

Влияние переменного тока на токовые состояния квантового интерферометра, шунтированного сверхпроводящей индуктивностью

С.И. Линк, В.П. Коверя, А.В. Кревсун, С.И. Бондаренко

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Науки, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: bondarenko@ilt.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г., после переработки 11 апреля 2018 г., опубликована онлайн 26 сентября 2018 г.

Установлены закономерности обратимого изменения критического тока и дискретных токовых состояний структуры в виде сверхпроводящего квантового интерферометра, шунтированного сверхпроводящей индуктивностью, при пропускании через структуру переменного транспортного тока и при одновременном с постоянным транспортным током воздействии внешнего переменного магнитного поля. Обнаружен новый тип дискретных стационарных состояний структуры при переходе интерферометра в резистивное состояние, вызванное совместным действием постоянного и переменного транспортных токов.

Ключевые слова: квантовый интерферометр, шунтирующая индуктивность, транспортный ток, магнитное поле, дискретные состояния.

1. Введение

Работа посвящена изучению токовых характеристик сверхпроводящего квантового интерферометра (СКИ), шунтированного большой, по сравнению с индуктивностью СКИ, сверхпроводящей индуктивностью (СИ) (см. рис. 1).

Шунтирование СКИ с помощью СИ был предложен нами несколько лет назад [1–4]. Как было показан

но [2,3], с помощью такой структуры можно одновременно измерять энергетическую щель и время релаксации сверхпроводящего состояния сверхпроводников. При этом может быть существенно повышена точность измерения этих основных параметров сверхпроводников по сравнению с ранее известными методами. Математическое описание процессов в структуре СКИ-СИ находится в стадии разработки. Некоторые модельные представления о них анализируются в настоящей работе.

Ранее другими авторами было предложено и широко исследовалось шунтирование СКИ с помощью омических сопротивлений [5], электрических емкостей [6] и индуктивностей из несверхпроводящих металлов [7]. Результатом создания таких структур явилось управление различными электрическими характеристиками СКИ с целью расширения области их применения в науке и технике.

Целью настоящей работы было экспериментальное изучение новых характеристик структуры СКИ-СИ, содержащих дополнительную информацию о ее токовых состояниях. В отличие от основных характеристик структуры каждая из новых характеристик связывает не два электрических параметра, а три. Например, зависимость $I_1(I)$ приобретает иной вид при дополнительном воздействии на структуру путем наложения на

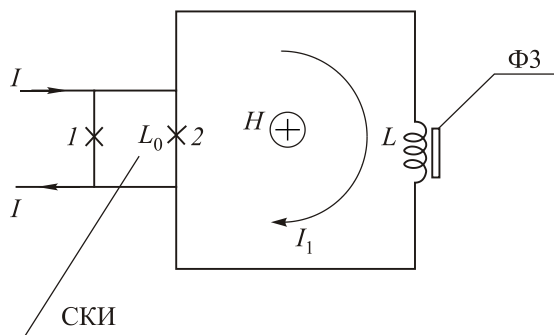


Рис. 1. Схема структуры СКИ-СИ; 1, 2 — контакты Джозефсона, I — поступающий в структуру транспортный ток, I_1 — ток в большой сверхпроводящей индуктивности L , ФЗ — датчик феррозондового магнитометра.

контур с СИ поля H или добавлением переменного транспортного тока I . Всего изучены (подробнее см. разд. 2, 3) четыре новые зависимости, позволяющие установить токовые квантовые состояния структуры при комплексном воздействии постоянного и переменного транспортных токов, а также постоянного и переменного магнитных полей.

2. К теории основных характеристик структуры СКИ-СИ

Важной работой, послужившей отправным моментом при создании и изучении структуры СКИ-СИ, явилась фундаментальная статья Сильвера и Циммермана, опубликованная 50 лет назад [8]. В статье исследованы токовые квантовые состояния простейшего СКИ с одним сверхпроводящим точечным контактом (рис. 2(а)).

Наложение внешнего магнитного поля H_e на контур СКИ вызывает возникновение в нем циркулирующего тока i , который по мере увеличения H_e достигает значения i_c . При выполнении условия

$$L_0 i_c / (\Phi_0 / 2) = 1, \quad (1)$$

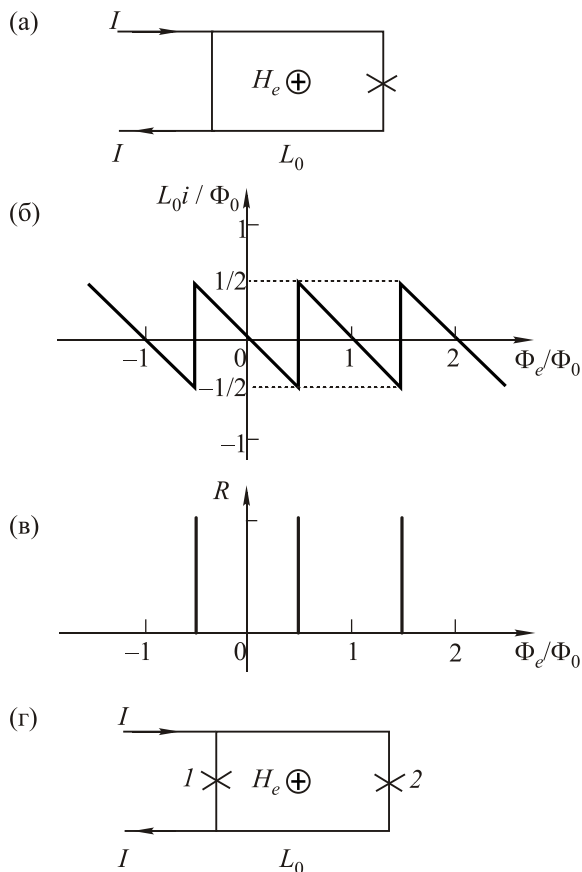


Рис. 2. Схема одноконтактного СКИ (а) и его характеристики в зависимости от внешнего магнитного потока Φ_e поля H_e (при условии $L_0 i_c / (\Phi_0 / 2) = 1$, см. текст) для нормированных величин: циркулирующего тока (i) интерферометра [8] (б) и импульсно возникающей резистивности (R) СКИ (в), схема двухконтактного СКИ (г).

где L_0 , i_c , Φ_0 — индуктивность, критический ток контакта контура СКИ и квант магнитного потока, существует периодическая зависимость тока i от внешнего магнитного потока Φ_e (рис. 2(б)) с дискретными переходами тока i при полуквантовых значениях потока внешнего магнитного поля с периодом $\Delta\Phi_e = \Phi_0$. При этом магнитный поток Φ в контуре СКИ изменяется также дискретно квантами потока Φ_0 [8]. Во время скачка циркулирующего тока СКИ на нем кратковременно возникает напряжение и резистивность R (рис. 2(в)). Аналогичные зависимости $i(\Phi)$ и $\Phi(\Phi_e)$ также имеют место и в том случае, если магнитный поток Φ_e создается постоянным транспортным током I , текущим через такой СКИ (рис. 2(а)) [8].

Основными электрическими характеристиками структуры СКИ-СИ являются: зависимость тока (I_1) через СИ от величины постоянного транспортного тока (I) через СКИ [1,2] и зависимость тока I_1 от внешнего постоянного магнитного поля (H) через сверхпроводящий контур с СИ при нулевом транспортном токе ($I = 0$). Типичный вид указанных зависимостей показан на рис. 3 [4].

Для анализа процессов в структуре СКИ-СИ вначале необходимо рассмотреть особенности использования в ней СКИ с двумя контактами, через который пропускается постоянный транспортный ток I (рис. 2(г)). Для того, чтобы этот ток создавал магнитный поток Φ_e через контур такого СКИ, необходимо, чтобы он был асимметричным по величине критических токов контактов. Следует отметить, что появление результирующего магнитного потока Φ_e в сверхпроводящем контуре с относительно большой индуктивностью (10^{-8} Гн) с двумя различными по критическому току плочными мостиковыми контактами по одному в каждой из его ветвей было недавно нами подтверждено прямыми измерениями магнитного поля на поверхности этого контура [9]. Там же было показано, что начало появления магнитного потока в таком контуре происходит плавно, т.е. без скачка, и соответствует достижению критического тока более слабого мостика.

Структура СКИ-СИ, показанная на рис. 1, фактически является большим сверхпроводящим контуром, одна из ветвей которого является асимметричным двух-

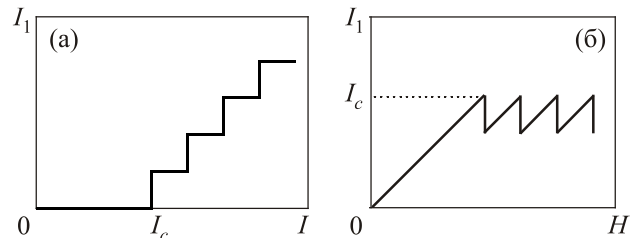


Рис. 3. Схематический вид типичных основных характеристик структуры СКИ-СИ с критическим током I_c : зависимости тока I_1 в ветви с индуктивностью L (рис. 1) от транспортного тока I (а) и от внешнего магнитного поля H (б).

контактным СКИ с экстремально малой индуктивностью ($L_0 \approx 10^{-13}$ Гн) [2,3], а другая является его частью со значительно большей индуктивностью ($L = 10^{-6}$ Гн).

Рассмотрим особенности процессов в такой структуре. Вначале остановимся на причине появления первой из основных зависимостей, а именно на зависимости $I_1(I)$, показанной на рис. 3(а).

В большинстве из исследованных нами экземпляров структуры критический ток, соответствующий первому скачку на зависимости $I_1(I)$, был существенно больше, чем протяженность ступеней вдоль направления тока I . При этом протяженность и высота ступеней равны друг другу, а их период по току I соответствует периоду интерференционных изменений напряжения на изолированном от контура СКИ (в виде прижимного точечного контакта (ПТК)) в резистивном состоянии, если пропускать ток по одному из микропроводов, образующих СКИ. Подобные интерференционные зависимости можно также получить, воздействуя на изолированный СКИ внешним магнитным полем. Это является доказательством того, что при токе I , большем критического тока структуры (I_c), периодические ступени на зависимости $I_1(I)$ являются следствием периодического изменения квантовых токовых состояний асимметричного СКИ под действием магнитного потока, создаваемого в нем током I . Теперь рассмотрим состояние СКИ при $I < I_c$. На определенном значительном промежутке роста транспортного тока от нуля этот ток не создает в нем магнитного потока Φ в силу закона Лауэ о распределении тока в сверхпроводящем двухсвязном контуре СКИ. Первым достигает критического состояния один из двух микроконтактов СКИ (рис. 1), имеющий меньший критический ток (обозначим его I_{c1}). При этом СКИ в целом остается в сверхпроводящем состоянии. Дальнейшее увеличение тока I вызывает появление потока Φ в СКИ, так как транспортный ток через первый контакт не меняется, а начинает течь только через второй с большим критическим током I_{c2} . В результате в контуре СКИ появляется дополнительный диамагнитный циркулирующий ток i , подобный тому, который показан на рис. 2(б). Если эта добавка (Δi) составит значение, соответствующее соотношению

$$L_0 \Delta i / (\Phi_0 / 2) = L_0 (I_{c2} - I_{c1}) / (\Phi_0 / 2) = 1, \quad (2)$$

то в контур СКИ, по нашему мнению, скачком войдет квант потока Φ_0 , подобно тому как это происходит в случае одноконтактного СКИ в соответствии с соотношением (1). Как видно из (2), в случае использования двухконтактного асимметричного СКИ в составе структуры СКИ-СИ возникновение в ней критического квантового состояния определяется разностью критических токов микроконтактов СКИ, а не абсолютными их значениями. В момент входа кванта потока на СКИ, как было показано в [2], возникает импульс напряжения

$V_i = \Phi_0 / \delta t$, δt — длительность импульса, $\delta t \approx L / R$, R — резистивность СКИ в момент импульса. Появление резистивности СКИ приводит к скачкообразному переключению части транспортного тока $\Delta I = \Delta i = I_{c2} - I_{c1} = \Phi_0 / 2L_0$ в контур СИ (рис. 3(а)). Ток I_1 в СИ увеличивается на величину $\Delta I_1 = \Phi_0 / 2L_0$. После этого сверхпроводимость СКИ восстанавливается, но ток через него становится равным нулю, так как вернувшийся в СКИ транспортный ток, равный ΔI , компенсируется противоположно направленным и равным по величине замороженным в большом контуре структуры СКИ-СИ током ΔI_1 . При дальнейшем увеличении транспортного тока ($I > \Phi_0 / 2L_0$) через СКИ в нем вновь возникает диамагнитный ток при сохранении в СИ замороженного тока ΔI_1 . Сохранение замороженного тока I_1 при дальнейшем увеличении тока I до достижения нового скачка циркулирующего тока означает образование «плато» на зависимости $I_1(I)$. Дальнейшее увеличение транспортного тока приводит к периодическому повторению описанного выше процесса и периодическому формированию следующих «ступеней» на этой зависимости.

Теперь рассмотрим токовые процессы при формировании зависимости $I_1(H)$. При этом считаем, что асимметричный СКИ в структуре СКИ-СИ обладает теми же свойствами, которые были приведены для СКИ с транспортным током. Увеличение внешнего магнитного поля H создает в большом (с СИ) контуре структуры магнитный поток Φ_1 и возбуждает в нем диамагнитный ток I_1 :

$$I_1 = \Phi_1 / L = (\mu_0 HS) / L, \quad (3)$$

где μ_0 , S , L — соответственно, магнитная проницаемость воздуха, площадь большого контура СКИ-СИ, индуктивность этого контура. Этот ток, в свою очередь, возбуждает магнитный поток $\Phi_e \equiv \Phi_2$ в контуре СКИ. Поток Φ_2 вызывает появление диамагнитного циркулирующего тока $i = \Phi_2 / L_0$ в контуре СКИ. В случае выполнения соотношения (2) вначале диамагнитный ток i увеличивается пропорционально росту H вплоть до достижения соотношения $\Delta i = (I_{c2} - I_{c1}) = \Phi_0 / (2L_0)$. В этот момент ток i в СКИ скачком меняет свое направление с диамагнитного на парамагнитное. Магнитный поток в СКИ в этот момент равен $\Phi_0/2$. Одновременно со скачком тока i в СКИ на нем должен возникать импульс напряжения и кратковременная резистивность в контуре СКИ-СИ. Квант потока Φ_0 входит в большой контур структуры. Ток I_1 уменьшается на $\Delta I_1 = (I_{c2} - I_{c1})$. После этого структура возвращается в сверхпроводящее состояние. Действующее в это время магнитное поле H вызывает диамагнитный ток в СКИ, который компенсирует указанный выше парамагнитный ток. В результате после изменения потока в СКИ на половину кванта ток через него не течет. Дальнейшее увеличение поля вновь возбуждает диа-

магнитные токи в большом контуре и в СКИ, т.е. токовый процесс повторяется. Таким образом возникает периодичность повторения резких («пилообразных») спадов диамагнитного тока в большом контуре согласно приведенной модели токовых процессов. Зависимость на рис. 3(б) соответствует описанным выше изменениям токов в структуре.

Из изложенного следует также, что глубина модуляции тока I_1 на зависимости $I_1(H)$ должна быть равной размеру ступеней на зависимости $I_1(I)$.

3. Постановка эксперимента

В настоящей работе структура СКИ-СИ представляется собой цилиндрическую катушку с индуктивностью $L \approx 10^{-6}$ Гн из сверхпроводящего ниобиевого микропровода диаметром 70 мкм, концы которой в месте их пересечения сжимались для образования прижимного точечного контакта в соответствии с рис. 4. Внутри катушки установлен датчик феррозондового магнитометра, измеряющего магнитное поле тока в катушке. Схема измерений токовых характеристик такой структуры показана на рис. 5.

Способ образования структуры СКИ-СИ подобен описанному в наших ранних работах [1–3]. ПТК в месте прижатия ниобиевых микропроводов представляет собой один ($k = 1$) или несколько ($k > 1$) микроконтактов в зависимости от структуры поверхности микропровода и силы сжатия микропроводов [8]. В случае образования двух микроконтактов ($k = 2$) такой ПТК является двухконтактным СКИ постоянного тока [5]. Для исследования отбирались такие ПТК, которые при их исследовании в жидком гелии имели типичную для двухконтактного СКИ периодическую зависимость напряжения от внешнего магнитного поля [5]. Внутри цилиндрической сверхпроводящей катушки, являющейся частью СИ, помещался датчик (ФЗ) феррозондового магнитометра (см. рис. 5) с чувствительностью 10^{-5} Э.

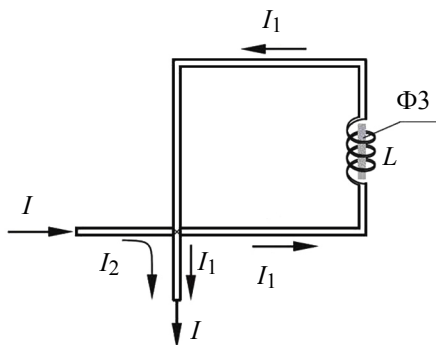


Рис. 4. Схема экспериментальной структуры СКИ-СИ: I_2 — направление транспортного тока I до достижения им критической величины в прижимном контакте, I_1 — направление транспортного тока после достижения им критической величины в контакте.

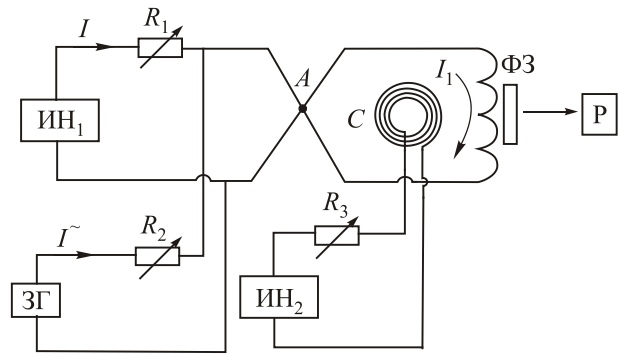


Рис. 5. Электрическая схема измерений: ИН₁ — источник напряжения для создания тока I , ИН₂ — источник напряжения для создания тока в плоской катушке C , генерирующей магнитное поле H , ЗГ — генератор звуковых частот для создания переменного тока \tilde{I} в виде транспортного тока или в виде тока через плоскую катушку C , P — регистратор величины магнитного поля, измеряемого с помощью феррозонда ФЗ, A — прижимной точечный контакт ниобий–ниобий, образованный в точке пересечения ниобиевых микропроводов.

При возникновении тока в катушке СИ датчик измерял магнитное поле этого тока. Для определения величины возникающего в этой катушке тока проводилась предварительная калибровка магнитометра пропусканием известного тока через эту катушку и отчета показания магнитометра. Транспортные постоянный (I) и переменный (\tilde{I}) токи подавались к СКИ согласно схеме, показанной на рис. 5. Постоянный и переменный токи могли регулироваться в пределах 0–1 А и 0–50 мА соответственно. Частота переменного тока устанавливалась с помощью низкочастотного генератора звуковых частот в диапазоне 20–75 Гц. Магнитное поле (H) создавалось в результате пропускания постоянного тока через плоскую медную катушку с внешним диаметром 8 мм. Катушка размещалась в плоскости контура СИ в пространстве с площадью около 1 см^2 между ПТК и датчиком ФЗ. Магнитные оси датчика ФЗ и катушки были взаимно перпендикулярны, что исключало прямое воздействие поля катушки на датчик ФЗ. Соотношение между величиной магнитного поля H , создаваемого плоской катушкой, и током I_H , возбуждаемым этим полем в СКИ, было рассчитано, исходя из геометрических размеров катушки, размеров структуры СКИ-СИ и магнитной связи между ними. Это позволило при анализе характеристик структуры СКИ-СИ (см. ниже) влияние поля H на нее выражать с помощью величины тока I_H . Структура СКИ-СИ находилась в жидком гелии при нормальном давлении ($T = 4,2$ К). Для защиты от внешних электромагнитных помех в лаборатории криостат со структурой размещался в двухслойном пермалоевом экране. Регистрация токовых характеристик структуры производилась с помощью двухкоординатного электромеханического самописца Н-307.

4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Вначале рассмотрим зависимость $I_1(I)$ при разных значениях H (рис. 6).

Видно, что увеличение I_H приводит к уменьшению критического тока СКИ. Критический ток определялся по появлению первой ступени тока I_1 . В соответствии с представлениями о процессах в данной структуре, изложенными выше, критическое состояние структуры в виде скачка тока I_1 происходит при токе I , когда магнитный поток Φ в контуре СКИ, созданный этим током, достигает полуцелого значения кванта потока Φ_0 . Образование такого потока Φ возможно, как указывалось в разд. 2, если СКИ является асимметричным. На рис. 6(б) представлена экспериментальная зависимость критического тока СКИ от величины I_H . Как оказалось для конкретной исследованной структуры, ее критический ток уменьшается на одну токовую ступень при увеличении внешнего магнитного поля H на $0,1 \text{ Э}$. Видно, что при выбранных направлениях поля и тока I реализуется линейная спадающая зависимость критического тока структуры СКИ-СИ от величины I_H . Такая зависимость может быть объяснена сложением тока I_H , возбуждаемого полем в большом контуре СКИ-СИ, и транспортного тока I . При этом полевой ток совпадает по направлению с транспортным и «забирает» на себя часть сверхпроводящего тока через СКИ. В результате критическое состояние СКИ достигается при меньшем значении транспортного тока I . При этом сумма $(I + I_H)$ остается неизменной:

$$I + I_H = I_{c0}, \tag{4}$$

где I_{c0} — значение критического тока структуры при $H = 0$.

Таким образом, зависимость $I_c(I_H)$ на рис. 6(б) может быть представлена соотношением

$$I_c = I_{c0}(1 - I_H / I_{c0}). \tag{5}$$

Теперь рассмотрим зависимость $I_1(I)$ при разных значениях переменного транспортного тока $I \sim$ (рис. 7).

При увеличении $I \sim$ вначале происходит линейное уменьшение критического тока СКИ (подобно зависимостям $I_1(I)$ при увеличении I_H), как это видно на рис. 6(б). Этот участок зависимости можно описать соотношением

$$I_c = I_{c0}(1 - I \sim / I_{c0}). \tag{6}$$

Такую зависимость можно объяснить тем, что постоянный ток I складывается с полуволной переменного тока того же направления и вызывает появление первой ступени тока I_1 при все меньших значениях постоянного I_c . Противоположная полуволна не может повлиять на величину критического тока, так как вычитается из значения тока I . Начиная со значения $I \sim \approx I_{c0}$, зависимости $I_1(I)$ начинают кардинально отличаться от зависимостей при меньших величинах $I \sim$. Появляются ступени тока I_1 с меньшими размерами и меньшим периодом между ними вплоть до их полного исчезновения при относительно небольшом превышении (δ) амплитуды переменного тока $I \sim$ над исходным критическим постоянным током СКИ I_{c0} ($I \sim \approx I_{c0} + \delta$, где δ — длина ступени при $I \sim < I_{c0}$). Объяснением указанного эффекта может быть появление резистивного состояния СКИ при $I \sim > I_{c0}$, так как при наличии переменного тока сверхпроводящая катушка с ФЗ перестает быть шунтом с нулевым импедансом, а становится индуктивным сопротивлением $x_L = 2\pi fL$ (при $f = 75 \text{ Гц}$ $x_L \approx 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$). В результате критическое состояние СКИ начинает определяться суммой полупериода переменного и величиной постоянного транспортного тока. С увеличением переменного тока доля постоянного тока при формировании токовых ступеней уменьшается и постоянный ток формирует ступени со все меньшей длиной вплоть до их исчезновения. Это новое состояние структуры можно назвать закритическим квантовым токовым состоянием в отличие от докритических квантовых со-

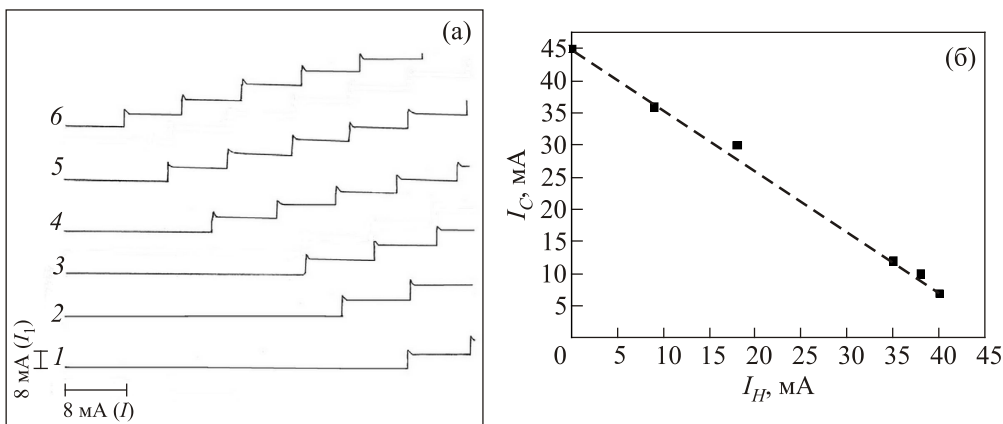


Рис. 6. Зависимости тока I_1 в индуктивности L от величины транспортного тока I при различных значениях тока I_H , мА: 0 (1), 9 (2), 18 (3), 35 (4), 38 (5), 40 (6), возбуждаемого в контуре структуры СКИ-СИ внешним магнитным полем H (а), зависимость критического тока СКИ от тока I_H (б).

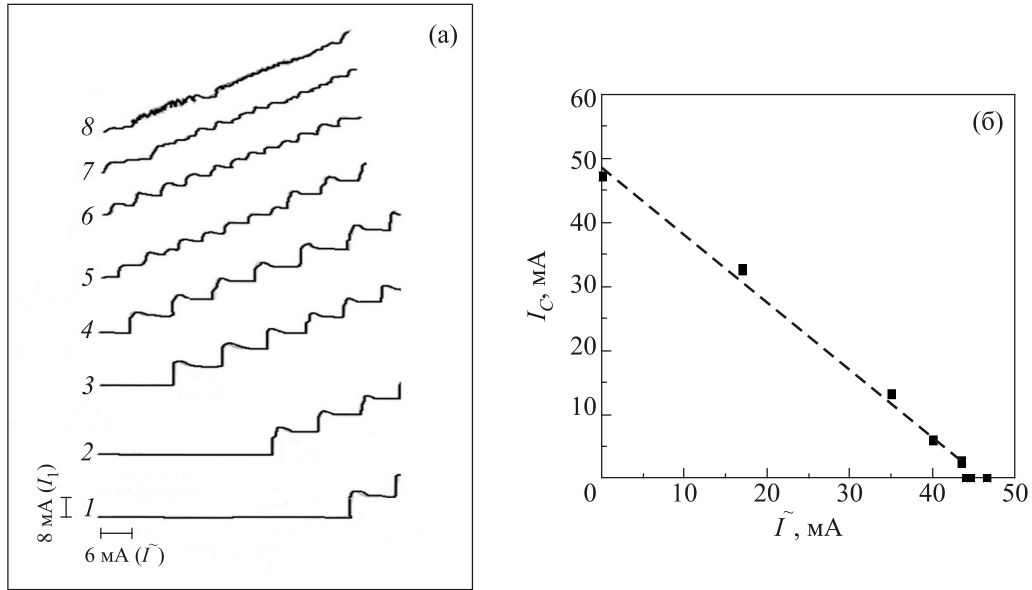


Рис. 7. Зависимости тока I_1 в индуктивности L от постоянного транспортного тока при различных значениях амплитуды переменного транспортного тока \tilde{I} , мА: 0 (1), 17 (2), 35 (3), 40 (4), 43,5 (5), 44 (6), 44,5 (7), 46,5 (8) (а); зависимость критического постоянного тока I_c СКИ от амплитуды переменного тока \tilde{I} с частотой 75 Гц (б); $I_{c0} \approx 43$ мА.

стояний при $\tilde{I} < I_{c0}$. Для уточнения закономерностей образования и исчезновения ступеней с ростом переменного тока требуются дальнейшие исследования.

Рассмотрим теперь зависимость $I_1(I_H)$ при разных I (рис. 8). На рис. 8 видно, что при увеличении транспортного тока I наблюдаемый критический ток I_c СКИ уменьшается. Зависимость критического тока от I показана на рис. 8(б). Такой вид зависимости $I_1(I_H)$ при разных I фактически является подтверждением зависимости $I_1(I)$ при различных значениях I_H . Поэтому влия-

ние на зависимость $I_1(I_H)$ тока I может быть объяснено подобно тому, как это объяснялось выше в случае влияния поля H на зависимость $I_1(I)$. При этом зависимость критического тока (I_c) СКИ от транспортного тока I выражается соотношением

$$I_c = I_{c0}(1 - I / I_{c0}). \quad (7)$$

Наконец рассмотрим зависимость $I_1(I_H)$ при разных переменных транспортных токах \tilde{I} (рис. 9).

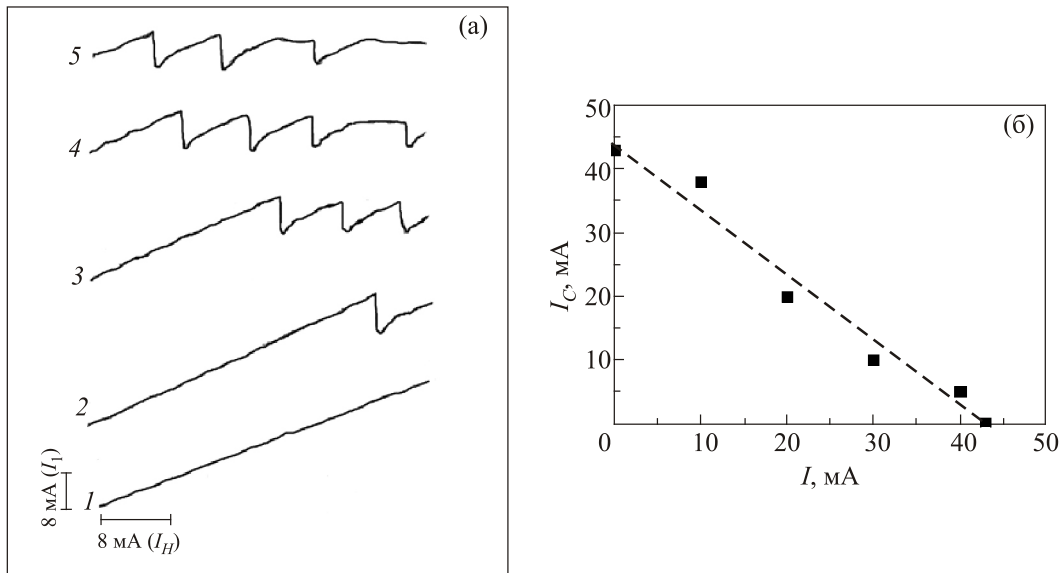


Рис. 8. Зависимости тока I_1 в индуктивности L от тока I_H , возбужденного внешним магнитным полем H в контуре структуры СКИ-СИ при различных значениях постоянного транспортного тока I , мА: 0 (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5) (а); зависимость критического тока I_c структуры от постоянного транспортного тока I (б).

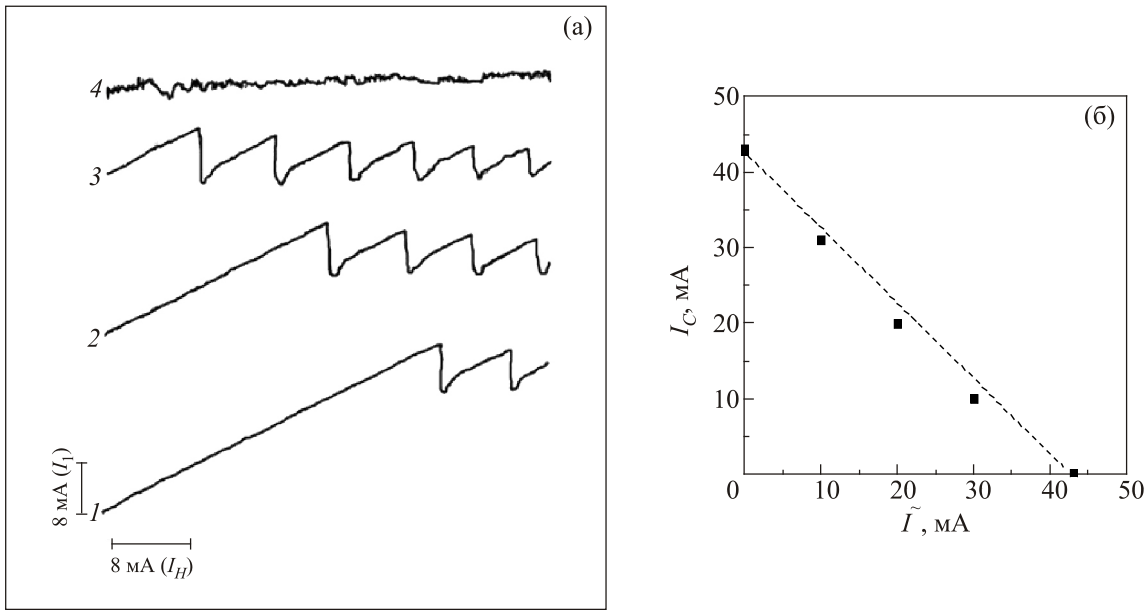


Рис. 9. Зависимости тока I_1 в индуктивности L от тока I_H , возбужденного внешним магнитным полем в контуре структуры СКИ-СИ, при различных значениях амплитуды переменного транспортного тока \tilde{I} , мА: 10 (1), 20 (2), 30 (3), 43 (4) (а); зависимость критического постоянного тока I_c СКИ от амплитуды переменного транспортного тока \tilde{I} (б).

На рис. 9 видно, что при увеличении переменного тока \tilde{I} одна из его полуволн может складываться с постоянным током (I_H), возбуждаемым внешним магнитным полем. Это сложение вызывает уменьшение необходимого для достижения критического состояния СКИ тока I_H , а следовательно, и внешнего поля H . Таким образом, видно, что наблюдаемое влияние \tilde{I} на критическое состояние структуры аналогично влиянию тока \tilde{I} на характеристику $I_1(I)$, рассмотренную выше. Полученную зависимость можно описать соотношением

$$I_c = I_{c0}(1 - \tilde{I} / I_{c0}). \quad (8)$$

Следует отметить, что влияние переменного тока на все описанные характеристики не зависело от частоты переменного тока в диапазоне частот $f = 20\text{--}75$ Гц.

5. Заключение

Измерения тока I_1 , возникающего в большой индуктивности структуры СКИ-СИ при одновременном протекании через нее токов от двух различных источников, существенно расширило представление о возможных квантовых состояниях этой структуры. Благодаря этим измерениям установлена и объяснена возможность управления критическим постоянным током (I_c) СКИ несколькими способами. В частности, обнаружено, что управление постоянным критическим током можно проводить с помощью переменного транспортного (\tilde{I}) и переменного тока (\tilde{I}_H), создаваемого внешним переменным магнитным полем. Эта особенность позволяет прогнозировать влияние реально существующих в простран-

стве электромагнитных помех на точность измерения энергетической щели и времени релаксации сверхпроводящего состояния интерференционным методом.

Обнаружено, что изменение критического транспортного тока I_c СКИ и квантовых «ступеней» тока I_1 через индуктивность при совместном действии постоянного и переменного транспортных токов существенно зависит от соотношения значений \tilde{I} и I_{c0} (I_{c0} — критический ток структуры при $\tilde{I} = 0$). При $(\tilde{I} + I) \leq I_{c0}$ переменный ток вызывает только уменьшение наблюдаемого критического постоянного тока СКИ вплоть до нуля при сохранении размеров и периодичности квантовых ступеней тока I_1 . При $\tilde{I} > I_{c0}$ переменный ток вызывает уменьшение высоты и длины ступеней вплоть до нуля при $\tilde{I} \approx I_{c0} + \delta$ (δ — длина ступеней при $\tilde{I} < I_{c0}$) и соответствующее уменьшение их периода. Таким образом, впервые установлено существование закритических квантовых состояний структуры, отличающихся от докритических.

1. В.П. Коверя, С.И. Бондаренко, А.В. Кревсун, Н.М. Левченко, И.С. Бондаренко, *ФНТ* **36**, 759 (2010) [*Low Temp. Phys.* **36**, 605 (2010)].
2. С.И. Бондаренко, В.П. Коверя, А.В. Кревсун, Л.В. Гнездилова, *ФНТ* **41**, 235 (2015) [*Low Temp. Phys.* **41**, 179 (2015)].
3. S. Bondarenko and V. Koverya, *Intern. J. Modern Phys. B* **29**, 1542013 (2015).
4. S.I. Bondarenko, L.V. Gnezdilova, V.P. Koverya, and A.V. Krevsun, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii* **35**, 27 (2013).

5. *Superconductor Applications: SQUIDs and Machines*, B.V. Schwartz and S. Foner (eds.), Frances bitter National Magnet Lab., M.I.T. Cambridge, Massachusetts, Plenum Press, N.Y. (1977).
6. F.L. Vernon and R.J. Pedersen, *J. Appl. Phys.* **39**, 2661 (1968).
7. L. Frolich, H. Koch, W. Vodel, D. Wachter, and O. Frauenberger, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Fridrich Schiller Universitat* **1/2**, 197 (1973).
8. A.H. Silver and J.E. Zimmerman, *Phys. Rev.* **157**, 317 (1967).
9. А.В. Кревсун, Л.В. Гнездилова, В.П. Коверя, С.И. Бондаренко, *ФНТ* **39**, 1327 (2013) [*Low Temp. Phys.* **39**, 1032 (2013)].

Вплив змінного струму на струмові стани
квантового інтерферометра, який шунтується
надпровідною індуктивністю

С.І. Лінк, В.П. Коверя, О.В. Кревсун,
С.І. Бондаренко

Встановлено закономірності оборотної зміни критичного струму та дискретних струмових станів структури у вигляді надпровідного квантового інтерферометра, який шунтується надпровідною індуктивністю, при пропусканні через структуру змінного транспортного струму та при одночасному з постійним транспортним струмом впливом зовнішнього

змінного магнітного поля. Виявлено новий тип дискретних стаціонарних станів структури під час переходу інтерферометра в резистивний стан при сумісній дії постійного і змінного транспортних струмів.

Ключові слова: квантовий інтерферометр, шунтуюча індуктивність, транспортний струм, магнітне поле, дискретні стани.

Influence of alternating current on the current states
of a quantum interferometer shunted
by superconducting inductance

S.I. Link, V.P. Koverya, A.V. Krevsun,
and S.I. Bondarenko

Laws of reversible change of a critical current and discrete current states of the structure in the form of superconducting quantum interferometer, shunted by superconducting inductance are established, at passing through the structure alternating transport current and at simultaneous influence with a transport current of an external alternating magnetic field. The new type of discrete stationary states of the structure is found out at transition of an interferometer in a resistive state caused by joint action of direct and alternating transport currents.

Keywords: quantum interferometer, shunting inductance, transport current, magnetic field, discrete states.