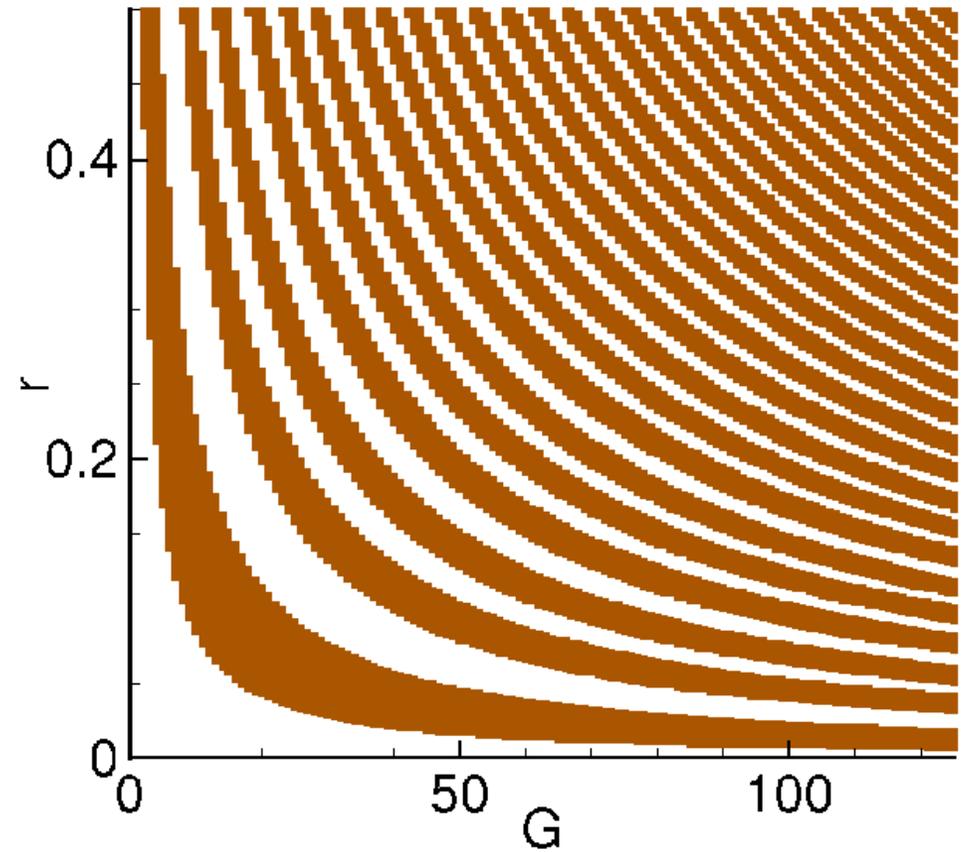




Переворот магнитного момента (2/4)



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



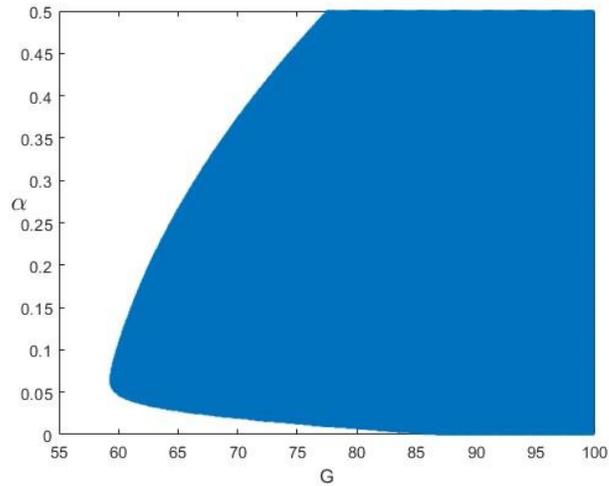
Демонстрация периодичности интервалов переворота в плоскости (G, r) . Результаты получены с шагом $\Delta G=1$ и $\Delta r=0.001$ при $A_s=1.5$, $\alpha=0.1$, $t_0=25$, $\Delta t=6$.



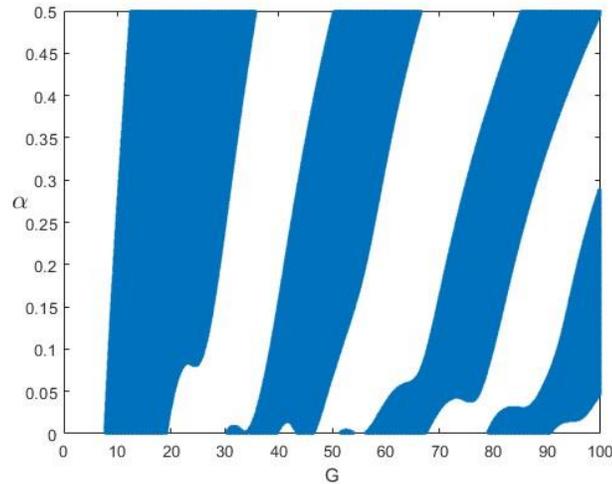
Переворот магнитного момента (3/4)

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 $A_s=1.5$, $t_0 = 25$, $\Delta t = 6$.

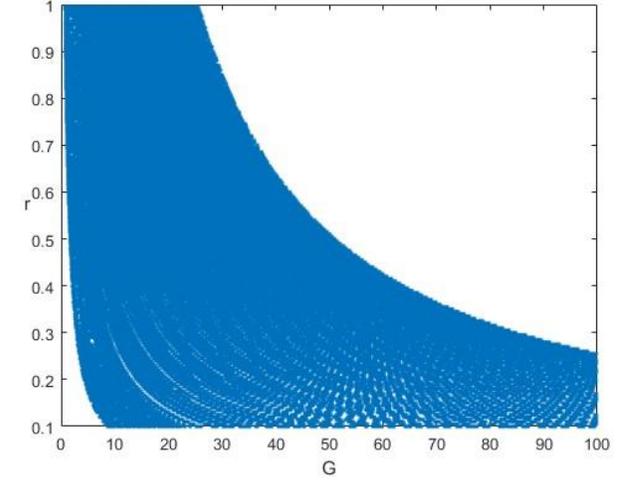
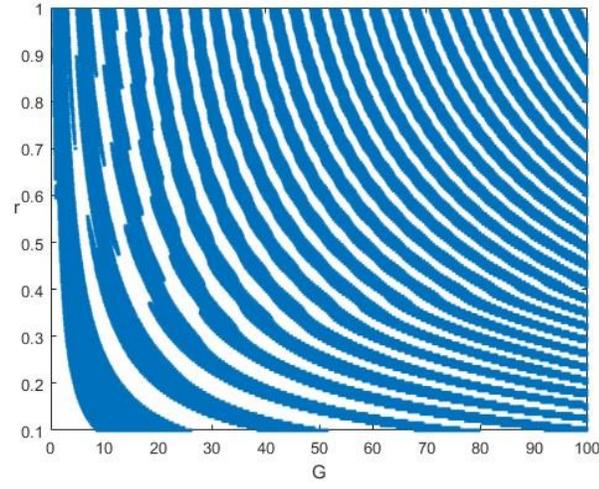
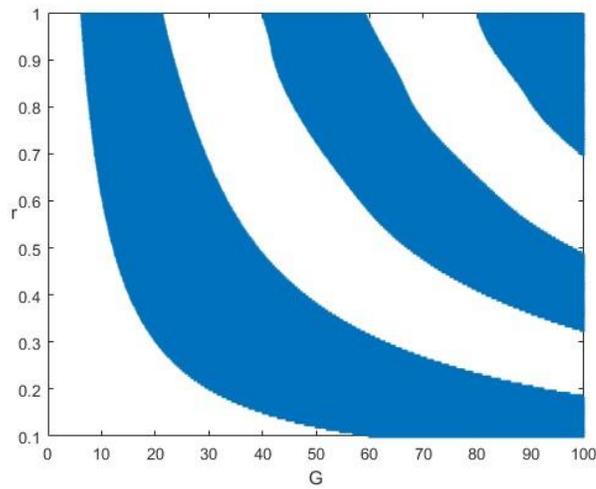
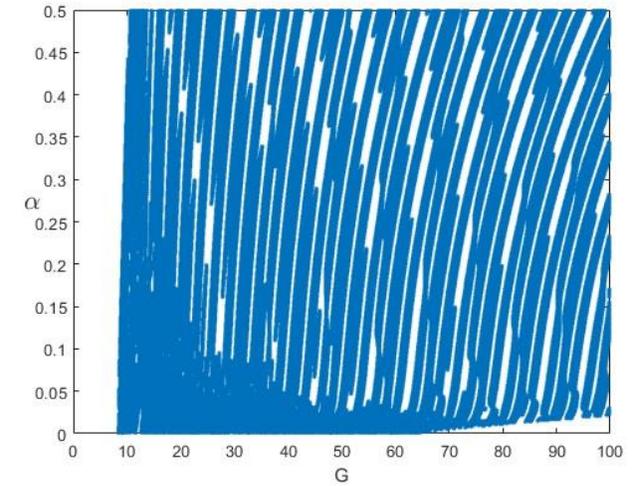
$\omega_F=0.1$



$\omega_F=1$



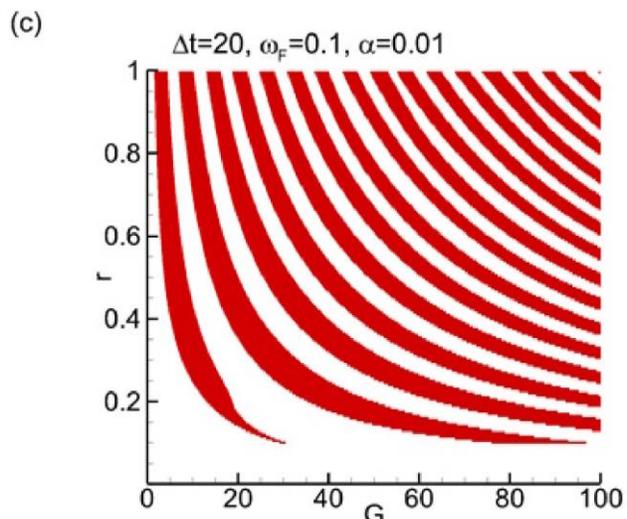
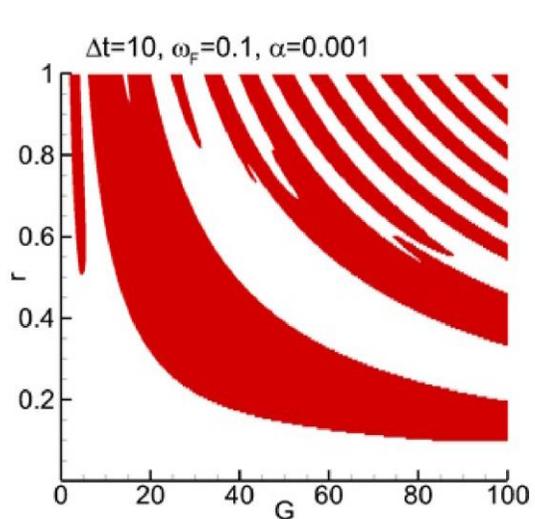
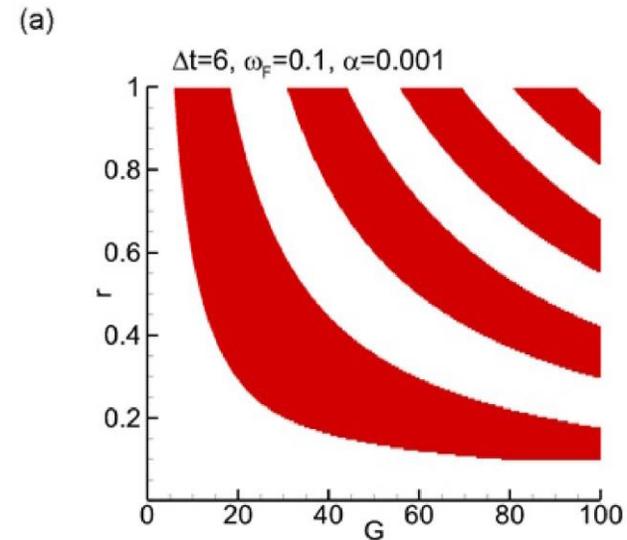
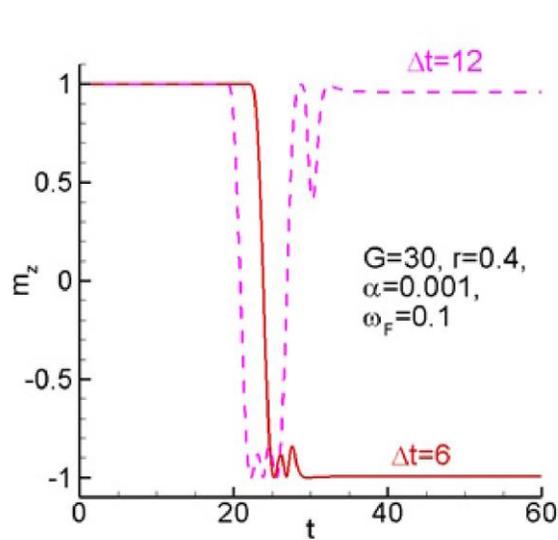
$\omega_F=10$





Переворот магнитного момента (4/4)

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



(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.



Выводы

- На основе уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта и хорошо апробированной резистивной модели джозефсоновского перехода, продемонстрирована периодичность в возникновении интервалов переворота магнитного момента при изменении параметров спин-орбитальной связи, гильбертовского затухания и отношения джозефсоновской энергии к магнитной. Можно ожидать, что полученные результаты могут быть полезны в различных областях сверхпроводниковой спинтроники.
- Установлены домены переворота магнитного момента на широком диапазоне параметров фазовой связи G , диссипации α и спин-орбитальной связи r .
- Переворот магнитного момента чрезвычайно чувствителен к значениям параметров системы. В виду достаточной сложности рассматриваемой системы, вопрос, касающийся возможности предсказания полного переворота при заданных параметрах системы и импульса тока, остается открытым до настоящего времени.
- На основе детальных исследований динамики намагниченности в джозефсоновском ϕ_0 -переходе под действием импульса тока показано, что реализация переворота магнитного момента в ϕ_0 -переходе характеризуется определенной периодичностью по величине спин-орбитальной связи, параметру гильбертовского затухания и отношения джозефсоновской энергии к магнитной. Полученные результаты могут быть полезны для понимания физических процессов в различных областях сверхпроводниковой спинтроники, а также могут быть использованы в прикладных целях.
- Разработана параллельная программа MPI и OpenMP по моделированию переворота магнитного момента в ϕ_0 -переходе, обеспечивающая высокопроизводительные исследования в широком диапазоне параметров.
- Максимальное ускорение версий MPI и OpenMP составляет около 30 раз.



Общие выводы

- Разработана параллельная версия программы по моделированию вольт-амперных характеристик с системах длинных джозефсоновских переходов. Она оформлена в виде универсального программного продукта **LJJ-CVV-MPI** и доступна в библиотеке программ ОИЯИ: <http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/ljj-cvv-mpi/index.html>
- Разработана параллельная версия программы по моделированию доменов переворота магнитного момента в ϕ_0 -переходе. Она оформлена в виде универсального программного продукта **SPIN-Ga/Gr** и доступна в библиотеке программ ОИЯИ: <http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/spin-ga-gr/index.html>
- Представленные выше программные реализации также нашли свое применение в рамках виртуальных вычислительных сред: на основе Jupyter Book и на основе «Виртуальной исследовательской среды для решения задач математического моделирования физических явлений в гибридных наноструктурах, состоящих из сверхпроводников и магнетиков».
- Разработанные методы и программы позволили провести численное исследование представленных систем и получить физически значимые результаты.
- Нарботки, полученные в рамках описанных выше задач, активно используются в дальнейших исследованиях и расчётах по исследованию сверхпроводящих структур различных типов.



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 «Нанопизика 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