

УДК 538.945

Ю. М. Шукринов, И. Р. Рахмонов**Сверхпроводниковая спинтроника на основе джозефсоновских переходов с ферромагнитной прослойкой**

Приводятся результаты исследований, касающиеся динамики и вольт-амперных характеристик (ВАХ) джозефсоновских переходов (ДП) сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник (СФС). В частности, представлены данные по перевороту магнитного момента ферромагнитной прослойки сверхпроводящим током, а также импульсом магнитного поля в СКВИДе, показаны проявления свойств маятника Капицы в динамике СФС структур, продемонстрировано возникновение на ВАХ ДП субгармонических шапиро-подобных ступенек (Devil's staircase structures). Приведенные результаты могут найти применения в различных областях сверхпроводниковой спинтроники.

Ключевые слова: эффект Джозефсона, джозефсоновский переход, сверхпроводниковая спинтроника, Φ_0 переход, переворот магнитного момента.

Об авторах

Шукринов Юрий Маджнунович – ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, профессор кафедры нанотехнологий и новых материалов государственного университета «Дубна». *E-mail:* shukrinv@theor.jinr.ru. Московская обл., г. Дубна Московской обл., ул. Университетская, д. 19.

Рахмонов Илхом Рауфович – старший научный сотрудник лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований. *E-mail:* rahmonov@theor.jinr.ru.

Спинтроника является одной из наиболее интенсивно развивающихся областей физики конденсированного состояния, и важное место здесь занимают исследования джозефсоновских переходов (ДП) в комбинации с магнитными системами, составляющие основу сверхпроводниковой спинтроники. Интересными свойствами обладает такая структура, как Φ_0 -переход, в котором разность фаз непосредственно связана с магнитным моментом в барьере. Актуальность исследования его свойств обусловлена уникальной возможностью управления магнитными свойствами барьера в джозефсоновских наноструктурах посредством сверхпроводящего тока, а также, в свою очередь, с возможностью влияния на джозефсоновский ток магнитным моментом барьера. Большой интерес для различных применений вызывает разработка новых эффективных методов переворота магнитного момента, в частности, импульсом сверхпроводящего тока, а также исследования квантовых свойств джозефсоновских наноструктур с магнитными и топологически нетривиальными барьерами. Такие исследования позволяют создать основы для разработки новых устройств для сверхпроводниковой спинтроники.

Возможность управления магнитными свойствами посредством джозефсоновского тока, а также влияния на джозефсоновский ток магнитным моментом рассматривалась в ряде работ [13; 10; 21; 14; 5; 22; 33; 7; 8]. В данных работах было продемонстрировано, что спинтроника позволяет понять фундаментальные спин-зависящие явления, а также разработать приложения для компьютерных технологий. В частности, контролирование магнитного состояния сверхпроводимостью открывает новые возможности для развития ультрабыстрой криогенной памяти [13].

Важную роль в спинтронных явлениях играет спин-орбитальное взаимодействие. В структурах сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник (СФС) спин-орбитальное взаимодействие в ферромагнетике без центра инверсии обеспечивает механизм прямой связи между магнитным моментом и джозефсоновским током. В таких переходах нарушена симметрия относительно обращения времени, и ток-фазовое соотношение содержит сдвиг фазы, который пропорционален магнитному моменту, перпендикулярному к градиенту асимметричного спин-орбитального потенциала [6; 20; 23]. В работе [20] проведен анализ спиновой динамики в таких Φ_0 -переходах в низкочастотном режиме, который позволяет

использовать квазистатический подход. Было показано, что dc -сверхток может оказывать сильное ориентационное влияние на магнитный момент ферромагнитного слоя. При возникновении электрического напряжения в φ_0 -переходах возникают осцилляции джозефсоновского тока и, соответственно, прецессия магнитного момента. Такая прецессия может контролироваться возникновением высших гармоник в соотношении ток-фаза, а также dc -компоненты тока, которые значительно возрастают вблизи ферромагнитного резонанса.

Воздействие внешнего электромагнитного излучения на гибридные структуры приводит к ряду новых явлений. В частности, возникает возможность появления полуполных ступенек Шапиро и дополнительной магнитной прецессии с частотой внешнего излучения, создаваемой микроволновым магнитным полем, а также возможность увеличения ширины ступеньки Шапиро при частотах излучения, близких к частоте ферромагнитного резонанса [20].

Нами в работе [42] исследованы явления в φ_0 -переходе, где на основе реалистичной модели джозефсоновского перехода, учитывающей квазичастичный ток и ток смещения, рассчитаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) с учетом магнитной прецессии. Показано, что характер прецессии магнитного момента существенно меняется в интервале базового тока, соответствующего частоте ферромагнитного резонанса [42]. Эта область характеризуется каскадом различных состояний прецессии, которые наблюдаются при изменении базового тока вдоль ВАХ, что указывает на возможность управления магнитными свойствами посредством джозефсоновского тока, и может найти применение в различных областях спинтроники. Недавно было показано, что φ_0 -переход возникает также и без спин-орбитального взаимодействия, за счет неоднородности намагниченности ферромагнетика [4]. Это также открывает возможность управления магнитной структурой неоднородных магнетиков (имеющих доменные стенки) с помощью джозефсоновского тока.

Другим интересным направлением сверхпроводниковой спинтроники является учет взаимодействия джозефсоновской плазмы и спиновых волн в магнитном барьере [22; 37; 26; 16; 36]. При наличии внешнего электромагнитного излучения в ферромагнетике возникает ферромагнитный резонанс и воз-

буждение спиновых волн, которые оказывают влияние на сверхпроводящий ток в ДП [16]. При этом на ВАХ возникают шапиро-подобные ступеньки тока при напряжениях, соответствующих четным значениям частоты микроволнового излучения. Возникновение таких ступенек тока связывается с туннелированием куперовских пар с поглощением и излучением четного числа магнонов в системе [16].

Обстоятельные исследования взаимодействия спиновых волн и джозефсоновской плазмы при наличии внешнего электромагнитного излучения показывают возникновение на ВАХ ДП различных структур с большим числом субгармонических шапиро-подобных ступенек (*Devil's staircase structures*). Возникновение таких структур в экспериментальных результатах и их характерные черты могут служить критерием топологического состояния исследуемой системы [32].

Сверхпроводниковая спинтроника на основе ферромагнетик-сверхпроводник гибридных наноструктур с учетом взаимодействия спиновых волн, джозефсоновской плазмы и флюксоновых состояний интенсивно разрабатывается в настоящее время. В частности, физические явления в гибридном устройстве на основе длинного джозефсоновского перехода, связанного индуктивно с внешним ферромагнитным слоем, рассматривались в работе [12]. Длинный джозефсоновский переход в режиме ступенек нулевого поля наводит локализованное переменное магнитное поле в ферромагнитном слое, что позволяет синхронизировать магнето-статическую стоячую волну. Волна, в свою очередь, наводит дополнительную диссипацию для флюксона, синхронизируя его на частоте обычного ферромагнитного резонанса. Это проявляется в возникновении ступенек напряжения на вольт-амперной характеристике. Таким образом, можно изучать динамику намагниченности ферромагнитного материала по особенностям на вольт-амперной характеристике, а для джозефсоновского перехода возникает дополнительная частота синхронизации, определяемая свойствами ферромагнетика.

Большое внимание привлекают исследования неравновесных эффектов в джозефсоновских структурах. Такие эффекты возникают, например, в результате зарядовой и спиновой инжекции и приводят к модуляции сверхпроводимости в сверхпроводящем слое, что, в свою очередь, позволяет контролиро-

вать магнитное состояние перехода. Здесь следует отметить пионерские исследования спиновой инжекции в стекловых структурах BSCCO [18; 17; 19; 35; 11; 9; 28]. Контролирование сверхпроводимости инжекцией спин-поляризованных квазичастиц рассматривалось в работах [19; 35; 11; 9; 28; 34; 27]. В работе [19] исследовались транспортные свойства внутренних ДП в Co/BSCCO гибридных структурах во внешнем магнитном поле, параллельном сверхпроводящим слоям, и наблюдалась гистерезисная зависимость критического тока внутренних ДП от магнитного поля как результат спиновой инжекции. Сверхпроводниковая спинтроника на основе связанных систем джозефсоновских переходов является востребованной задачей на продолжение развития данной области науки. С применением цепочек и решеток джозефсоновских элементов связывается решение задач создания и совершенствования сверхпроводниковых устройств с уникальными параметрами. Кроме того, цепочки джозефсоновских переходов используются для описания и анализа распределенных джозефсоновских структур.

Теоретическая модель

Рассмотрим структуру сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник, схематичный вид которой показан на рис. 1. Сверхпроводящий ток течет вдоль оси x , легкая ось ферромагнетика направлена вдоль оси z . Динами-

ка магнитного момента ферромагнитного слоя описывается уравнением Ландау – Лифшица – Гильберта [33; 6; 20]

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma[\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_{eff}] + \frac{\alpha}{M_0} \left[\mathbf{M} \cdot \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right], \quad (1)$$

где \mathbf{M} – магнитный момент ферромагнетика; γ – гиромагнитное отношение; α – параметр диссипации Гильберта; M_0 – модуль магнитного момента. Здесь \mathbf{H}_{eff} – эффективное магнитное поле и оно задается выражением

$$\mathbf{H}_{eff} = Gr \sin(\varphi - \varphi_0) \hat{\mathbf{y}} + \frac{M_z}{M_0} \hat{\mathbf{z}}, \quad (2)$$

где G – отношение амплитуды энергии Джозефсона к энергии магнитной анизотропии; r – параметр спин-орбитального взаимодействия, φ – джозефсоновская разность фаз; $\varphi_0 = rM_y / M_0$ – смещение разности фаз из-за наличия спин-орбитального взаимодействия. Отметим, что y -компонента эффективного поля создана сверхпроводящим (джозефсоновским) током $I_s = Gr \sin(\varphi - \varphi_0)$, и вследствие прямой связи с M_y через φ_0 подобные джозефсоновские переходы называют φ_0 -переходами [6; 20].

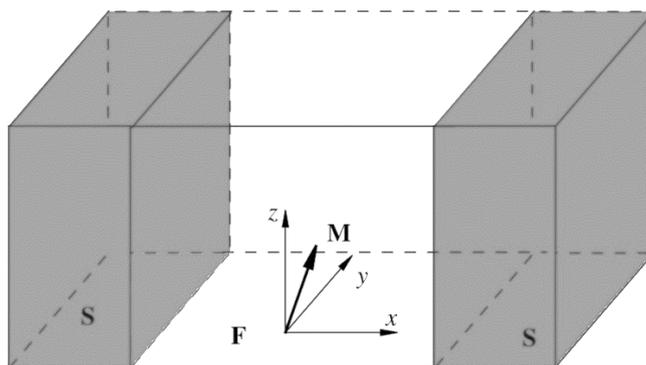


Рис. 1. Схематичный вид структуры сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник

Уравнение (1) с учетом эффективного поля (2) в нормированных величинах в скалярной

форме записывается в виде системы уравнений [33]

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_x = \frac{1}{1+\alpha^2} \{-m_y m_z + Gr m_z \sin(\phi - r m_y) \\ \quad - \alpha [m_x m_z^2 + Gr m_x m_y \sin(\phi - r m_y)]\} \\ \dot{m}_y = \frac{1}{1+\alpha^2} \{m_x m_z \\ \quad - \alpha [m_y m_z^2 - Gr(m_z^2 + m_x^2) \sin(\phi - r m_y)]\} \\ \dot{m}_z = \frac{1}{1+\alpha^2} \{-Gr m_x \sin(\phi - r m_y) \\ \quad - \alpha [Gr m_y m_z \sin(\phi - r m_y) - m_z (m_x^2 + m_y^2)]\} \end{array} \right. \quad (3)$$

где m_x , m_y и m_z – компоненты магнитного момента. Данная система решается нами численно методом Рунге – Кутты, на основе чего исследуется динамика магнитной системы при разных значениях ее параметров.

Переворот магнитного момента под воздействием гауссовского импульса внешнего тока

В данном параграфе рассмотрена возможность переворота магнитного момента в ϕ_0 -переходе под воздействием гауссовского импульса внешнего тока, а также представлено влияние параметров модели и импульса на переворот магнитного момента [33; 2; 3; 38; 39]. При этом динамика магнитной системы описывается уравнением Ландау – Лифшица – Гильберта (1), а динамика разности фаз задается уравнением

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{w} [I_{pulse} - \sin(\varphi - r m_y)], \quad (4)$$

где I_{pulse} – импульс внешнего тока, заданный функцией распределения Гаусса.

$$I_{pulse} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

На рис. 2а представлена временная зависимость компоненты намагниченности m_z , демонстрирующая ее полный переворот при $G = 10$, $r = 0.1$ и $\sigma = 7.41$. Влияние изменения параметра спин-орбитальной связи r и параметра импульса σ на характер переворота магнитного момента Φ -слоя показано на рис. 2б–г. Как видно, переворот магнитного момента оказывается очень чувствительным к изменению параметров ДП и параметров импульса. Характер поведения m_z в области переворота определяется динамикой разности фаз при выбранных значениях параметров импульса.

На рис. 3 демонстрируется переворот намагниченности m_z при разных значениях отношения G джозефсоновской энергии к магнитной и разных значениях параметра импульса σ . Как мы видим, плавный переворот может быть реализован в достаточно широком интервале G при соответствующем подборе параметра σ .

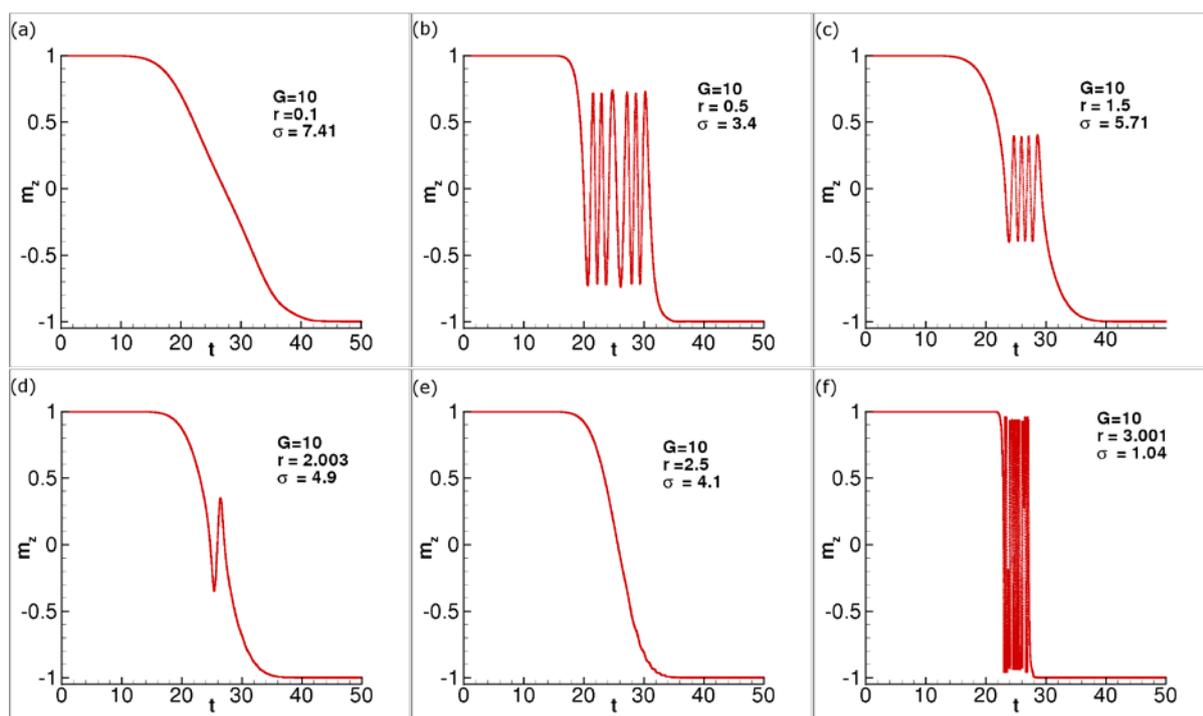


Рис. 2. Влияние параметра спин-орбитальной связи r и параметра импульса σ на характер переворота магнитного момента Φ -слоя

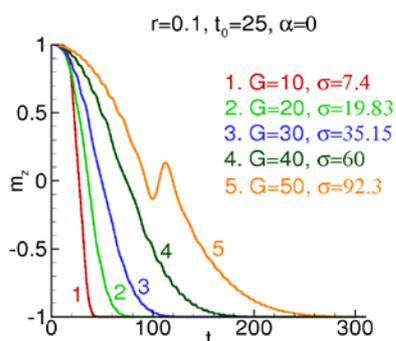


Рис. 3. Демонстрация переворота при разных значениях отношения джозефсоновской энергии к магнитной G и параметра импульса σ

Переворот магнитного момента прямоугольным импульсом внешнего магнитного поля в одноконтактном СКВИДе с ϕ_0 -переходом

Переворот магнитного момента ферромагнитного слоя ДП можно осуществить с помощью импульса магнитного поля. Ниже представлены результаты исследования динамики одноконтактного СКВИДа, содержащего ϕ_0 -переход, и продемонстрирована возмож-

ность переворота магнитного момента прямоугольным импульсом внешнего магнитного поля [29; 30]. В данном случае динамика магнитной системы также описывается уравнением Ландау – Лифшица – Гильберта (1), а динамика разности фаз задается уравнением

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{w} \left[\frac{\phi_s + \phi - rm_y}{L} - \sin(\phi - rm_y) \right], \quad (6)$$

где ϕ_s – поток, создаваемый внешним импульсом магнитного поля, нормированный на квант потока Φ_0 ; L – нормированная индуктивность одноконтактного СКВИДа. Для исследования динамики переворота система уравнений (1) вместе с (2) решалась численно методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Расчет проведен для параметров модели $G = 10$, $r = 0.5$ и $L = 5$. На рис. 4а приведена временная зависимость компоненты m_z , рассчитанная при воздействии прямоугольного импульса внешнего магнитного поля с параметрами, указанными на вставке.

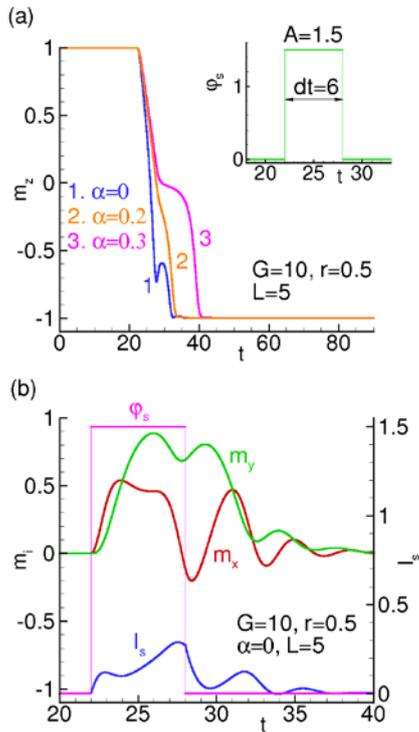


Рис. 4. (a) Демонстрация динамики компоненты m_z в области переворота при значении отношения джозефсоновской энергии к магнитной $G = 10$. Вставка показывает форму прямоугольного импульса внешнего магнитного поля; (b) то же самое для m_x , m_y и I_s

Мы видим, что под воздействием импульса поля реализуется полный переворот магнитного момента. При расчете высота импульса магнитного поля составляла $A = 1.5$, а время действия импульса $dt = 6$. В качестве начального условия использовано $m_z = 1$. После прекращения действия импульса m_z , осциллируя, стремится к $m_z = -1$. Для того, чтобы объяснить характер изменения m_z и указать причину его малых осцилляций после выключения импульса, нами проанализирована динамика компонент магнитного момента m_x , m_y и сверхпроводящего тока I_s , которая представлена на рис. 4b. Как мы видим, во время действия импульса поля сверхпроводящий ток нарастает, а после прекращения действия импульса сверхпроводящий ток, уменьшаясь, осциллирует, вызывая осцилляции компонент магнитного момента m_x и m_y . Их осцилляции сдвинуты по фазе и продолжают затухать в течении определенного времени. Именно наличие осцилляций m_x и m_y приво-

дит к малым осцилляциям m_z после отключения импульса. Малые осцилляции сверхпроводящего тока обусловлены тем, что после отключения импульса сверхпроводящий ток замыкается на внутреннее сопротивление перехода.

Маятник Капицы

Исследования динамики ϕ_0 -перехода приводят к особенностям, напоминающим маятник Капицы, в котором положение устойчивого равновесия может измениться, если точка подвеса совершает колебания с большой частотой [31]. Периодическое воздействие сверхпроводящего тока изменяет характер осцилляций намагниченности. Результаты нашего численного моделирования показывают, что начиная с намагниченности вдоль легкой оси z , ее направление меняется во времени, и возникает стабильное состояние с магнитным моментом, лежащим между осями z и y , в зависимости от параметров системы. Изменение критического тока и параметра спин-орбитальной связи приводит к различным областям стабильности для намагниченности.

На рис. 5a,b,c представлены результаты численного расчета динамики компонент намагниченности m_z , m_y , m_x при $G = 25$, $r = 0.5$ и $\alpha = 0.5$, $\omega = 5$, при которых значения компонент стабилизируются в области определенных средних значений между нулем и единицей.

Результаты численных расчетов G -зависимости средней величины m_y при тех же параметрах приведены на рис. 5d. Там же приведена аналитическая зависимость для m_y :

$$m_y = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\beta^2}}{2\beta},$$

где $\beta = \frac{(Gr)^2 ra}{2\omega(1 + \alpha^2)}$, полученная на основе ме-

тода Капицы [31]. Как видно, хорошее согласие аналитических и численных результатов наблюдается при малых значениях отношения джозефсоновской энергии к магнитной, определяемым параметром G .

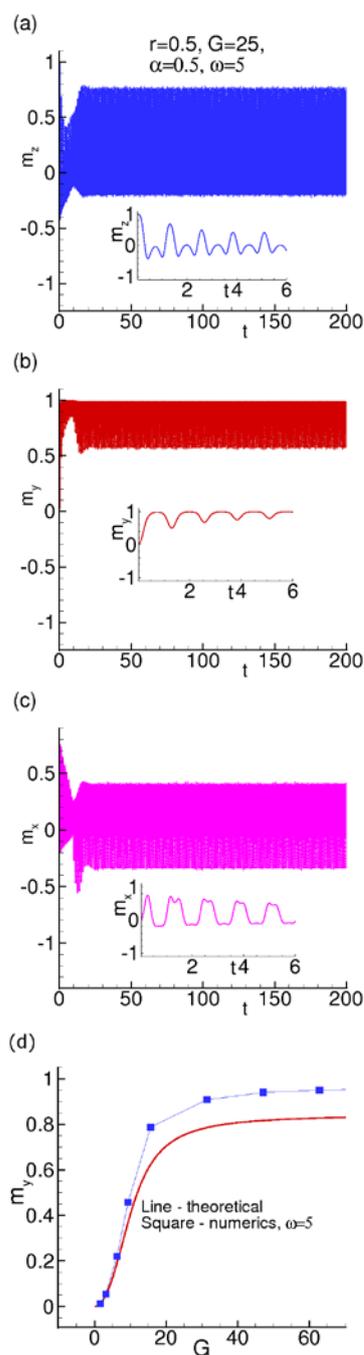


Рис. 5. (a–c) Динамика компонент намагниченности m_z , m_y , m_x при $G = 25$, $r = 0.5$ и $\alpha = 0.5$, $\omega = 5$; (d). Сравнение данных аналитических и численных расчетов для G -зависимости средней величины m_y при тех же параметрах. Тонкая линия, соединяющая численные данные, приведена для удобства

СФС-структура в циркулярно поляризованном магнитном поле

Нами рассмотрен SFS джозефсоновский переход в магнитном поле, динамика которого описывается системой уравнений, включаю-

щей уравнение обобщенной RCSJ-модели, а также уравнения Ландау – Лифшица – Гильберта [16; 40; 24]. В результате численного решения соответствующей системы уравнений определяются временные зависимости для разности фаз, напряжения на переходе и компонент намагниченности, где все использованные величины нормированы соответствующим образом [16; 40; 24].

На рис. 6a продемонстрировано проявление ферромагнитного резонанса на частотной зависимости амплитуды осцилляций компоненты намагниченности m_y при частоте внешнего поля $\Omega_0 = 0.5$. Мы видим, что максимум амплитуды осцилляций m_y реализуется при частоте, равной частоте внешнего циркулярно поляризованного магнитного поля. В работе [32] было показано, что на вольт-амперной характеристике джозефсоновского перехода под действием внешнего электромагнитного излучения с частотой ω возникают лестничные структуры, следующие алгоритму обобщенной формулы для непрерывных дробей

$$V = (N \pm 1 / (n \pm 1 / (m \pm 1 / p \dots))) \omega, \quad (7)$$

где N , n , m , p , ... – положительные целые числа; ω – частота внешнего электромагнитного поля. В зависимости от амплитуды поля и точности измерения электрического тока на вольт-амперной характеристике наблюдаются ступеньки до определенного целого числа в формуле (7). В нашем случае взаимосвязь магнитной системы с джозефсоновским током и наличие прецессии магнитного момента проявляется на вольт-амперной характеристике в виде особенностей в области напряжений, соответствующих частоте ферромагнитного резонанса. Как следует из результатов численного расчета, периодическое воздействие со стороны магнитного поля на сверхпроводящий ток приводит к картине, аналогичной воздействию электромагнитного излучения, и возникновению лестничных структур шапиро-подобных ступенек тока, когда частота циркулярно поляризованного магнитного поля равна собственной частоте магнитной системы.

На рис. 6b приведена часть вольт-амперной характеристики при ферромагнитном резонансе, демонстрирующая две лестничные структуры в интервале напряжений $V = 0$ и $V = 1$. Анализ на основе формулы (7) показывает, что обе лестничные структуры описываются формулой непрерывных дробей второго уровня $N-1/n$ и $(N-1)-1/n$ с $N = 1$

в первом случае и $N = 2$ во втором. Возникновение лестничных структур обусловлено синхронизацией джозефсоновской частоты с частотой прецессии магнитного момента, которая в случае резонанса равна частоте приложенного циркулярно поляризованного магнитного поля. Одним из интересных направлений развития данных исследований было бы обобщение полученных здесь результатов в рамках теоретических работ [15; 25; 41], рассматривающих наведенную динамику в ДП, связанном с наномангнитом, а также проявление эффектов магнитного поля и спин-орбитального взаимодействия на джозефсоновское туннелирование между сверхпроводящими проволоками.

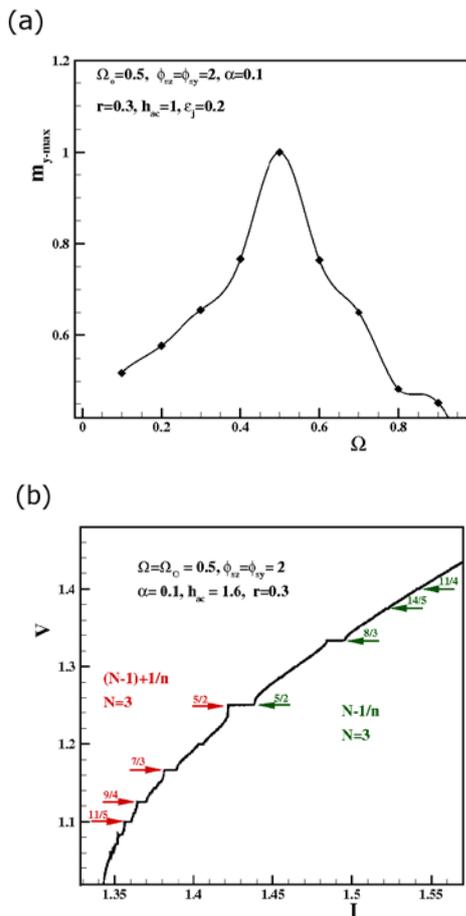


Рис. 6. (а) Проявление ферромагнитного резонанса на частотной зависимости амплитуды осцилляций от компоненты намагниченности m_y . Ω и h_{ac} есть частота и амплитуда циркулярно поляризованного магнитного поля; α , Φ и ϵ_j – параметры модели (см. [16; 40]); (б) часть вольт-амперной характеристики при ферромагнитном резонансе, демонстрирующая лестничные структуры, описываемые формулой непрерывных дробей

Таким образом, проявление взаимодействия магнитной системы и джозефсоновского тока на вольт-амперных характеристиках SFS джозефсоновских переходов возникает в виде лестничных структур, положение ступенек которых определяется обобщенной формулой для непрерывных дробей. Мы полагаем, что продемонстрированные возможности управления магнитными свойствами посредством джозефсоновского тока, а также влияние прецессии магнитного момента на джозефсоновский ток могут найти применения в различных областях спинтроники.

Заключение

В заключение отметим, что актуальность исследований свойств ϕ_0 -перехода, в котором разность фаз непосредственно связана с магнитным моментом в барьере, обусловлена уникальной возможностью управления магнитными свойствами барьера посредством сверхпроводящего тока, а также, в свою очередь, с возможностью влияния на джозефсоновский ток магнитным моментом барьера. Приведенные нами результаты исследования СФС-структур, касающиеся переворота магнитного момента, проявления свойств маятника Капицы, возникновения лестничных структур на вольт-амперных характеристиках в циркулярно поляризованном магнитном поле, открывают новую широкую область исследований с заманчивыми перспективами для применений. В частности, на их основе могут быть разработаны новые методы определения параметра спин-орбитальной связи [1].

Важным шагом на этом пути будут экспериментальные исследования проявлений свойств маятника Капицы в СФС-структурах, открывающие возможность изменения точки стабильности системы и дополнительного контроля намагниченности сверхпроводящим током. Интересным направлением исследований является поиск проявлений свойств маятника Капицы в рамках других структур и моделей сверхпроводниковой спинтроники. Большой интерес также вызывают исследования квантовых свойств джозефсоновских наноструктур с магнитными и топологически нетривиальными барьерами. Такие исследования позволят создать основы для разработки новых устройств сверхпроводниковой спинтроники.

Авторы благодарны А. Буздину, М. Nashaat, А. Е. Votha за полезное обсужде-

ние результатов работы и ценные замечания, S. Dubnichka, F.-D. Vuzatu и W. Chmielowski за поддержку данной работы в рамках сотрудничества JINR-Slovakia, JINR-Romania, а также программой Bogoliubov–Infeld. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 18-02-00318, 18-52-45011, а также молодежного гранта ОИЯИ 18-302-08. Численные расчеты в данной работе выполнены при поддержке гранта РФФИ (проект 18-71-10095).

Библиографический список

1. Assouline, A. Spin-Orbit induced phase-shift in Bi₂Se₃ Josephson junctions / A. Assouline, Ch. Feuillet-Palma, N. Bergeal, T. Zhang, Al. Mottaghizadeh, A. Zimmers, E. Lhuillier, M. Marangolo, M. Eddrief, P. Atkinson, M. Aprili, H. Aubin // *Cond-Mat.* arXiv:1806.01406.
2. Atanasova, User Software for Numerical Study of Josephson Junction with Magnetic Momenta / P. Atanasova, S. Panayotova, Yu. Shukrinov, I. Rahmonov, E. Zemlyanaya // *EPJ Web of Conferences.* – 2018. – V. 173. – 05002.
3. Atanasova, P. Kh. Investigation of magnetic precession in superconductor-ferromagnet-superconductor Josephson junctions / P.Kh. Atanasova, S.A. Panayotova, Yu.M. Shukrinov, I.R. Rahmonov, E.V. Zemlyanaya // *Nanophysics and Nanoelectronics. Proceedings of XXII International symposium (March 12–15, 2018, Nizhniy Novgorod)* // Publishing house of Nizhniy Novgorod State University, ISBN 978-5-91326-446-6. – 2018. – V. 1. – P. 7–8.
4. Bobkova, I. V. Gauge theory of the long-range proximity effect and spontaneous currents in superconducting heterostructures with strong ferromagnets / I.V. Bobkova, A.M. Bobkov, M.A. Silaev // *Phys. Rev.* – 2017. – B 96. – 094506.
5. Buzdin, A. I. Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures / A.I. Buzdin // *Rev. Mod. Phys.* – 2005. – V. 77. – P. 935.
6. Buzdin, A. Direct Coupling Between Magnetism and Superconducting Current in the Josephson ϕ_0 -junction / A.I. Buzdin // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – V. 101. – P. 107005.
7. Cai, L. Interaction of a nanomagnet with a weak superconducting link / L. Cai, E.M. Chudnovsky // *Phys. Rev.* – 2010. – B 82. – 104429.
8. Cai, L. Reversal of magnetization of a single-domain magnetic particle by the ac field of time-dependent frequency / L. Cai, D.A. Garanin, E.M. Chudnovsky // *Phys. Rev.* – 2013. – B 87. – 024418.
9. Dong, Z. W. Magnetization-dependent critical current of intrinsic Josephson junctions in Co/Au/Bi₂Sr₂CaCu₂O_y mesa structures / Z.W. Dong, R. Ramesh, T. Venkatesan, M. Johnson, Z.Y. Chen, S.P. Pai, V. Talyansky, R.P. Sharma, R. Shreekala, C.J. Lobb, R.L. Greene // *Appl. Phys. Lett.* – 1997. – V. 71. – 1718.
10. Fabian, Z. J. Spintronics: Fundamentals and applications / Z.J. Fabian, S.D. Sarma // *Rev. Mod. Phys.* – 2004. – V. 76. – P. 323.
11. Fratila, L. Spin-polarized quasiparticles injection in La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/SrTiO₃/Nb heterostructure devices / L. Fratila, I. Maurin, C. Dubourdieu, J.C. Villégier // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – V. 86. – P. 122505.
12. Golovchanskiy, I. A. Ferromagnetic resonance with long Josephson junction / I.A. Golovchanskiy, N.N. Abramov, V.S. Stolyarov, O.V. Emelyanova, A.A. Golubov, A.V. Ustinov, V.V. Ryazanov // *Sci. Technol.* – 2017. – V. 30. – P. 054005.
13. Golubov, A. Superconductivity: Controlling magnetism / A. Golubov, M.Yu. Kupriyanov // *Nature Materials.* – 2017. – V. 16. – P. 156–157.
14. Golubov, A. A. The current-phase relation in Josephson junctions / A.A. Golubov, M.Y. Kupriyanov, E. Il'ichev // *Rev. Mod. Phys.* – 2004. – V. 76. – P. 411.
15. Ghosh, R. Magnetization-induced dynamics of a Josephson junction coupled to a nanomagnet / R. Ghosh, M. Maiti, Yu.M. Shukrinov, K. Sengupta // *Phys. Rev.* – 2017. – B 96. – P. 174517.
16. Hikino, Sh. Ferromagnetic Resonance Induced Josephson Current in a Superconductor/Ferromagnet/Superconductor Junction / Sh. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, S. Maekawa // *Journal of the Physical Society of Japan.* – 2008. – V. 77(5). – P. 053707–053707.
17. Irie, A. Spin Flows in Magnetic Semiconductor/Insulator/Superconductor Tunneling Junction / A. Irie, M. Otsuka, K. Murata, K. Yamaki, M. Kitamura // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2015. – V. 25. – P. 1800404.
18. Kitamura, M. Spin Flows in Magnetic Semiconductor/Insulator/Superconductor Tunneling Junction / M. Kitamura, A. Irie // *International Journal of Superconductivity.* – 2015. – V. 2015. – Article ID 273570.
19. Kitamura, M. Charge and Spin Currents in Ferromagnet-Insulator-Superconductor Tunneling Junctions Using Hg-1223 High-T_c Superconductor / M. Kitamura, Y. Uchiyumi, A. Irie // *International Journal of Superconductivity.* – 2014. – 957045. – P. 15.
20. Kongschelle, F. Magnetic Moment Manipulation by a Josephson Current / F. Kongschelle, A. Buzdin // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – V. 102. – P. 017001.
21. Linder, J. Superconducting spintronics / J. Linder, W.A. Jason Robinson // *Nat. Phys.* – 2015. – V. 11. – P. 307.
22. Mai, S. Interaction of Josephson and magnetic oscillations in Josephson tunnel junctions with a ferromagnetic layer / S. Mai, E. Kandelaki, A.F. Volkov, K.B. Efetov // *Phys. Rev.* – 2011. – B 84. – 144519.

23. Mal'shukov, A. G. Inverse spin Hall effect in superconductor/normal-metal/superconductor Josephson junctions / A.G.Mal'shukov, S. Sadjina, A. Brataas // *Phys. Rev.* – 2010. – B 81. – 060502.
24. Nashaat, M. Devil's staircases in the IV characteristics of superconductor/ferromagnet/superconductor Josephson junctions / Nashaat M., Botha A.E., Shukrinov Yu.M. // *Phys. Rev.* – 2018. – B 97. – 224514.
25. Nakhmedov, E. Effect of magnetic field and Rashba spin-orbit interaction on the Josephson tunneling between superconducting nanowires / E. Nakhmedov, O. Alekperov, F. Tatar, Yu.M. Shukrinov, I. Rahmonov, K. Sengupta // *Physical Review.* – 2017. – B 96. – 014519.
26. Pfeiffer, J. Static and dynamic properties of 0 , π , and $0-\pi$ ferromagnetic Josephson tunnel junctions / J. Pfeiffer, M. Kemmler, D. Koelle, R. Kleiner, E. Goldobin, M. Weides, A.K. Feofanov, J. Lisenfeld, A.V. Ustinov // *Phys. Rev.* – 2008. – B 77. – 214506.
27. Plausinaitiene, V. Spin-polarized quasiparticle injection effect in MOCVD-grown $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{SrTiO}_3/\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ heterostructures / V. Plausinaitiene, A. Abrutis, B. Vengalis, R. Butkute, J.P. Senateur, Z. Saltyte, V. Kubilius // *Physica.* – 2001. – C 351. – 13.
28. Soltan, S. Ferromagnetic/superconducting bilayer structure: A model system for spin diffusion length estimation / S. Soltan, J. Albrecht, H-U. Habermeier // *Phys. Rev.* – 2004. – B 70. – 144517.
29. Shukrinov, Yu.M. Superconducting Spintronics in the Presence of Spin-Orbital Coupling / Yu.M. Shukrinov, I.R. Rahmonov, A. Buzdin, K. Sengupta, G. Filatella // *The extended abstract of 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2017).* – Sorrento, Italy, 2017. – ID143.
30. Shukrinov, Yu.M. Superconducting Spintronics in the Presence of Spin-Orbital Coupling / Yu.M. Shukrinov, I.R. Rahmonov, A.E. Botha // *IEEE transactions on applied superconductivity.* – 2018. – 28. – 1800505.
31. Shukrinov, Yu.M. Re-orientation of easy axis in Φ_0 -junction / Yu.M. Shukrinov, A. Mazanik, I.R. Rahmonov, A.E. Botha, A. Buzdin // *Europhysics Letters, EPL.* – 2018. – 122. – 37001.
32. Shukrinov, Yu.M. Devil's staircases and continued fractions in Josephson junctions / Yu.M. Shukrinov, S.Yu. Medvedeva, A.E. Botha, M.R. Kollahchi, A. Irie // *Phys. Rev.* – 2013. – B 88. – 214515.
33. Shukrinov, Yu.M. Magnetization reversal by superconducting current in Φ_0 Josephson junctions / Yu.M. Shukrinov, I.R. Rahmonov, K. Sengupta, A. Buzdin // *Appl. Phys. Lett.* – 2017. – 110. – 182407.
34. Yeh, N-C. Nonequilibrium superconductivity under spin-polarized quasiparticle currents in perovskite ferromagnet-insulator-superconductor heterostructures / N-C. Yeh, R.P. Vasquez, C.C. Fu, Li.Y. Samoilov, K. Vakili // *Phys. Rev.* – 1999. – B 60. – 10522.
35. Vas'ko, V. A. Critical Current Suppression in a Superconductor by Injection of Spin-Polarized Carriers from a Ferromagnet / V.A.Vas'ko, V.A. Larkin, P.A. Kraus, K.R. Nikolaev, D.E. Grupp, C.A. Nordman, A.M. Goldman // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – 78. – 1134.
36. Volkov, A. F. Hybridization of Spin and Plasma Waves in Josephson Tunnel Junctions Containing a Ferromagnetic Layer / A.F. Volkov, K.B. Efetov // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – 103. – 037003.
37. Weides, M. $0-\pi$ Josephson Tunnel Junctions with Ferromagnetic Barrier / M. Weides, M. Kemmler, H. Kohlstedt, R. Waser, D. Koelle, R. Kleiner, E. Goldobin // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – 97. – 247001.
38. Рахронов, И. Р. Переворот магнитного момента импульсом внешнего магнитного поля в одноконтантном СКВИДе с Φ_0 -переходом / И.Р. Рахронов, Ю.М. Шукринов // *Нанофизика и наноэлектроника. Труды XXII Международного симпозиума.* – Нижний Новгород : Изд-о Нижегородского гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2018. – С. 11–12.
39. Рахронов, И. Р. Фазовая динамика SFS структуры и переворот магнитного момента / И.Р. Рахронов, Ю.М. Шукринов, М.В. Михайлова, К. Sengupta, А. Нахмедов // *Нанофизика и наноэлектроника. Материалы XXI Международного симпозиума.* – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2017. – С. 96–97.
40. Шукринов, Ю. М. Джозефсоновские наноструктуры с ферромагнитными слоями / Ю.М. Шукринов, М. Nashaat, А.Е. Botha // *Нанофизика и наноэлектроника. Труды XXII Международного симпозиума.* – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2018. – С. 11–12.
41. Шукринов, Ю. М. Моделирование джозефсоновских наноструктур / Ю.М. Шукринов, И.Р. Рахронов, К.В. Куликов, А.Е. Botha, К. Sengupta, Р. Seidel // *Нанофизика и наноэлектроника. Материалы XXI Международного симпозиума.* – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2017. – С. 122–123.
42. Шукринов, Ю. М. Влияние спин-орбитальной связи на генерацию магнитной прецессии джозефсоновским током / Ю.М. Шукринов, И.Р. Рахронов, А. Бuzдин, N. Vonduradhaaya // *Нанофизика и наноэлектроника. Материалы XX Международного симпозиума.* – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2016. – С. 139–140.