

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова



На правах рукописи

Соловьев Игорь Игоревич

**СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КВАНТОВЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ
ДЛЯ УСТРОЙСТВ ПРИЕМА СИГНАЛА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 01.04.15 –
«Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в отделе микроэлектроники научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова

Научный консультант **Куприянов Михаил Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Масленников Юрий Васильевич**, доктор технических наук
Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН,
ведущий научный сотрудник

Гольцман Григорий Наумович, доктор физико-математических наук, профессор
Московский педагогический государственный университет,
заведующий кафедрой

Шукринов Юрий Маджнунович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Объединенный институт ядерных исследований,
ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится «20» июня 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу:

19-й корпус МГУ, Ленинские горы, д.1, стр.5, 119991, Москва

e-mail: nav19iv@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

http://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/37100351/

Автореферат разослан «18» апреля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.01.05,
кандидат физико-математических наук



Н. А. Власова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Эффект макроскопической квантовой интерференции между двумя джозефсоновскими контактами соединенными в сверхпроводящий контур, впервые продемонстрированный в 1964 г. [1], имеет большое практическое значение. Сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИДы) в настоящее время применяются в самых различных аналоговых [2-4], аналого-цифровых [5] и цифровых [6, 7] устройствах сверхпроводниковой электроники.

Применение СКВИДов в аналоговых устройствах в таких различных областях как медицина, геофизика, исследование мезоскопических и микроскопических объектов, неразрушающая диагностика технических устройств, обусловлено возможностью преобразования с их помощью магнитного сигнала в напряжение с разрешением по энергии достигающим квантового предела [8]. Уникальные характеристики устройств получают с использованием СКВИДов на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) и джозефсоновских туннельных SIS контактов. Параметры детекторной системы удается улучшить посредством объединения СКВИДов в цепочки [9, 10], увеличивая, таким образом, коэффициент преобразования магнитного потока в напряжение и динамический диапазон. Однако, несмотря на то, что с момента первой экспериментальной демонстрации сверхпроводящего двухконтактного интерферометра прошло уже более полувека, аналитическое выражение зависимости преобразования магнитного потока в напряжение НТСП СКВИДа постоянного тока (ПТ) для практических параметров интерферометра так и не было получено, что затрудняет оптимизацию многоэлементных структур, содержащих сотни и тысячи ячеек.

Аналого-цифровое применение СКВИДов основано на эффекте квантования магнитного потока в сверхпроводящих контурах. В совокупности с высокой чувствительностью СКВИДов данный эффект позволил создать широкий ряд сверхпроводниковых аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [5], отличающихся высокой линейностью (до ~ 100 дБ) и большим динамическим диапазоном (до ~ 90 дБ) [11]. За счет высоких характерных частот джозефсоновских контактов (порядка сотен гигагерц) сверхпроводниковые АЦП могут осуществлять прямую оцифровку сигнала (без аналогового преобразования сигнала на низкие частоты) в широком диапазоне частот до десятков гигагерц [12]. В настоящее время характеристики сверхпроводниковых высокочастотных приемных систем на базе АЦП ограничены недостаточной линейностью и динамическим диапазоном входного тракта, включающего в себя антенну и низкошумящий усилитель. В то время как задача приема и

усиления магнитного сигнала может быть выполнена с помощью цепочек СКВИДов, нелинейность их передаточной характеристики [13] препятствует их применению в такой системе. Стоит отметить, что данная нелинейность затрудняет применение СКВИДов в целом ряде практических задач, например, при считывании матриц наноразмерных сенсоров, таких как фотонные детекторы или наноэлектромеханические системы (НЭМС), с разделением каналов по частоте.

Высокая чувствительность и низкие рабочие температуры позволяют с помощью СКВИД-структур производить считывание и квантовых состояний объектов. Так, измерение магнитного потока непосредственно сверхпроводящих кубитов или связанных с ними схем (например, джозефсоновских фотонных умножителей), проводимое во временном домене посредством баллистически распространяющихся флаксонов [14], обеспечивает возможность реализации как разрушающего, так и неразрушающего считывания в режиме непрерывных или однократных измерений. В основе принципа измерений лежит эффект рассеяния флаксонов на эффективном потенциале, создаваемом измеряемым объектом. Однако отсутствие теоретического описания релятивистского процесса рассеяния препятствует оптимизации и применению этой универсальной схемы.

Цифровые схемы на базе СКВИДов отличаются высокими тактовыми частотами и высокой энергоэффективностью. Эти преимущества делают их особенно привлекательными для применения в устройствах высокопроизводительных вычислений, таких как суперкомпьютеры и дата-центры [15]. Среди наиболее развитых подходов вычислений на базе сверхпроводниковых цепей можно отметить быструю одноквантовую логику, а также адиабатическую сверхпроводниковую логику. В то время как одноквантовые схемы характеризуются традиционно высокими тактовыми частотами (порядка 50 ГГц [16]), адиабатическая логика является наиболее энергоэффективной. Энергия затрачиваемая на передачу одного бита информации в адиабатических схемах на частоте 5 ГГц составляет всего порядка $\sim 10^{-20}$ Дж [17]. На базе адиабатической логики возможна реализация физически и логически обратимых схем, для которых энергия, отвечающая логической операции, может быть сделана сколь угодно малой [18]. Наряду со сравнительно высоким уровнем развития цифровых логических схем (количество джозефсоновских контактов в схеме достигает нескольких сотен тысяч [19]), схемы криогенной памяти развиты относительно слабо [20] ввиду низкой степени интеграции базовых элементов, что препятствует практическому внедрению цифровой сверхпроводниковой технологии. Выход из сложившейся ситуации, возможно, будет найден с привнесением элементов спинтроники в сверхпроводниковую электронику, повышающим их функциональную сложность. Перспективным представляется

направление исследования возможности использования магнитных, в том числе управляемых, джозефсоновских контактов в схемах сверхпроводниковой логики и памяти.

Необходимо отметить, что ввиду сравнительно низкого характерного напряжения джозефсоновских контактов ($\leq 1\text{ мВ}$) передача информации из цифровых логических схем на базе СКВИДов в цепи полупроводниковой электроники требует специальных цифровых интерфейсных усилителей. Данные усилители так же могут быть построены на базе цепочек СКВИДов и оптимизированы под требования конкретного приложения.

Цель работы

Настоящая работа направлена на развитие методов расчета сверхпроводниковых интерферометрических схем на базе джозефсоновских контактов и подходов создания на их основе элементной базы устройств приема сигнала и обработки информации. Соответствующий цикл исследований включает построение отсутствующих аналитических выражений описания отклика сверхпроводящих квантовых интерферометров на внешний магнитный сигнал, оптимизацию схем аналоговых и цифровых преобразователей магнитного сигнала в напряжение на базе СКВИДов, а также развитие методов применения магнитных джозефсоновских контактов в схемах сверхпроводниковой логики и памяти.

В рамках диссертации были поставлены следующие задачи:

1. Разработать аналитическое описание функции преобразования магнитного потока в напряжение двухконтактного НТСП СКВИДа с практическими параметрами устройства и аналитическое описание зависимости критического тока СКВИДа от магнитного потока.
2. Разработать аналитическое описание динамики релятивистского рассеяния флаксона на коротких (по сравнению с размером флаксона) неоднородностях тока питания джозефсоновской передающей линии.
3. Исследовать влияние дискретности джозефсоновской передающей линии в присутствии термических флуктуаций на динамику распространения флаксона.
4. Разработать методы линеаризации отклика напряжения на магнитный поток джозефсоновских структур на базе НТСП СКВИДов.
5. Развить подходы построения интерфейсных усилителей на базе цепочек СКВИДов, оптимизированных для передачи одноквантового сигнала в цепи полупроводниковой электроники на различных частотах.
6. Разработать интерферометрическую схему баллистического детектирования слабых магнитных полей, использующую рассеяние флаксона в качестве основы процедуры измерения, характеризующуюся высоким отношением сигнала к шуму.

7. Разработать спиновый вентиль на базе джозефсоновского контакта с возможностью непрерывной модуляции его критического тока в широких пределах.
8. Исследовать возможность оптимизации параметров ячеек адиабатической сверхпроводниковой логики посредством добавления в их схемы магнитных джозефсоновских контактов.

Научная новизна

1. Впервые получены аналитические выражения, описывающие отклик напряжения двухконтактного НТСП СКВИДа с индуктивностью контура L в интервале $0 \leq L \leq \Phi_0/I_c$, в приближении нулевой емкости джозефсоновских контактов и отсутствии флуктуаций.
2. Впервые получены аналитические выражения, описывающие критический ток НТСП СКВИДа с конечной индуктивностью и произвольной асимметрией критических токов джозефсоновских контактов, в приближении отсутствия флуктуаций.
3. Впервые получены аналитические выражения, описывающие ток, циркулирующий в НТСП СКВИДе с произвольной индуктивностью в сверхпроводящем состоянии.
4. Впервые получены аналитические выражения, описывающие ток, циркулирующий в НТСП СКВИДе с индуктивностью контура L в интервале $0 \leq L \leq \Phi_0/I_c$ в резистивном состоянии, в приближении нулевой емкости контактов и отсутствии флуктуаций.
5. Впервые получены аналитические выражения, описывающие релятивистскую динамику рассеяния солитона на коротких (по сравнению с размером солитона) неоднородностях движущей силы в системе, описываемой уравнением типа синус-Гордон.
6. Впервые показано влияние черенковского излучения на стандартное отклонение времени распространения солитона (джиттер) в дискретной среде, описываемой моделью Френкеля-Конторовой в присутствии флуктуаций.
7. Представлены методы линеаризации отклика напряжения на магнитный поток джозефсоновских структур на базе СКВИДов, позволяющие уменьшить суммарное гармоническое искажение сигнала до уровня меньше тысячных долей процента.
8. Разработана схема компактного интерфейсного усилителя, преобразующего одноквантовый сигнал, следующий с частотой 1 ГГц, до уровня 2 мВ на базе цепочки состоящей из 8 СКВИДов с многоквантовым откликом на одноквантовый сигнал.
9. Разработана симметричная схема флаксонного баллистического детектора слабых магнитных полей с отношением сигнала к шуму более 100, позволяющая выполнять считывание состояний сверхпроводящих кубитов.

10. Предложен спиновый вентиль на базе джозефсоновского контакта с пространственно-неоднородной областью слабой связи, содержащей единственный ферромагнитный слой, отличающийся непрерывной модуляцией критического тока в больших пределах (на порядок величины).

11. Предложена оптимизация элементарных ячеек адиабатической сверхпроводниковой логики посредством привнесения в их схемы джозефсоновских π -контактов, снижающая технические требования к параметрам схем и улучшающая их быстродействие и энергоэффективность.

Научная и практическая значимость

Полученные аналитические выражения для отклика напряжения НТСП СКВИДа используются для расчета и оптимизации характеристик реальных устройств на базе одиночных СКВИДов и их последовательных цепочек.

Аналитические выражения для расчета критического тока СКВИДа с произвольной асимметрией критических токов джозефсоновских контактов используются для экспериментального определения индуктивности контура интерферометра и применяются, в том числе, в таких экспериментальных задачах, как определение ток-фазового соотношения неизвестной джозефсоновской гетероструктуры посредством асимметричного двухконтактного СКВИДа.

Аналитическое описание релятивистской динамики рассеяния солитона на коротких неоднородностях движущей силы в системе описываемой уравнением типа синус-Гордон, а также рассмотренное влияние черенковского излучения на стандартное отклонение времени распространения солитона (джиттер) в системе, описываемой моделью Френкеля-Конторовой с флуктуациями используются при анализе физических явлений, включающих в себя упомянутые процессы. Прикладным аспектом являются алгоритмы оптимизации устройств, принцип работы которых основан на рассеянии солитонов на неоднородностях вынуждающей силы, например, флаксонных баллистических детекторов.

Методы линеаризации отклика напряжения джозефсоновских структур на базе СКВИДов используются для разработки высоколинейных преобразователей магнитного поля в напряжение, работающих, в том числе, в гигагерцовой области частот без обратной связи.

Разработанная схема компактного интерфейсного усилителя на базе СКВИДов с многоквантовым откликом на одноквантовый сигнал использована в практическом устройстве – сверхпроводящем цифровом сигнальном процессоре – для сопряжения сверхпроводниковых цифровых схем с полупроводниковой электроникой.

Симметричная схема флаксонного баллистического детектора используется для разработки устройства считывания как одиночных сверхпроводящих кубитов, так и для многокубитного считывания.

Спиновый вентиль на базе джозефсоновского контакта с единственным ферромагнитным слоем в пространственно-неоднородной области слабой связи используется для разработки ячейки низкотемпературной памяти с неразрушающим считыванием, возможностью хранения информации без приложения энергии (при условии сохранения сверхпроводимости материалов) и возможностью миниатюризации до субмикронных масштабов. Такой вентиль так же используется для создания синаптической связи в сверхпроводящих искусственных нейронных сетях.

Предложенное использование джозефсоновских π -контактов в сверхпроводниковых адиабатических схемах позволяет оптимизировать параметры энергоэффективных вычислительных устройств на базе адиабатической сверхпроводниковой логики.

Методология и методы исследования

Вывод аналитических выражений и расчет численных зависимостей отклика напряжения, отклика тока и зависимости критического тока НТСП СКВИДа от магнитного потока, проводились в рамках резистивной модели джозефсоновских контактов в приближении нулевой емкости и отсутствии флуктуаций. Оптимизация линейности отклика джозефсоновских структур на базе СКВИДов проводилась на базе полученных аналитических выражений. Расчет характеристик интерфейсных усилителей проводился в рамках резистивной модели джозефсоновских контактов с емкостью. Проектирование фотошаблонов экспериментальных образцов джозефсоновских структур с высоколинейным откликом напряжения и прототипов интерфейсных усилителей проводилось посредством систем автоматизированного проектирования и с помощью специализированных программ расчета индуктивностей сверхпроводящих контуров, соответствующих разрабатываемой топологии схемы. Аналитические выражения, описывающие релятивистскую динамику рассеяния солитона на коротких неоднородностях вынуждающей силы, получены в рамках уравнения синус-Гордон. Исследование влияния дискретности джозефсоновской передающей линии на время распространения флаксона в присутствии флуктуаций проводилось посредством численного расчета в рамках модели Френкеля-Конторовой. Оптимизация параметров схемы флаксонного баллистического детектора проводилась с помощью полученных аналитических выражений и численно в рамках резистивной модели джозефсоновских контактов с емкостью. Расчет плотности критического тока спинового вентиля на базе джозефсоновского контакта с

пространственно-неоднородной областью слабой связи проводился в рамках уравнений Узаделя с граничными условиями Куприянова - Лукичева. Расчет зависимости критического тока от величины и направления намагниченности ферромагнитного слоя в области слабой связи исследуемого джозефсоновского вентиля проводился с использованием двумерного уравнения синус-Гордон. Оптимизация ячеек адиабатической сверхпроводниковой логики с добавлением джозефсоновских π -контактов проводилась в рамках резистивной модели джозефсоновского контакта с емкостью.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Аналитический метод, позволяющий рассчитывать основные характеристики НТСП ПТ СКВИДов в диапазоне значений индуктивности контура интерферометра $0 \leq L \leq \Phi_0/I_c$, выходящем за рамки известных приближений ($L \ll \Phi_0/I_c$ или $L \gg \Phi_0/I_c$).

2. Метод линеаризации функции преобразования магнитного потока в напряжение НТСП ПТ СКВИДов без использования обратной связи, при котором суммарное гармоническое искажение сигнала составляет не больше тысячных долей процента.

3. Схема компактного интерфейсного усилителя передающего цифровой сигнал от сверхпроводниковых схем в цепи полупроводниковой электроники на гигагерцовой частоте на базе цепочки СКВИДов с многоквантовым откликом на одноквантовый сигнал.

4. Аналитическое описание релятивистского рассеяния солитонов на коротких (по сравнению с размером солитона) неоднородностях движущей силы, и метод использования описанного процесса рассеяния для детектирования слабых магнитных полей.

5. Наличие связи между черенковским излучением солитона и стандартным отклонением времени его распространения (джиттером) в дискретной среде описываемой моделью Френкеля-Конторовой с флуктуациями.

6. Схема спинового вентиля на базе джозефсоновского контакта с неоднородной областью слабой связи, содержащей единственный ферромагнитный слой, состояние которого обусловлено направлением намагниченности этого слоя.

7. Метод оптимизации характеристик адиабатических сверхпроводниковых схем посредством добавления в них джозефсоновских π -контактов.

Достоверность

Полученные аналитические выражения для откликов НТСП СКВИДа согласуются с данными численного расчета, а также с результатами использования других аналитических методов при предельном переходе к области их применимости, $L \ll \Phi_0/I_c$. Аналитическое описание динамики релятивистского рассеяния солитона на коротких (по сравнению с

размером солитона) неоднородностях движущей силы также полностью согласуются с данными численного расчета. Предложенные методы линеаризации отклика СКВИД-структур и построения интерфейсных усилителей качественно подтверждены экспериментальными данными. Связь черенковского излучения солитона со стандартным отклонением времени его распространения в дискретной среде описываемой моделью Френкеля-Конторовой с флуктуациями, а так же исследуемые эффекты обусловленные формированием пространственно-неоднородной области слабой связи в джозефсоновском контакте с ферромагнитной прослойкой и использованием магнитных джозефсоновских контактов в схемах адиабатической сверхпроводниковой логики соответствуют описанию характеристик схожих явлений и объектов, известных из литературы.

Личный вклад автора

В диссертации изложены результаты, полученные непосредственно автором или при его активном участии. В частности, обзор базовых элементов сверхпроводниковой электроники, аналого-цифровых и цифровых устройств [A29, A44, A48] в части описания принципов функционирования одноквантовых схем и их компонент выполнен непосредственно автором. Аналитические выражения для откликов НТСП СКВИДа, опубликованные в работах [A38, A45], получены автором лично. В цикле работ по исследованию СКВИД-структур с линейным откликом напряжения на магнитный сигнал [A5-A19, A21, A24-A28, A36, A37, A40, A41, A43, A47] автором были предложены исследуемые методы линеаризации отклика и выполнено проектирование фотошаблонов экспериментальных образцов. Экспериментальные исследования проводились при активном участии автора. Наиболее удачные конструкции СКВИД-структур защищены патентами [П1, П3, П9-П11]. В ходе исследования различных конструкций интерфейсных усилителей [A1-A4, A46] автором были выполнены численные расчеты и проектирование фотошаблонов экспериментальных образцов. Экспериментальное тестирование прототипов усилителей проводилось при активном участии автора. Аналитическое описание релятивистской динамики рассеяния солитона на коротких (по сравнению с размером солитона) неоднородностях вынуждающей силы [A34] было разработано автором лично. Расчет динамики флаксонов в цепях схемы баллистического детектора [A31, A32], а также численное исследование влияния черенковского излучения на время распространения флаксона в исследуемой среде [A22] проводилось при активном участии автора. Симметричная схема баллистического детектора с линейными и кольцевыми джозефсоновскими передающими линиями, схема многокубитного считывания, цифровые блоки одноквантовой логики для задания и считывания одноквантового сигнала, и

соответствующий им алгоритм измерений стандартного отклонение времени распространения флаксона по непрерывным и дискретным джозефсоновским передающим линиям были предложены и разработаны автором лично. Наиболее удачные варианты схемы баллистического детектора защищены патентами [П5, П12]. Автором лично была предложена конструкция спинового вентиля на базе джозефсоновского контакта с пространственно-неоднородной областью слабой связи, содержащей единственный ферромагнитный слой, и выполнен численный расчет его характеристик, результаты которого представлены в работах [A30, A33]. Анализ результатов расчета токового транспорта в SIsFS структурах [A20, A23, A42], а также возможности реализации на их основе магнитных джозефсоновских вентилях с высокой характерной частотой [A35] проводился при активном участии автора. Наиболее удачные конструкции вентилях защищены патентами [П2, П4, П6-П8]. Автором были предложены конструкции новых исследуемых адиабатических схем и получены аналитические выражения, описывающие их динамику и потенциальную энергию [A39, A49]. Предложена оптимизация их характеристик с привнесением в их схемы джозефсоновских π -контактов.

Подготовка докладов и статей выполнена лично автором или при его активном участии.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на научных семинарах:

- Лаборатории криоэлектроники кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
- Института Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельников РАН,
- Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова,
- Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»,
- Научно исследовательского института «Квант»,
- Фонда перспективных исследований РФ,
- Сколковского института науки и технологий,

а также на международных научных конференциях и симпозиумах:

- международные конференции по прикладной сверхпроводимости (*Applied Superconductivity Conference, ASC*) в 2004, 2006, 2008, 2010, 2012 и 2014 годах;
- международные конференции по сверхпроводниковой электронике (*International Superconductive Electronics Conference, ISEC*) в 2005, 2007, 2009, 2013, 2015 и 2017 годах;

- международные конференции по теории и применениям сверхпроводимости (*European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS*) в 2005, 2007, 2009, 2013, 2015 и 2017 годах;
- объединенная конференция в честь столетия открытия сверхпроводимости в 2011 году;
- международные симпозиумы «*Нанозфизика и Нанозлектроника*» в 2011-2017 годах;
- международные семинары по вихревым структурам в сверхпроводниках (*Combined ESF Vortex and ESF PiShift Workshop* и *Int. Conf. on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors, Vortex*) в 2004, 2007, 2009 и 2013 годах;
- международные конференции по микро- и нанозлектронике (*Int. Conf. “Micro- and nanoelectronics”, ICMNE*) в 2007, 2009, 2013, 2015, 2016 годах;
- международный воркшоп по низкотемпературной электронике (*International Workshop of Low Temperature Electronics (WOLTE-8)*) в 2008 году;
- международная конференция по взаимодействию сверхпроводимости и магнетизма в наносистемах (*Interaction of Superconductivity and Magnetism in Nanosystems*) в 2015 году;
- деловой форум «*Связь 2017. Фундамент цифровой трансформации. Государство. Общество. Бизнес*».

В общей сложности по теме диссертации было сделано более полусотни докладов.

Публикации

По теме диссертационной работы была опубликована в общей сложности 61 работа, из которых 49 статей в рецензируемых журналах индексируемых РИНЦ (из них 47 входящих в перечень ВАК, 45 индексируемых Scopus и Web of Science) и 12 патентов.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из общей характеристики работы, 6 глав и заключения, в котором сформулированы основные результаты диссертационной работы. Общий объем диссертации составляет 319 страниц, 156 рисунков, 201 формулу, 6 таблиц, общее число наименований литературы во всех главах, включая публикации автора - 446.

Содержание работы

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвященный принципам функционирования аналоговых, аналого-цифровых и цифровых схем на базе СКВИДов и их применению.

К области аналоговых применений можно отнести магнитометрию, использование СКВИДов в качестве низкошумящих усилителей, в качестве интерфейсных схем в

устройствах считывания состояний низкотемпературных детекторов и квантовых объектов. В этих задачах СКВИДы обычно используются как высокочувствительные преобразователи магнитного потока в напряжение с разрешением по энергии достигающим квантового предела. Основные характеристики схем, такие как коэффициент преобразования магнитного потока в напряжение и динамический диапазон, могут быть улучшены за счет объединения СКВИДов в последовательные и параллельные цепочки.

Наиболее известные аналого-цифровые схемы на базе СКВИДов – это в первую очередь аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Сверхпроводниковые АЦП отличаются возможностью реализации высокой частоты оцифровки, большим динамическим диапазоном и линейностью. Два основных типа этого устройства: параллельные АЦП и дельта или дельта – сигма АЦП, позволяют оцифровывать соответственно широкополосный сигнал со средним разрешением или узкополосный сигнал с высоким разрешением. Наиболее известным коммерческим продуктом на базе сверхпроводникового АЦП является полностью цифровой приемник спутниковой связи [12]. В таком приемнике реализована прямая (без преобразования сигнала на низкие частоты) оцифровка сигналов в частотном диапазоне 7.5 – 8.5 ГГц, что позволяет отказаться от использования дорогостоящих аналоговых компонент. Характеристики рассматриваемого устройства на данный момент ограничены приемным трактом, а именно следующим за антенной предусилителем. Актуальной задачей является создание высоколинейной приемной СКВИД системы гигагерцового диапазона частот, работающей без обратной связи, для модернизации приемной цепи.

Отличительными особенностями цифровых схем на базе СКВИДов является их быстродействие и высокая энергоэффективность. Информация в таких схемах обычно представлена посредством квантов магнитного потока. Состояние логической схемы сохраняется и зависит от последовательности проведенных логических операций, так что сверхпроводниковая логика является секвенциальной в отличие от комбинационной логики транзисторных схем. Вследствие локализации информации возникает глубокая аналогия между сверхпроводниковыми логическими ячейками, являющимися, по сути, конечными автоматами, и клеточными автоматами Неймана. Важно отметить возможность баллистической передачи сигналов в сверхпроводниковых цепях посредством сверхпроводящих микрополосковых линий, не связанной, в отличие от полупроводниковых аналогов, с энергией требуемой на перезарядку емкостей. Эта особенность представляет одно из наиболее значительных преимуществ в аспекте энергоэффективности.

Тактовые частоты сверхпроводниковых схем находятся в диапазоне до 100 ГГц, энергия передачи бита информации составляет порядка 0.2 аДж, а плотность интеграции на сегодняшний день достигает $10^7/\text{см}^2$ джозефсоновских контактов на чипе.

Основными направлениями развития сверхпроводниковых логик является энергоэффективные модернизации быстрой одноквантовой логики (RSFQ – Rapid Single Flux Quantum logic) и адиабатической сверхпроводниковой логики (ASL - Adiabatic Superconductor Logic). С учетом энергии затрачиваемой на охлаждение энергоэффективность схем на базе этих логик оказывается лучше полупроводниковых аналогов соответственно на 2 – 3 порядка. Низкая функциональная плотность логических схем и отсутствие криогенной памяти с высокой плотностью хранения информации является основным сдерживающим фактором применения сверхпроводниковой цифровой технологии в индустрии высокопроизводительных вычислительных устройств, таких как дата-центры и суперкомпьютеры. Представляется, что данная проблема может быть решена с привлечением спинтроники в сверхпроводниковую электронику, а именно созданием магнитных джозефсоновских контактов и использованием их в схемах памяти и энергоэффективной логики.

Еще одним направлением развития цифровой сверхпроводниковой электроники является создания элементной базы и разработка принципов функционирования сверхпроводниковых нейроморфных и квантовых устройств. Важной задачей в этой области является создание интерфейсных схем связывающих, например, квантовые и классические сверхпроводниковые цепи.

Во **второй главе** представлен вывод аналитического описания откликов напряжения и тока НТСП СКВИДа на магнитный поток в приближении нулевой емкости джозефсоновских контактов и отсутствия флуктуаций. Использование полученных аналитических выражений для реалистичного значения индуктивности сверхпроводящего интерферометра ($0 \leq L \leq \Phi_0/I_c$, Φ_0 - квант магнитного потока, I_c – критический ток джозефсоновского контакта) может значительно упростить оптимизацию разрабатываемых в наше время многоэлементных СКВИД-структур.

Существующие выражения, наиболее точно описывающие отклик напряжения НТСП СКВИДа в случае маленькой, но конечной индуктивности, были получены посредством представления разностной джозефсоновской фазы $\psi = (\phi_1 - \phi_2)/2$ ($\phi_{1,2}$ – джозефсоновские фазы первого и второго контакта) в виде суммы нормированного внешнего магнитного потока $\phi_e = \pi\Phi_e / \Phi_0$ и малой поправки x , представляющей собой осциллирующую компоненту

разностной фазы исчезающую с уменьшением индуктивности, $\psi = -\phi_e + x$ [21]. Данный метод удалось развить за счет нахождения простого аналитического выражения для решения линеаризованного дифференциального уравнения на эту поправку x (в отличие от известного ранее решения через ряды Фурье) в пределе $x \ll 1$. С учетом этого решения, усреднение уравнения для производной суммарной джозефсоновской фазы симметричного СКВИДа позволяет найти зависимость среднего напряжения на СКВИДе от магнитного потока для диапазона индуктивностей, $0 \leq L \leq \Phi_0/2\pi I_c$:

$$u = u_0 - \left[1 + (\beta_l u_0)^{-2} \right]^{-1} (i_b - u_0) \tan^2 \phi_e, \quad (1)$$

где использованы следующие нормировки: для индуктивности, $\beta_l = \pi L I_c / \Phi_0$, и для тока питания, $i_b = I_b / 2I_c$. Напряжение u нормировано на характерное напряжение джозефсоновского контакта, $u_0 = [i_b^2 - \cos^2(\phi_e)]^{0.5}$ соответствует отклику напряжения при нулевой индуктивности $L = 0$.

Полученное решение (1) было обобщено на случай малой асимметрии критических токов и нормальных сопротивлений джозефсоновских контактов ($\Delta I_c, \Delta R_n$ до $\pm 20\%$) и произвольного неравенства индуктивных плеч СКВИДа, что позволяет исследовать влияние технологического разброса параметров на форму отклика.

Кроме того, решение (1) было обобщено на более широкий диапазон индуктивностей, $0 \leq L \leq \Phi_0/I_c$, посредством введения двух подгоночных параметров a, β_l^* :

$$u = u_0 - a \left[1 + (\beta_l^* u_0)^{-2} \right]^{-1} (i_b - u_0) \tan^2 \phi_e, \quad (2)$$

обеспечивающих совпадение (1) с результатом численного расчета отклика до второго знака после запятой. Аналитические выражения для введенных параметров имеют следующий вид:

$$a = 2\kappa v (2i_b^2 - 1) / \xi, \quad \beta_l^* = (\xi / \chi)^{0.5},$$

где

$$\begin{aligned} \xi &= -0.586\kappa + 2v + 4\kappa v (i_b^2 - 1), \quad \chi = 0.586 i_b^2 \kappa - v - 2\kappa v (i_b^2 - 1), \\ \kappa &= \beta_l^{1.66} / (2.154 \beta_l^{1.48} + 2.285), \quad v = \beta_l^{1.92} / (4.28 \beta_l^{1.625} + 5.06). \end{aligned}$$

Посредством усреднения решения для поправки x было найдено выражение для зависимости среднего тока циркулирующего в НТСП СКВИДе в резистивном состоянии от магнитного потока, которое так же было обобщено на более широкий диапазон индуктивностей аналогичным способом введения подгоночных параметров.

Для аналитического нахождения зависимости тока циркулирующего в СКВИДе с произвольной индуктивностью в сверхпроводящем состоянии от магнитного потока был

построен алгоритм, позволивший затем также найти зависимость критического тока СКВИДа от магнитного потока для произвольной асимметрии критических токов джозефсоновских контактов.

Третья глава посвящена разработке методов линеаризации отклика напряжения СКВИД-структур на магнитный поток. Линейность отклика оказывается важна в таких приложениях как измерения ЯМР, при использовании СКВИДов в качестве широкополосных электрически-малых антенн, высоколинейных усилителей в сверхпроводящих АЦП, в устройствах считывания матриц наноразмерных детекторов, например, детекторов фотонов или НЭМС с частотным разделением каналов.

При оценке линейности отклика СКВИДа обычно предполагается, что его форма имеет вид гармонической функции: $u = c \cos \phi_e + d$, где c, d – константы. Это приближение верно для тока питания много большего критического тока СКВИДа. При использовании рабочей точки по магнитному потоку соответствующей середине рабочего склона отклика, $\Phi_b = \Phi_0 / 4$, в отклике СКВИДа остаются лишь нечетные гармонические компоненты. В этом случае степень гармонического искажения спектра сигнала (THD - Total Harmonic Distortion),

$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2} / A_1$, где A_n - n -я гармоника выходного сигнала, при задании

синусоидального сигнала на вход определяется выражением, $THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} J_{2n-1}^2(\phi_a)} / J_1(\phi_a)$ в

котором J – функция Бесселя первого рода, ϕ_a – амплитуда входного сигнала. При использовании, например, четверти рабочего склона, $\phi_a = \pi / 16$, гармоническое искажение составляет менее одного процента, $THD \approx 0.16$ %.

При этом интермодуляционные искажения, возникающие на частотах $m\omega_1 \pm n\omega_2$ (где m, n - целые числа) при задании на вход двух близкорасположенных сигналов $\omega_1 \approx \omega_2$, и соответственно равные произведению $J_m(\phi_{a1})J_n(\phi_{a2})$ (где $\phi_{a1,2}$ – амплитуды сигналов) вблизи сигнальных частот практически отсутствуют ввиду отсутствия четных гармоник в выходном спектре.

Поскольку с увеличением тока питания размах отклика напряжения падает (для случая $L=0$ как $i_b - \sqrt{i_b^2 - 1}$), в реальном эксперименте ток питания не значительно превышает критическое значение [22] и форма отклика не вполне соответствует гармонической функции. В выходном спектре присутствуют четные гармоники, гармоническое искажение сигнала оказывается заметно больше приведенной оценки, а линейный динамический диапазон (SFDR – Spur Free Dynamic Range), определяемый как отношение амплитуды сигнала к

максимальной амплитуде спектральных (например, интермодуляционных) искажений выраженное в децибелах, оказывается не более 15 – 20 дБ, что совершенно недостаточно для приложений требующих высокой линейности отклика.

Для линейзации отклика структур на базе СКВИДов предложено два подхода. Первый подход основан на близости отклика напряжения СКВИДа при приложенном магнитном потоке порядка полукванта, $\Phi_e \approx \Phi_0 / 2$, к параболической форме. Действительно, разложение полученного выше решения (2) в ряд Тэйлора вблизи $\Phi_0 / 2$ дает следующее выражение для напряжения:

$$\lim_{\phi_e \rightarrow \pi/2} u \approx i_b - \frac{1}{2i_b} \left[Q + (1 - QZ) \left(\phi_e - \frac{\pi}{2} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где

$$Q = a \left[1 + (\beta_l^* i_b)^2 \right]^{-1}, \quad Z = 1 - \left[(\beta_l^* i_b)^2 - 3 \right] \left(4i_b^2 \left[1 + (\beta_l^* i_b)^2 \right] \right)^{-1}$$

Использование дифференциального соединения двух одинаковых СКВИДов (см. рис. 1а) с приложением к каждому из них магнитного потока, $\phi_b / 2$, одинакового по модулю, но противоположного по направлению, взаимно сдвигающего их отклики, позволяет (за счет периодичности отклика) физически реализовать вычитание параболических участков, так что на результирующем отклике образуется участок характеризующийся высокой линейностью, см. рис. 1б. Следующее из (3) аналитическое выражение для полученного высоколинейного участка отклика имеет вид:

$$u_{\Sigma} = u(\phi_e + \phi_b / 2) - u(\phi_e - \phi_b / 2) \approx \frac{\phi_b}{i_b} (1 - QZ) \left(\phi_e - \frac{\pi}{2} \right). \quad (4)$$

Оптимизация взаимного сдвига СКВИДов по магнитному потоку ϕ_b , при численном решении дифференциальных уравнений описывающих их динамику, показывает что существует область значений параметров в диапазоне индуктивностей $\beta_l \in [0.05\pi, \pi]$ и токов питания $i_b \in [1, 1.2]$, в которой линейный динамический диапазон дифференциальной схемы, вычисленный посредством двухтонового анализа, оказывается выше 100 дБ, а гармоническое искажение сигнала составляет менее тысячной доли процента, см. рис. 1в,г. Таким образом, при аналогичной амплитуде входного сигнала, $\phi_a = \pi / 16$, использование дифференциального включения СКВИДов позволяет значительно улучшить линейность отклика по сравнению с

откликом гармонической формы (уменьшить гармоническое искажение сигнала на три порядка).

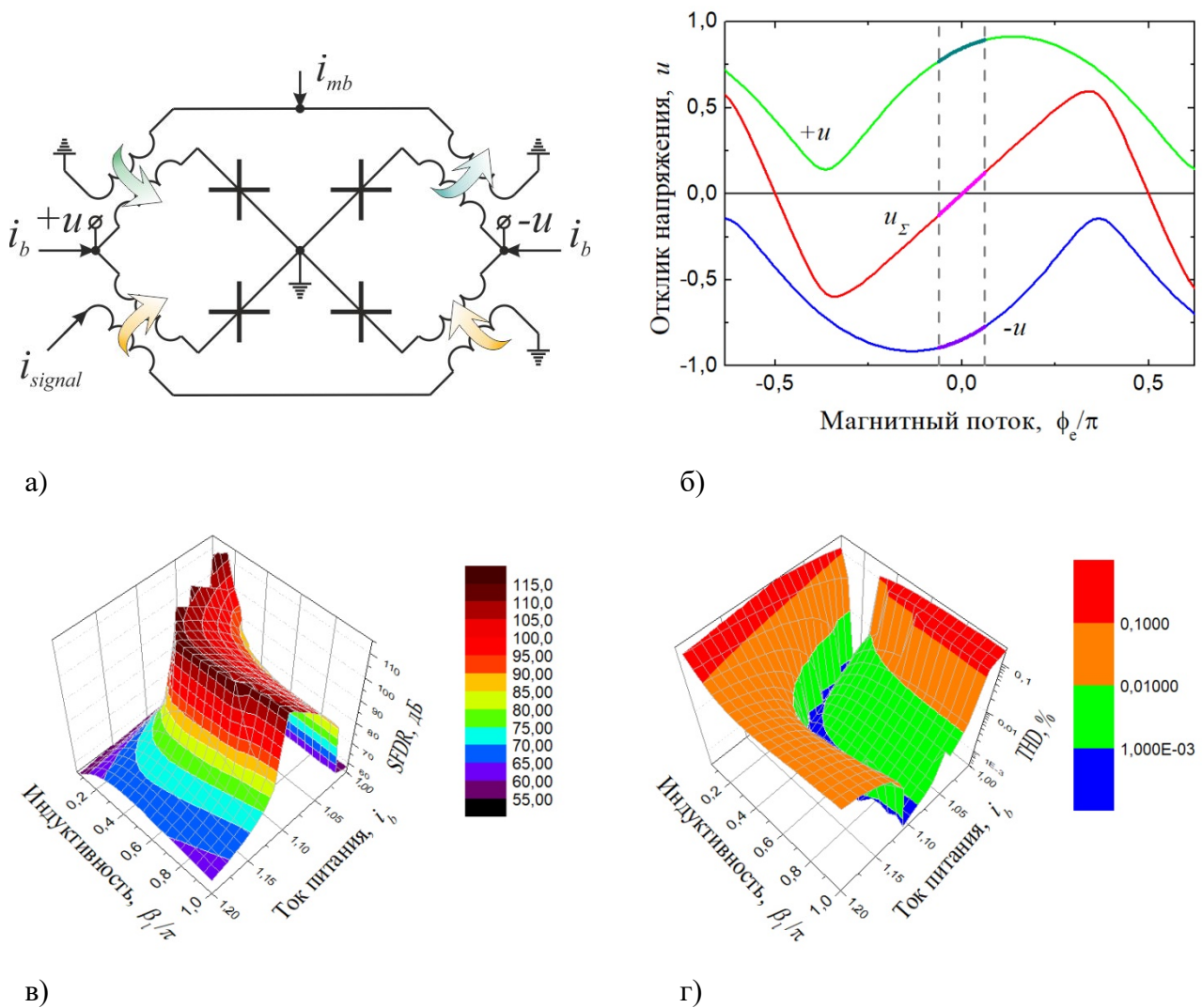


Рисунок 1. а) Дифференциальная схема включения СКВИДов. $i_{mb} \sim \phi_b$ – ток задающий взаимное магнитное смещение СКВИДов, i_{signal} – сигнальный ток. б) Отклик напряжения дифференциальной схемы и составляющих ее СКВИДов с параметрами $\beta_l \approx 0.47$, $i_b = 1.01$, $\phi_b \approx 0.73\pi$. Пунктиром отмечены границы участка высокой линейности ($SFDR \approx 114$ дБ, $THD \approx 5 \cdot 10^{-4}$ %), размер которого соответствует четверти рабочего склона отклика одного СКВИДа. в) Линейный динамический диапазон и (г) гармоническое искажение сигнала для дифференциальной схемы с параметрами в диапазоне $\beta_l \in [0.05\pi, \pi]$, $i_b \in [1, 1.2]$ и оптимально подобранным магнитным смещением ϕ_b при максимальной амплитуде входного сигнала $\phi_a = \pi/16$.

Поскольку форма отклика сильно зависит от значения тока питания, на практике удобным может оказаться использование параллельных цепочек СКВИДов. Помимо

увеличения суммарного критического тока, облегчающего возможность задания тока питания с большой точностью, параллельное соединение позволяет увеличить динамический диапазон, увеличить коэффициент преобразования магнитного потока в напряжение и уменьшить нормальное сопротивление СКВИД структуры, уменьшая ее шунтирование внешней нагрузкой, а следовательно, уменьшая влияние нагрузки на форму отклика.

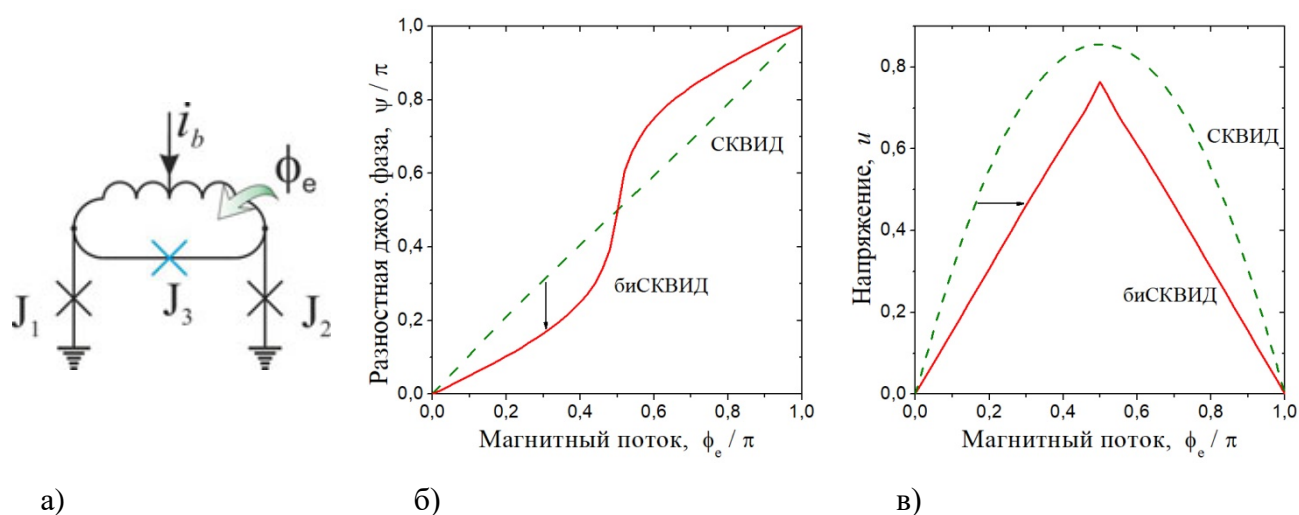


Рисунок 2. а) Принципиальная схема би-СКВИДа. б) Зависимость усредненной разностной фазы джозефсоновских контактов (J_1, J_2) от магнитного потока в СКВИДе и биСКВИДе. в) Отклик напряжения СКВИДа и биСКВИДа. Уменьшение разностной фазы, показанное стрелкой на панели (б), соответствует растяжению отклика по оси магнитного потока, показанному стрелкой на панели (в). Параметры ячеек: $\beta_l = 0.65$, $i_b = 1$, $I_{c3} / I_{c1,2} = 0.8$.

Основная идея второго подхода линеаризации состоит в «растяжении» начального участка отклика СКВИДа (соответствующего $\Phi_e \approx 0$), который при токе питания близком к критическому может быть аппроксимирован линейной функцией. Для этого параллельно к индуктивности контура СКВИДа подсоединяется дополнительный джозефсоновский переход, как показано на рис. 2а, так что магнитный поток попадает в СКВИД через образованный контур одноконтakтного интерферометра. Напряжение на СКВИДе является функцией разностной фазы джозефсоновских контактов. Нелинейное преобразование магнитного потока в разностную фазу $\psi(\phi_e)$, осуществляемое одноконтakтным контуром, приводит к тому, что линейный участок отклика СКВИДа эффективно растягивается, а нелинейный наоборот сжимается по оси магнитного потока, см. рис. 2б,в. При этом нелинейность эффективного растяжения начального участка отклика обеспечивает его дополнительную линеаризацию. Образованная двухконтурная ячейка была названа биСКВИДОм. Оптимальный

подбор параметров биСКВИДа позволяет достичь линейзации отклика аналогичной полученной в первом подходе.

Предложенные подходы были экспериментально проверены посредством изготовления и тестирования цепочек биСКВИДов и дифференциальных схем последовательных соединений параллельных цепочек СКВИДов на базе ниобиевой технологии фирмы NYPRES с плотностью критического тока джозефсоновских контактов, $j_c = 4.5 \text{ кА/см}^2$. Результаты измерений качественно подтвердили эффективность предложенных методов линейзации. Экспериментально полученный линейный динамический диапазон, измеряемый посредством двухтонового анализа, оказался ограничен нелинейными компонентами измерительного стенда и составил 70 дБ.

В четвертой главе обсуждаются методы построения интерфейсных усилителей на базе последовательных цепочек СКВИДов. Данные усилители преобразуют одноквантовые импульсы в импульсы напряжения с амплитудой $U_a \geq 1 \text{ мВ}$, которые могут быть обработаны полупроводниковыми низкошумящими усилителями или компараторами.

При использовании постоянного тока питания, характерного для цепей наиболее распространенной RSFQ логики, возможно два режима работы интерфейсных усилителей. В первом из них ток питания меньше критического тока цепочки СКВИДов. Приложение к каждому СКВИДу кванта магнитного потока (соответствующего усиливаемому одноквантовому сигналу) приводит к переходу СКВИДов в резистивное состояние. Выходной импульс напряжения соответствует сумме напряжений на СКВИДах. Данный подход отличается необходимостью реализации высокого коэффициента связи между элементами входной цепи и СКВИДами, и обеспечения синхронности перехода СКВИДов в резистивное состояние для эффективного сложения напряжений.

Во втором режиме ток питания больше критического тока цепочки, так что она изначально находится в резистивном состоянии, которому соответствует небольшое напряжение. Кванты магнитного потока входного сигнала смещают СКВИДы цепочки по передаточной характеристике в область большего напряжения. В этом случае требования к коэффициенту связи не столь высокие, однако ввиду меньшей модуляции напряжения количество СКВИДов в цепи должно быть больше по сравнению с первым режимом.

Проведенный в кандидатской диссертации автора [23] анализ показал, что использование тока питания больше критического дает возможность работать с сигналами, частота которых достигает 1/10 характерной частоты джозефсоновских контактов СКВИДов. Оптимизация связи между входной цепью усилителя и СКВИДами суммирующей цепочки

позволила экспериментально реализовать усилитель с суммирующей цепью из 32 СКВИДов, обеспечивающий преобразование одноквантовых импульсов в униполярные импульсы напряжения с амплитудой 1 мВ на частоте 1 ГГц на базе ниобиевой технологии фирмы HYPRES с плотностью критического тока джозефсоновских контактов $j_c = 1 \text{ кА/см}^2$.

Режим работы с током питания меньшим критического удобно использовать для создания компактного усилителя работающего с максимальной частотой не превышающей несколько гигагерц (что вполне достаточно для связи с обычными цифровыми полупроводниковыми устройствами). Для уменьшения количества СКВИДов было предложено один из джозефсоновских туннельных контактов в их контурах сделать нешунтированным. При оптимально подобранных параметрах это позволило получить многоквантовый отклик СКВИДов на одноквантовый входной сигнал. Посредством высокочастотной оптимизации цепочки СКВИДов в виде копланарной линии согласованной с 50-омной нагрузкой удалось реализовать преобразование одноквантовых импульсов в униполярные импульсы напряжения с амплитудой 2 мВ на частоте 1 ГГц с использованием 8 СКВИДов в цепи при моделировании устройства в расчете на плотность критического тока джозефсоновских контактов, $j_c = 4.5 \text{ кА/см}^2$.

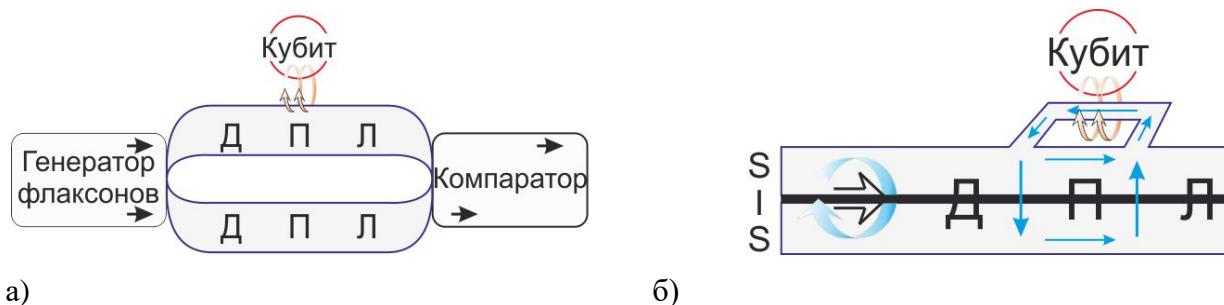


Рисунок 3. а) Схема флаксона баллистического детектора. б) Трансформация магнитного поля кубита в токи, протекающие по ДПЛ. Синими стрелками показаны токи индуцированные полем кубита и токи соответствующие флаксону, черными стрелками показаны флаксоны, S обозначает сверхпроводящий слой, I – слой изолятора.

Пятая глава посвящена рассмотрению процессов в сверхпроводящих интерферометрах, в которых вместо сосредоточенных джозефсоновских контактов используются непрерывные или дискретные джозефсоновские передающие линии (ДПЛ). Примером такого интерферометра является флаксонный баллистический детектор, используемый, например, для считывания состояний сверхпроводящих кубитов, схема которого показана на рис. 3а. Принцип его функционирования основан на эффекте рассеяния флаксона на коротких (по сравнению с размером флаксона) неоднородностях тока питания индуцированных магнитным

полем измеряемого объекта (см. рис. 3б). В зависимости от направления поля (и соответствующего направления индуцированного токового диполя) в результате рассеяния флаксон ускоряется или замедляется, что может быть детектировано посредством компаратора, определяющего очередность выхода флаксонов из ДПЛ детектора, одна из которых связана с кубитом, а другая – нет.

Экспериментальная реализация баллистического детектора на базе непрерывных ДПЛ показала важность учета релятивистских эффектов в динамике рассеяния флаксона. Релятивистская динамика флаксона была описана с использованием уравнения синус-Гордона, в котором флаксон соответствует солитонному решению,

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + \sin \phi = -\alpha \phi_t + i + i_f + i_s, \quad (5)$$

где α - соответствует коэффициенту демпфирования, i - току питания, i_f - флуктуационной компоненте тока, $i_s = \mu \delta(x - x_c)$ - одиночной рассеивающей неоднородности вида дельта функции амплитуды μ , с центром в координате x_c .

В приближении малости слагаемых правой части уравнения (5), $\alpha, i, i_f, i_s \ll 1$, на первом шаге были получены релятивистские зависимости скорости, v^{rel} , и центральной координаты, X^{rel} , солитона от времени без учета рассеяния:

$$v^{rel}(t) = \text{sign}(p)(1 + p^{-2})^{-1/2}, \quad (6a)$$

$$X^{rel}(t) = v_{st}(t - t_0) + \frac{1}{\alpha} [v_{st} \ln A_1 - \ln A_2] + C, \quad (6b)$$

где

$$A_1 = p(\sqrt{\beta^2 + 1}\sqrt{1 + p^{-2}}\text{sign}(p) - \beta) + 1,$$

$$A_2 = p(\sqrt{1 + p^{-2}}\text{sign}(p) + 1),$$

$$C = X^{rel}(t_0) - \frac{1}{\alpha} \left(v_{st} \ln \left[\frac{\sqrt{\beta^2 + 1} - \beta v^{rel}(t_0)}{\sqrt{1 - v^{rel}(t_0)^2}} + 1 \right] - \ln \left[\frac{1 + |v^{rel}(t_0)|}{\sqrt{1 - v^{rel}(t_0)^2}} \right] \text{sign}[v^{rel}(t_0)] \right),$$

выражения для импульса солитона, p , и его стационарной скорости, v_{st} , имеют вид:

$$p = \left(\beta + v^{rel}(t_0) / \sqrt{1 - v^{rel}(t_0)^2} \right) e^{-\alpha(t - t_0)} - \beta, \quad (7)$$

$$v_{st} = -\text{sign}(\beta)(1 + \beta^{-2})^{-1/2}, \quad (8)$$

константа $\beta = \pi i / 4\alpha$, t_0 – начальное время процесса.

Влияние рассеяния на динамику солитона было учтено в приближении его баллистического движения в данном процессе со скоростью v_0 :

$$v^{sc}(\theta) = \text{sign}(v_0) \sqrt{1 - \frac{1-v_0^2}{\left[1 - \frac{\mu}{2}\sqrt{1-v_0^2}(\arctan[\tanh(\frac{\mu}{2})] + c_{\pm\infty})\right]^2}}, \quad (9a)$$

$$X^{sc}(\theta) = \frac{\theta\sqrt{1-v_0^2}}{1 - \frac{\mu}{2}\sqrt{1-v_0^2}(\arctan[\tanh(\frac{\mu}{2})] + c_{\pm\infty})} + x_c, \quad (9b)$$

где координата $\theta = (X - x_c)/\sqrt{1 - v_0^2}$, $c_{\pm\infty}$ - константа соответствующая решениям для налетающего ($c_{-\infty} = \pi/4$) и рассеянного ($c_{+\infty} = -\pi/4$) солитона для случаев, соответственно, $v_0 > 0$ и $v_0 < 0$.

Таким образом, было показано, что рассеяние приводит к ступенчатому изменению скорости

$$v_0 \rightarrow \text{sign}(v_0) \sqrt{1 - \frac{1-v_0^2}{\left[1 - \text{sign}(v_0)\frac{\mu\pi}{4}\sqrt{1-v_0^2}\right]^2}}, \quad (10a)$$

в координате $\theta = 0$. Согласно (9b) эта ступенька соответствует изгибу на координатной зависимости,

$$X \rightarrow \frac{X - x_c}{1 - \text{sign}(v_0)\frac{\mu\pi}{4}\sqrt{1-v_0^2}} + x_c. \quad (10b)$$

Релаксация скорости солитона к ее стационарному значению (8) может быть учтена с использованием решения (6) в системе (9): $v_0 = v^{rel}$ и $\theta = (X^{rel} - x_c)/\sqrt{1 - (v^{rel})^2}$. Момент рассеяния может быть получен из уравнения $X^{rel}(t^{sc}) = x_c$, так что

$$t^{sc} = \int_{t_0}^{\infty} H(v^{rel}(t)) - \text{sign}[v^{rel}(t)]H(X^{rel}(t) - x_c)dt + t_0, \quad (11)$$

где $H(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда. Поскольку рассеяние привносит возмущение в релаксационную динамику налетающего солитона, решения определяемые начальными условиями, t_0 , $X^{rel}(t_0)$, $v^{rel}(t_0)$, могут использоваться в системе (9) только до момента рассеяния ($t < t^{sc}$). После этого момента ($t \geq t^{sc}$) необходимо использовать решение для рассеянного солитона с соответствующими новыми начальными условиями, t^{sc} , $X^{rel}(t^{sc}) = x_c$, и скоростью $v^{rel}(t^{sc})$ равной измененной скорости, определяемой правой частью выражения (10a), где $v_0 = \lim_{t \rightarrow t^{sc}} v^{rel}(t)$ берется из решения для налетающего солитона для связи.

Для учета влияния флуктуаций солитон рассматривался как массивная броуновская частица с интенсивностью шума зависящей от времени, с введением эффективного коэффициента демпфирования, $\alpha^* = \alpha(1 - \langle v^{sc} \rangle^2)$. В приближении гауссова шума выражения для дисперсии $D(t)$ и соответствующей вероятности $P(t)$ найти солитон внутри сегмента ДПЛ длиной Λ имеют вид [24]:

$$D(t) = \frac{\gamma}{4\alpha^*} \int_{t_0}^t (1 - 2e^{-\alpha^* t'} + e^{-2\alpha^* t'}) [1 - (v^{sc}(t'))^2]^{\frac{5}{2}} dt', \quad (12)$$

$$P(t) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}[\Lambda - X^{sc}(t)] / \sqrt{2D(t)}, \quad (13)$$

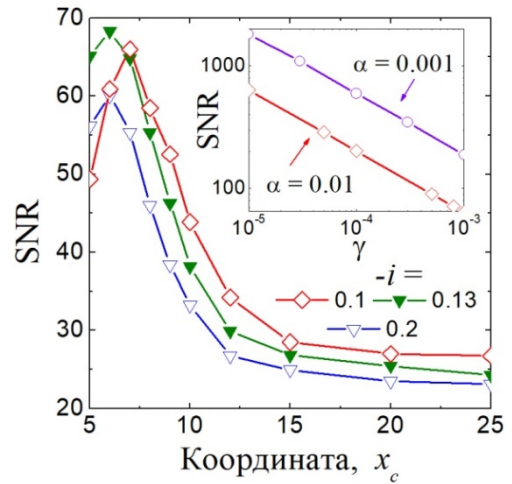
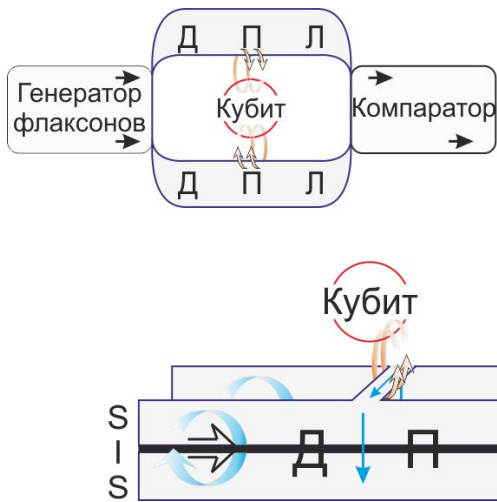
где γ – безразмерная интенсивность шума. Выражение (13) позволяет найти среднее время τ распространения солитона по сегменту длиной Λ и стандартное отклонение этого времени σ (джиттер):

$$\tau = \int_{t_0}^{\infty} P(t) dt, \quad \sigma = \sqrt{2 \int_{t_0}^{\infty} t P(t) dt - \tau^2}. \quad (14)$$

В пределе $D(t) \rightarrow 0$ выражения (12) - (14) служат для определения времени распространения солитона без учета шума и соответствующей средней скорости $\langle v^{sc} \rangle$, которая в свою очередь позволяет определить эффективный коэффициент демпфирования α^* .

Развитое описание релятивистской динамики позволило рассчитать основные характеристики баллистического детектора, такие как временной отклик системы, $\Delta\tau = \tau_{\mu} - \tau_0$, суммарный джиттер, $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\mu}^2 + \sigma_0^2}$, и отношение сигнала к шуму, $SNR = |\Delta\tau| / \sigma_{\Sigma}$, и оптимизировать параметры устройства (индексы $\mu, 0$ соответствуют распространению солитона с рассеянием и без). Посредством последующего численного решения уравнения (5) было подтверждено, что отношение сигнала к шуму оптимизированной схемы со значениями параметров соответствующими экспериментальным достигает $SNR > 100$.

Помимо оптимизации параметров оригинальной схемы детектора (см. рис. 3), была предложена новая симметричная схема баллистического детектора, в которой измеряемый объект связывается с обеими ДПЛ интерферометра, так что в каждой из них индуцируется одиночная неоднородность тока питания, см. рис. 4а. По сравнению с рассеянием на диполе в одной из ДПЛ, рассеяние флаксонов на индуцированных монополях в обеих ДПЛ увеличивает отклик детектора и отношение сигнала к шуму в разы, параллельно уменьшая обратное влияние на детектируемый объект более чем на порядок. Было показано, что переход к использованию кольцевых джозефсоновских контактов в предложенной схеме вместо непрерывных линейных ДПЛ позволяет проводить измерения в частотном домене, что может оказаться более удобным с учетом специфики приборов традиционно используемых при работе со сверхпроводящими кубитами.



а)

б)

Рисунок 4. а) Предложенная симметричная схема баллистического детектора. Синими стрелками показаны токи индуцированные полем кубита и токи соответствующие флаксонам, черными стрелками показаны флаксоны. S обозначает сверхпроводящий слой, I – слой изолятора. б) Зависимость отношения сигнала к шуму от расположения токовых неоднородностей относительно начала ДПЛ при различных токах питания. $\alpha = 0.01$, $\gamma = 0.001$, $\mu = 0.4$. На вставке показана зависимость отношения сигнала к шуму от интенсивности шума при значениях параметров: $-i = 0.1$, $x_c = 7$, $\alpha = 0.01, 0.001$. Длина дискретной ДПЛ, $\Lambda = 40$, индуктивность связи джозефсоновских контактов в дискретной ДПЛ, $\beta_l = 0.5$, стартовая скорость флаксонов, $v(t_0) = 0$.

Анализ динамики флаксона в дискретной ДПЛ производился в рамках модели Френкеля – Конторовой с флуктуационным слагаемым. Основным результатом работы явилась демонстрация влияния черенковского излучения солитона на стандартное отклонение времени его распространения. При сравнительно больших значениях вынуждающей силы и слабом демпфировании из хвоста черенковского излучения возможно образование солитон – антисолитонной пары. Резкий рост джиттера обусловлен объединением изначального солитона с новообразованным в единую солитонную структуру, в процессе которого соседние контакты ДПЛ почти одновременно проходят положение неустойчивого равновесия на профиле потенциальной энергии, оказывая заметное влияние на переключения друг друга.

С учетом полученных результатов была проведена оптимизация предложенной симметризованной схемы баллистического детектора на базе дискретных ДПЛ. Для экспериментальных значений параметров в расчете было достигнуто отношения сигнала к шуму $SNR \approx 1000$ в режиме распространения одиночных флаксонов (см. рис. 4б). Избыточность данного значения позволяет уменьшить связь детектора с измеряемым объектом, а следовательно, и обратное влияние процесса измерения.

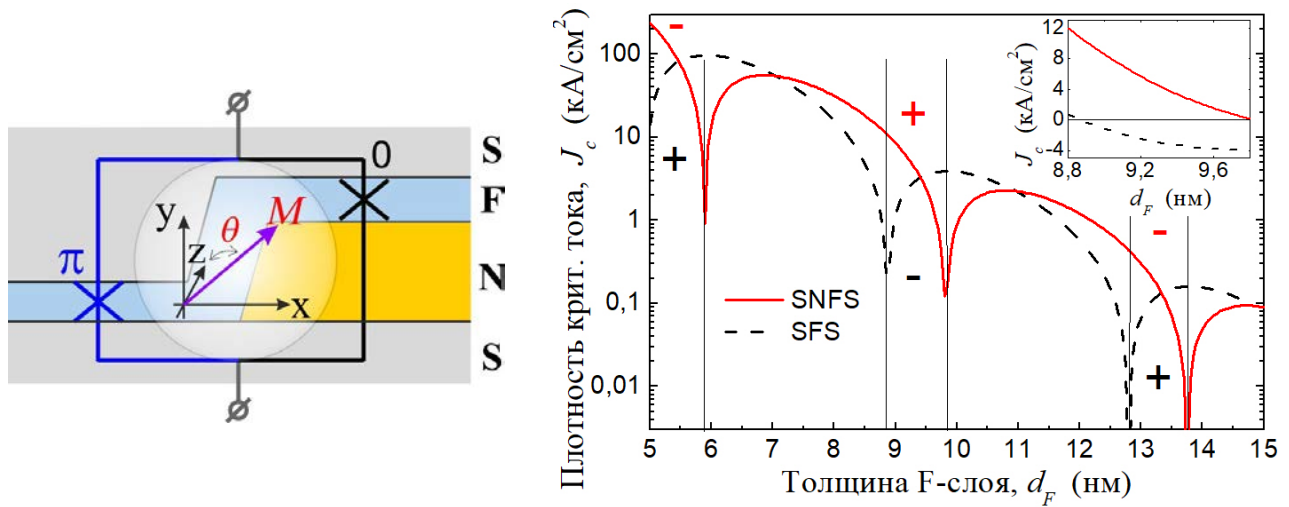
Стоит отметить, что использование дискретных ДПЛ предоставляет удобную возможность согласования цепей детектора со схемами RSFQ логики. С использованием цифровых логических элементов была предложена концепция реализации многокубитного считывания. Согласно правилам проектирования для ниобиевой технологии института фотонных исследований (IPHT) Германии были разработаны топологии схем RSFQ блоков задания и считывания одноквантового сигнала, и соответствующий им алгоритм измерений стандартного отклонение времени распространения флаксона по непрерывным и дискретным ДПЛ.

В шестой главе представлены примеры разработки и применения магнитных джозефсоновских контактов в элементной базе цифровой сверхпроводниковой электроники. Привнесение магнитного момента в сверхпроводящую систему позволяет изменять вид ее потенциальной энергии, создавая новые элементы, например, такие как джозефсоновские контакты со сдвигом фазы основного состояния на π , так называемые « π -контакты», или джозефсоновские спиновые вентили. Поскольку в отличие от классических схем RSFQ логики и памяти на базе СКВИДов, принцип работы которых связан с квантованием магнитного потока (что накладывает ограничение на индуктивность контуров ячеек), в данном случае параметры системы определяются величиной и/или направлением магнитного момента, функциональная плотность соответствующих элементов может быть увеличена, их характеристики (например, энергоэффективность) дополнительно оптимизированы, а сам функционал сделан изменяемым.

В первой части главы предложена конструкция спинового вентиля на базе SF-NFS джозефсоновского контакта с пространственно-неоднородной областью слабой связи, одна часть которой содержит единственный ферромагнитный (F) слой, а в другой части к нему добавлен слой нормального (N) металла, см. рис. 5а.

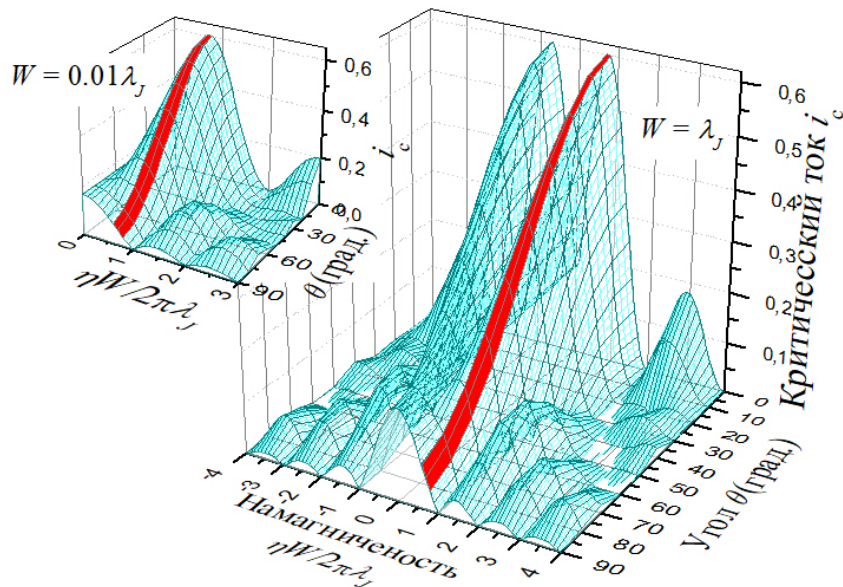
Анализ в рамках уравнений Узаделя с граничными условиями Куприянова – Лукичева показал, что при типичных экспериментальных значениях параметров структуры (критическая температура S-электродов - $T_c = 10$ К, модуль параметра порядка в S-электродах - $\Delta = 1.67T_c$, обменная энергия ферромагнитного материала - $\mathcal{H} = 32\pi T_c$, параметр прозрачности SF-границы - $\gamma_{BF} = 0.6$, длины когерентности в F- и N-слоях: $\xi_F = 5$ нм, $\xi_N = 100$ нм, толщина N-слоя - $d_N = 20$ нм) существуют диапазоны толщин F-слоя, d_F , в которых ток-фазовые зависимости SFNS- и SFS-части контакта оказываются сдвинуты на π , см. рис. 5б. В этом случае рассматриваемая структура может быть представлена как

сверхпроводящий квантовый интерферометр, содержащий обычный джозефсоновский контакт и π -контакт (рис. 5а).



а)

б)



в)

Рисунок 5. а) Сечение SF-NFS джозефсоновского контакта со сдвигом ток-фазовых зависимостей SFNS и SFS частей на π . M - вектор намагниченности F-слоя, θ - угол отклонения намагниченности от направления оси z , перпендикулярной плоскости образованного эффективного контура сверхпроводящего интерферометра. б) Зависимость плотности критического тока SFNS и SFS частей от толщины F-слоя при характерных экспериментальных значениях параметров структуры. в) Критический ток рассматриваемой SF-NFS структуры в зависимости от величины намагниченности F-слоя η и угла θ отклонения намагниченности от оси z . Длина структуры $W = \lambda_J$ (основная панель) и $W = 0.01\lambda_J$ (вставка). Область наибольшего изменение критического тока закрашена красным цветом.

При выборе близких значений плотностей критического тока частей контакта внутри диапазона d_F со сдвигом фазы их основного состояния на π (например, $J_{c_SFS} / J_{c_SFNS} = 0.66$, что соответствует $d_F = 9.4$ нм, рис. 5б) величина критического тока SF-NFS структуры, i_c , может модулироваться в широких пределах посредством изменения направления намагниченности F-слоя, M . При оптимальном выборе величины намагниченности, $\eta = 2\pi\mu_0 |M| \Theta \lambda_J / \Phi_0$ (где Θ - магнитная толщина перехода, λ_J - джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля), например $\eta = 0.7 \cdot 2\pi\lambda_J / W$ (где W - размер структуры по оси x , см. рис. 5а,в), отклонение вектора M от оси z , перпендикулярной плоскости контура эффективного интерферометра, на $\theta = 90$ градусов приводит к изменению критического тока SF-NFS перехода примерно на порядок.

Для увеличения характерной частоты предложенного джозефсоновского вентиля возможно его использование в качестве управляющего элемента SIsF-NFS контакта. При этом вращение намагниченности sF-NFS части может приводить к изменению критической тока всей джозефсоновской структуры. На вставке рис. 5в показано, что эффект модуляции критического тока сохраняется при масштабировании вентиля до размеров много меньших джозефсоновской глубины, $W \ll \lambda_J$. Предложенный вентиль может применяться в качестве компактного базового элемента ячеек логики с изменяемым функционалом или памяти, или в качестве элемента синаптической связи в сверхпроводящих нейросетях.

Во второй части главы предложена оптимизация базовых ячеек наиболее энергоэффективной адиабатической сверхпроводниковой логики (ASL) посредством добавления в их схемы джозефсоновских π -контактов. В отличие от ячеек быстрой одноквантовой RSFQ логики, потенциальная энергия базовых ячеек ASL может изменяться адиабатически в процессе их переключения, в соответствии с чем, потребляемая энергия оказывается обратно пропорциональна времени переключения, а сам процесс переключения физически обратим. На базе ячеек ASL возможно построение не только физически, но и логически обратимых схем, энергия переключения которых может быть сколь угодно малой.

Конструктивно ячейки ASL представляют собой сверхпроводящие интерферометры (параметрические квантроны), потенциальная энергия которых под воздействием внешнего тактирующего сигнала переходит от одноямянного к двухъямянному виду. Нахождение квантрона в одном из минимумов двухъямянного потенциала ассоциируется с содержанием бита информации, в то время как выбор определенного минимума обусловлен магнитной связью с

соседними ячейками. Мощность, затрачиваемая при передаче бита информации, соответствует траектории и скорости эволюции состояния квантрона.

В работе исследовалась возможность модификации траектории эволюции состояния ячеек за счет изменения их потенциальной энергии, отвечающей добавлению в их схемы джозефсоновских π -контактов. Для наиболее распространенных типов ячеек (nSQUID и AQFP – Adiabatic Quantum Flux Parametron) получены аналитические выражения, описывающие их потенциальную энергию с учетом дополнительных слагаемых, соответствующих различным модификациям схем. Посредством численного расчета показано, что оптимизация параметров синтезированных схем с π -контактами позволяет сделать их траекторию эволюции ближе к эквипотенциальной, улучшить контролируемость состояния ячеек тактирующим сигналом и повысить максимальную тактовую частоту их работы с сохранением физической обратимости процесса переключения, уменьшить потребляемую энергию и снизить требования на величину магнитной связи между ячейками, обеспечивающую корректность передачи информации.

В заключение диссертационной работы сформулированы выводы, соответствующие положениям выносимым на защиту.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых журналах, индексируемых РИНЦ, SCOPUS и Web of Science:

- A1. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, and O. A. Mukhanov, “Possible Approach to the Driver Design Based on Series SQIF,” *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **15**(2), 388-391 (2005); IF – 1.583.
- A2. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, O. A. Mukhanov, “Splitting circuits for a single-flux-quantum-pulse driver based on a superconducting quantum interference filter,” *Supercond. Sci. Technol.*, **19**, S390-S393 (2006); IF – 2.878.
- A3. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, and O. A. Mukhanov, “Development of SQIF-Based Output Broad Band Amplifier,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 633-636 (2007); IF – 1.583.
- A4. I. I. Soloviev, M. R. Rafique, H. Engseth, A. Kidiyarova-Shevchenko, “High voltage driver for RSFQ digital signal processor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**(2), 470-473 (2007); IF – 1.583.
- A5. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, “Synthesis of High Linearity Array Structures,” *Supercond. Sci. Technol.*, **20**, S362-S366 (2007); IF – 2.878.
- A6. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, “High linearity Josephson-junction array structures,” *Phys. C*, **468**, 813-816 (2008); IF – 1.404.
- A7. V. Kornev, I. Soloviev, N. Klenov, O. Mukhanov, “How to Build up the High Linearity SQIF Structures,” *J. Phys. Conf. Ser.*, **97**, 01201101 (2008); IF – n/a.

- A8. V. Kornev, I. Soloviev, N. Klenov, O. Mukhanov, "Differential Parallel-Serial SQIF Structures Providing High Linearity Response," *J. Phys. Conf. Ser.*, **97**, 012011 (2008); IF – n/a.
- A9. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, "High Linearity SQIF-like Josephson-Junction Structures," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**(3), 741-744 (2009); IF – 1.583.
- A10. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, "Performance Advantages and Design Issues of SQIFs for Microwave Applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**(3), 916-919 (2009); IF – 1.583.
- A11. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, "Bi-SQUID - Novel Linearization Method for dc SQUID Voltage Response," *Supercond. Sci. Technol.*, **22**(11), 114011 (2009); IF – 2.878.
- A12. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, "Dc SQUID array with nonlinear inductance," *J. Phys. Conf. Ser.*, **234**, 042034 (2010); IF – n/a.
- A13. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, "Progress in high linearity multi-element Josephson structures," *Phys. C*, **470**, 886-889, (2010), IF – 1.404.
- A14. И. И. Соловьев, В. К. Корнев, Н. В. Кленов, О. А. Муханов, «Сверхпроводниковые джозефсоновские структуры с высокой линейностью преобразования магнитного сигнала в напряжение», *Физика Твёрдого Тела*, **52**(11), 2110-2115 (2010). / I. I. Soloviev, V. K. Kornev, N. V. Klenov, O. A. Mukhanov, "Superconducting Josephson structures with high linearity of transformation of magnetic signal into voltage," *Phys. Solid State*, **52**(11), 2252-2258 (2010); IF – 0.86.
- A15. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, and O. A. Mukhanov, "Design and Experimental Evaluation of SQIF Arrays with Linear Voltage Response," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21**(3), 394-398 (2011); IF – 1.583.
- A16. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, A. V. Sharafiev, and O. A. Mukhanov, "Linear Bi-SQUID Arrays for Electrically Small Antennas," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21**(3), 713-716 (2011); IF – 1.583.
- A17. И. И. Соловьев, В. К. Корнев, А. В. Шарафиев, Н. В. Кленов, О. А. Муханов, «Цепочки би-СКВИДов и параллельных СКИФ структур для построения активных электрически малых антенн», *Поверхность, Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **7**, 45–51 (2012). / I. I. Soloviev, V. K. Kornev, A. V. Sharafiev, N. V. Klenov, O. A. Mukhanov, "Bi-SQUID arrays and parallel SQIF structures for active electrically small antennas," *Journ. Surf. Invest.-X-Ray Synchrotron and Neutr. Tech.*, **6**(4), 591-597 (2012); IF – 0.359.
- A18. A. Sharafiev, I. Soloviev, V. Kornev, M. Schmelz, R. Stolz, V. Zakosarenko, S. Anders and H.-G. Meyer, "Bi-SQUIDs with submicron cross-type Josephson tunnel junctions," *Supercond. Sci. Technol.*, **25**(4), 045001 (2012); IF – 2.878.
- A19. V. Kornev, I. Soloviev, N. Klenov, A. Sharafiev, O. Mukhanov, "Array designs for active electrically small superconductive antennas," *Phys. C*, **479**, 119–122 (2012); IF – 1.404.

- A20. S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, V. V. Bol'ginov, V. V. Ryazanov, I. V. Vernik, O. A. Mukhanov, M. Yu Kupriyanov, and A. A. Golubov, "Theoretical model of superconducting spintronic SIsFS devices," *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 192603 (2013); IF – 3.411.
- A21. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, A. V. Sharafiev, N. V. Klenov, and O. A. Mukhanov, "Active Electrically Small Antenna Based on Superconducting Quantum Array," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **23**(3), 1800405 (2013); IF – 1.583.
- A22. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, A. L. Pankratov, E. Il'ichev, and L.S. Kuzmin, "Effect of Cherenkov radiation on the jitter of solitons in the driven underdamped Frenkel-Kontorova model," *Phys. Rev. E*, **87**, 060901(R) (2013); IF – 2.366.
- A23. S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, M. Yu. Kupriyanov, and A. A. Golubov, "Theory of supercurrent transport in SIsFS Josephson junction," *Phys. Rev. B*, **88**, 144519 (2013); IF – 3.836.
- A24. И. И. Соловьев, В. К. Корнев, А. В. Шарафиев, Н. В. Кленов, О. А. Муханов, «Подходы к созданию активной электрически малой сверхпроводниковой антенны», *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **7**, 70 (2013). / I. I. Soloviev, V. K. Kornev, A. V. Sharafiev, N. V. Klenov, O. A. Mukhanov, "Approaches to the creation of an active electrically small superconductive antenna," *Journ. Surf. Invest.-X-Ray Synchrotron and Neutr. Tech.*, **7**(4), 667-670 (2013); IF – 0.359.
- A25. V. Kornev, A. Sharafiev, I. Soloviev, N. Kolotinskiy, O. Mukhanov, "Superconducting Quantum Arrays for Broadband RF Systems," *Journ. Phys. Conf. Ser.* **507**(4), 042019 (2014); IF – n/a.
- A26. V. Kornev, A. Sharafiev, I. Soloviev, N. Kolotinskiy, V. Scripka, O. Mukhanov, "Superconducting Quantum Arrays," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **24**(4), 1800606 (2014); IF – 1.583.
- A27. V. K. Kornev, A. V. Sharafiev, I. I. Soloviev, O. M. Mukhanov, "Signal and noise characteristics of bi-SQUID," *Supercond. Sci. Technol.*, **27**, 115009 (2014); IF – 2.878.
- A28. V. Kornev, A. Sharafiev, N. Kolotinskiy, V. Scripka, I. Soloviev, O. Mukhanov, "High Linearity Voltage Response Parallel-Array Cell," *Journ. Phys. Conf. Ser.* **507**(4), 042018 (2014); IF – n/a.
- A29. С. В. Бакурский, А. Л. Гудков, Н. В. Кленов, А. В. Кузнецов, М. Ю. Куприянов, И. И. Соловьев, «Прогресс в области создания новых базовых элементов для энергоэффективной сверхпроводниковой электроники», *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и астрономия*, **4**, 3 (2014) / S. V. Bakurskiy, A. L. Gudkov, N. V. Klenov, A. V. Kuznetsov, M. Yu. Kupriyanov, I. I. Soloviev, "Progress in the Area of New Energy Efficient Basic Elements for Superconducting Electronics," *Moscow university physics bulletin*, **69**(4), 275 (2014); IF – 0.503.
- A30. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, V. V. Bol'ginov, V. V. Ryazanov, M. Yu. Kupriyanov, and A. A. Golubov, "Josephson magnetic rotary valve," *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 242601 (2014); IF – 3.411.

- A31. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, A. L. Pankratov, and L. S. Kuzmin, “Symmetrical Josephson vortex interferometer as an advanced ballistic single-shot detector,” *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 202602 (2014); IF – 3.411.
- A32. Н. В. Кленов, И. И. Соловьев, А. Е. Щеголев, А. Л. Панкратов, «Баллистическое детектирование слабых сигналов в активных джозефсоновских средах», *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия*, (1):35–41, 2015. / N. V. Klenov, I. I. Soloviev, A. E. Shchegolev, A. L. Pankratov, “Ballistic detection of weak signals in active Josephson media,” *Moscow university physics bulletin*, **70**(1), 35-41 (2015); IF – 0.503.
- A33. И. И. Соловьев, Н. В. Кленов, С. В. Бакурский, М. Ю. Куприянов, and А. А. Голубов, «Критический ток SF–NFS джозефсоновских структур», *ПЖЭТФ*, **101**(4), 258–264, (2015) / I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov, “Critical Current of SF–NFS Josephson Junctions,” *JETP Lett.*, **101**(4), 240-246 (2015); IF – 1.235.
- A34. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, A. L. Pankratov, L. S. Revin, E. Il'ichev, L. S. Kuzmin, “Soliton scattering as a measurement tool for weak signals,” *Phys. Rev. B*, **92**, 014516 (2015); IF – 3.836.
- A35. S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov, “Superconducting phase domains for memory applications,” *Appl. Phys. Lett.*, **108**(4), 042602-1-042602-5 (2016); IF – 3.411.
- A36. V. K. Kornev, A. V. Sharafiev, I. I. Soloviev, N. V. Kolotinskiy, O. A. Mukhanov, “Dimensional Effects Affecting the Linearity of Active Superconducting Antennas,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**(3), 1500605 (2016); IF – 1.583.
- A37. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, N. V. Kolotinskiy, “Design Issues of HTS bi-SQUID,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**(5), 1601205 (2016); IF – 1.583.
- A38. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, A. E. Schegolev, S. V. Bakurskiy, M. Yu. Kupriyanov, “Analytical derivation of DC SQUID response,” *Supercond. Sci. Technol.*, **29**(9), 094005 (2016); IF – 2.878.
- A39. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, M. V. Tereshonok, “Adiabatic superconducting cells for ultra-low-power artificial neural networks,” *Beilstein J. Nanotechnol.*, **7**, 1397-1403 (2016); IF – 3.127.
- A40. V. K. Kornev, A. V. Sharafiev, I. I. Soloviev, N. V. Kolotinskiy, O. A. Mukhanov, “A Guide to Active Antennas Based on Superconducting Quantum Arrays,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**(3), 1400104 (2016); IF – 1.583.
- A41. В. К. Корнев, Н. В. Колотинский, А. В. Шарафиев, И. И. Соловьев, О. А. Муханов, “From Single SQUID to Superconducting Quantum Arrays,” *Физика низких температур*, **43**(7), 1037-1045 (2017) / V. K. Kornev, N. V. Kolotinskiy, A. V. Sharafiev, I. I. Soloviev, O. A. Mukhanov, “From Single SQUID to Superconducting Quantum Arrays,” *Low Temp. Phys.*, **43**(7), 829-836 (2017); IF – 0.804.
- A42. S. V. Bakurskiy, V. I. Filippov, V. I. Ruzhickiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov, “Current-phase relations in SISFS junctions in the vicinity of 0- π transition,” *Phys. Rev. B*, **95**(9), 094522–1-094522–11 (2017); IF – 3.836.

- A43. V. K. Kornev, N. V. Kolotinskiy, A. V. Sharafiev, I. I. Soloviev, O. A. Mukhanov, "Broadband Active Electrically Small Superconductor Antennas," *Supercond. Sci. Technol.*, **30**(10), 103001 (2017); IF – 2.878.
- A44. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, M. Yu. Kupriyanov, A. L. Gudkov, A. S. Sidorenko, "Beyond Moore's technologies: operation principles of a superconductor alternative," *Beilstein J. Nanotechnol.*, **8**, 2689-2710 (2017); IF – 3.127.
- A45. Л. В. Гинзбург, И. Е. Батов, В. В. Больгинов, С. В. Егоров, В. И. Чичков, А. Е. Щеголев, Н. В. Кленов, И. И. Соловьев, С. В. Бакурский, М. Ю. Куприянов, «Определение ток-фазового соотношения джозефсоновских контактов с помощью несимметричного двухконтактного СКВИДа», *ПЖЭТФ*, **107**(1), 54-61 (2018) / L. V. Ginzburg, I. E. Batov, V. V. Bol'ginov, S. V. Egorov, V. I. Chichkov, A. E. Shchegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, S. V. Bakurskiy, M. Yu. Kupriyanov, "Determination of the Current–Phase Relation in Josephson Junctions by Means of an Asymmetric Two-Junction SQUID," *JETP Lett.*, **107**(1), 48-54 (2018); IF – 1.235.

В рецензируемых журналах, индексируемых РИНЦ и входящих в перечень ВАК:

- A46. В. К. Корнев, И. И. Соловьев, Н. В. Кленов, А. В. Шадрин, О. А. Муханов, «Выходной интерфейс для сверхпроводниковых цифровых устройств», *Радиотехника*, **3**, 131 (2009).
- A47. В. К. Корнев, И. И. Соловьев, А. В. Шарафиев, Н. В. Кленов. «От одно- и двухконтактного сквидов к би-сквиду», *Радиотехника*, **12**, 32–47 (2012).

В рецензируемых журналах, индексируемых РИНЦ:

- A48. А. Гудков, Н. Кленов, И. Соловьев, «Цифровые системы приема и обработки информации на основе сверхпроводниковой электроники», *Электроника. Наука, Технология, Бизнес. Спецвыпуск (00137)*, 86 (2014).
- A49. А. Е. Щеголев, Н. В. Кленов, И. И. Соловьев, М. В. Терешонок, «Передачные характеристики ячеек адиабатической сверхпроводниковой логики», *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, **17**(4), 946-949 (2017).

Список патентов:

- П1. Патент РФ: Сверхпроводящая квантовая решетка на основе СКИФ-структур. Авторы: Соловьев И. И., Корнев В. К., Кленов Н. В., Колотинский Н. В., Шарафиев А. В. № RU 2 620 760, дата публикации 29 мая 2017 г.
- П2. Патент РФ: Джозефсоновский фазовый доменный вентиль (варианты). Авторы: Куприянов М. Ю., Бакурский С. В., Кленов Н. В., Соловьев И. И. № RU2 620 027С1, дата публикации 22 мая 2017 г.
- П3. Патент США: 2017 High linearity superconducting radio frequency magnetic field detector. Авторы: Kornev Victor K., Soloviev Igor I., Klenov Nikolai V., Mukhanov Oleg A. № US 9588191 B1, дата публикации 7 марта 2017 г.

- П4. Патент РФ: Джозефсоновский магнитный поворотный вентиль. Авторы: Куприянов М. Ю., Бакурский С. В., Кленов Н. В., Соловьев И. И. № RU2601775_C2, дата публикации 10 ноября 2016 г.
- П5. Патент РФ: Флаксонный баллистический детектор. Авторы: Соловьев И. И., Куприянов М. Ю., Снигирев О. В., Кленов Н. В. № RU2592735 C1, дата публикации 27 июля 2016 г.
- П6. Патент РФ: Джозефсоновский фазовый доменный вентиль. Авторы: Бакурский С. В., Куприянов М. Ю., Кленов Н. В., Соловьев И. И. № 2016115791, дата публикации 22 апреля 2016 г.
- П7. Патент РФ: Джозефсоновский 0-пи переключатель. Авторы: Куприянов М. Ю., Бакурский С. В., Кленов Н. В., Соловьев И. И. № RU 2554614, дата публикации 27 июня 2015 г.
- П8. Патент РФ: Высокочастотный сверхпроводящий элемент памяти. Авторы: Куприянов М. Ю., Бакурский С. В., Кленов Н. В., Соловьев И. И., Гудков А. Л., Рязанов В. В. № RU 2554612, дата публикации 7 июня 2015 г.
- П9. Патент РФ: СВЧ-усилитель на основе высокотемпературного сквида с четырьмя джозефсоновскими контактами. Авторы: Соловьев И. И., Корнев В. К., Кленов Н. В., Шарафиев А. В., Калабухов А. С., Чухаркин М. Л., Снигирев О. В. № 2544275, дата публикации 20 марта 2015 г.
- П10. Патент США: High linearity superconducting radio frequency magnetic field detector. Авторы: Kornev Victor K., Soloviev Igor I., Klenov Nikolai V., Mukhanov Oleg A. № US 8 933 695 B1, дата публикации 13 января 2015 г.
- П11. Патент США: High linearity superconducting radio frequency magnetic field detector. Авторы: Kornev Victor K., Soloviev Igor I., Klenov Nikolai V., Mukhanov Oleg A. № US 008179133, дата публикации 15 мая 2012 г.
- П12. Патент РФ на полезную модель: Флаксонный кольцевой детектор. Авторы: Кленов Н. В., Соловьев И. И., Терешонок М. В. № 177295 U1, дата публикации 15 февраля 2018 г.

Список литературы

- [1] R. C. Jaklevic, J. Lambe, A. H. Silver and J. E. Mercereau, "Quantum interference effects in Josephson tunneling," *Phys. Rev. Lett.*, **12**, 159 (1964).
- [2] J. Clarke, A. I. Braginsky, *The SQUID Handbook vol 1* (Weinheim: Wiley-VCH, 2004).
- [3] H. Weinstock, *SQUID sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications* (Dordrecht: Kluwer, 1996), pp. 1 – 62.
- [4] C. Granata and A. Vettoliere, "Nano Superconducting Quantum Interference device: a powerful tool for nanoscale investigations," *Phys. Rep.*, **614**, 1–69 (2016).
- [5] O. A. Mukhanov, "History of Superconductor Analog-to-Digital Converters," in *100 Years of Superconductivity*, edited by H. Rogalla and P. Kes (Taylor & Francis, London, UK, 2011), pp. 440-458.

- [6] K. K. Likharev, "Superconductor digital electronics," *Physica C*, **482**, 6-18 (2012).
- [7] O. A. Mukhanov, "Digital Processing, Superconductor Digital Electronics," in *Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications*, edited by P. Seidel (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2015), pp. 1 – 28.
- [8] M. Schmelz, V. Zakosarenko, T. Schönau, S. Anders, S. Linzen, R. Stolz and H.-G. Meyer, "Nearly quantum limited nanoSQUIDs based on cross-type Nb/AlO_x/Nb junctions," *Supercond. Sci. Technol.* **30**, 014001 (2017).
- [9] J. Oppenlaender, Ch. Haeussler, and N. Schopohl, "Non- Φ_0 -periodic macroscopic quantum interference in one-dimensional parallel Josephson junction arrays with unconventional grating structure," *Phys. Rev. B*, **63**, 024511-1-9 (2001).
- [10] Ch. Haeussler, J. Oppenlaender, and N. Schopohl, "Nonperiodic flux to voltage conversion of series arrays of dc superconducting quantum interference devices," *Journ. of Appl. Phys.*, **89**(3), 1875 – 1879 (2001).
- [11] A. Inamdar, S. Rylov, A. Talalaevskii, A. Sahu, S. Sarwana, D. E. Kirichenko, I. V. Vernik, T. V. Filippov, D. Gupta "Progress in Design of Improved High Dynamic Range Analog-to-Digital Converters," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**(3), 670-675 (2009).
- [12] O. A. Mukhanov, D. Kirichenko, I. V. Vernik, T. V. Filippov, A. Kirichenko, R. Webber, V. Dotsenko, A. Talalaevskii, J. C. Tang, A. Sahu, P. Shevchenko, R. Miller, S. B. Kaplan, S. Sarwana, and D. Gupta, "Superconductor Digital-RF Receiver Systems," *IEICE Trans. Electron.*, **E91–C**, 306 (2008).
- [13] M. Muck and J. Clarke, "Harmonic distortion and intermodulation products in the microstrip amplifier based on a superconducting quantum interference device," *Appl. Phys. Lett.*, **78**(23), 3666 – 3668 (2001).
- [14] D. V. Averin, K. Rabenstein, V. K. Semenov, "Rapid ballistic readout for flux qubits," *Phys. Rev. B*, **73**, 094504 (2006).
- [15] D. S. Holmes, A. M. Kadin, M. W. Johnson, "Superconducting Computing in Large-Scale Hybrid Systems," *Computer*, **48**, 34–42 (2015).
- [16] X. Peng, Q. Xu, T. Kato, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, N. Takagi, K. Takagi, M. Hidaka, "High-Speed Demonstration of Bit-Serial Floating-Point Adders and Multipliers Using Single-Flux-Quantum Circuits," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25**, 1301106 (2015).
- [17] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Energy efficiency of adiabatic superconductor logic," *Supercond. Sci. Technol.*, **28**, 015003 (2015).

- [18] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Reversible logic gate using adiabatic superconducting devices," *Sci. Rep.*, **4**, 6354 (2014).
- [19] V. K. Semenov, Y. A. Polyakov, S. K. Tolpygo, "AC-Biased Shift Registers as Fabrication Process Benchmark Circuits and Flux Trapping Diagnostic Tool," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **27**(4), 1301409 (2017).
- [20] D. S. Holmes, A. L. Ripple, M. A. Manheimer, "Energy-Efficient Superconducting Computing—Power Budgets and Requirements," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **23**(3), 1701610 (2013).
- [21] R. L. Peterson and D. G. McDonald, "Voltage and current expressions for a two-junction superconducting interferometer," *Journ. Appl. Phys.*, **54**, 992–6 (1983).
- [22] M. Muck and J. Clarke, "Harmonic distortion and intermodulation products in the microstrip amplifier based on a superconducting quantum interference device," *Appl. Phys. Lett.*, **78**(23), 3666 – 3668 (2001).
- [23] И. И. Соловьев, "Исследование процессов в усилителе сигналов быстрой одноквантовой логики на основе многоэлементных джозефсоновских структур", *диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук* (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 2007).
- [24] A. L. Pankratov, A. V. Gordeeva, and L. S. Kuzmin, "Drastic Suppression of Noise-Induced Errors in Underdamped Long Josephson Junctions," *Phys. Rev. Lett.*, **109**, 087003 (2012).

Подписано в печать: 16.04.2018

Заказ № 12410 Тираж – 75 экз.

Бумага офсетная. Формат 60х90/16.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(977) 518-13-77 (499) 788-78-56

www.autoreferat.ru riso@mail.ru

