

*На правах рукописи*

Кленов Николай Викторович

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРИЕМА И  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛА НА ОСНОВЕ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ  
КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ**

Специальности: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения;

Специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный консультант **Аджемов Сергей Сергеевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Вдовин Вячеслав Федорович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», главный научный сотрудник

**Гольцман Григорий Наумович**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», заведующий кафедрой

**Шукринов Юрий Маджнунович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, Объединенный институт ядерных исследований, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технологический институт Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «18» октября 2018 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.219.001.04 в Ордена Трудового Красного Знамени Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, улица Авиамоторная, 8а, ауд. А-448.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МТУСИ, а также на сайте по адресу <http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Klenov/dis-Klenov.pdf>

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 219.001.04  
кандидат технических наук, доцент

Максим Валерьевич Терешонок

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность и степень разработанности темы исследования

Прогресс беспроводных и спутниковых средств связи, других телекоммуникационных и радиолокационных систем на сегодняшний день заметно тормозит острый дефицит частотного ресурса. Решение этой проблемы возможно как за счёт освоения более высоких частотных диапазонов, так и за счёт применения технологии «когнитивного радио». Эта технология позволяет программным образом переключаться между полосами в сверхшироком диапазоне частот (от условного «нуля» до 100 ГГц), а также адаптивно подстраивать вид и параметры модуляции радиосигнала под условия его распространения. При приёме это с очевидностью означает необходимость использования так называемой «прямой оцифровки» принимаемого сигнала во всём диапазоне принимаемых частот с последующей его цифровой обработкой в реальном масштабе времени. Принципы такой прямой оцифровки, пусть и для достаточно низких несущих частот, активно разрабатываются как в мире, так и в нашей стране (например, под руководством А. В. Пестрякова и в группе С.С. Аджемова).

На рисунке 1 представлена блок-схема когнитивной широкополосной (ШП) системы, состоящей всего лишь из широкополосной антенны, совмещенной с малошумящим усилителем (МШУ), аналого-цифрового преобразователя (ШП АЦП) и блока обработки сигнала, включающего и устройства вывода обработанных данных. Пути технической реализации элементной базы для такой системы лежат в центре внимания настоящего исследования.

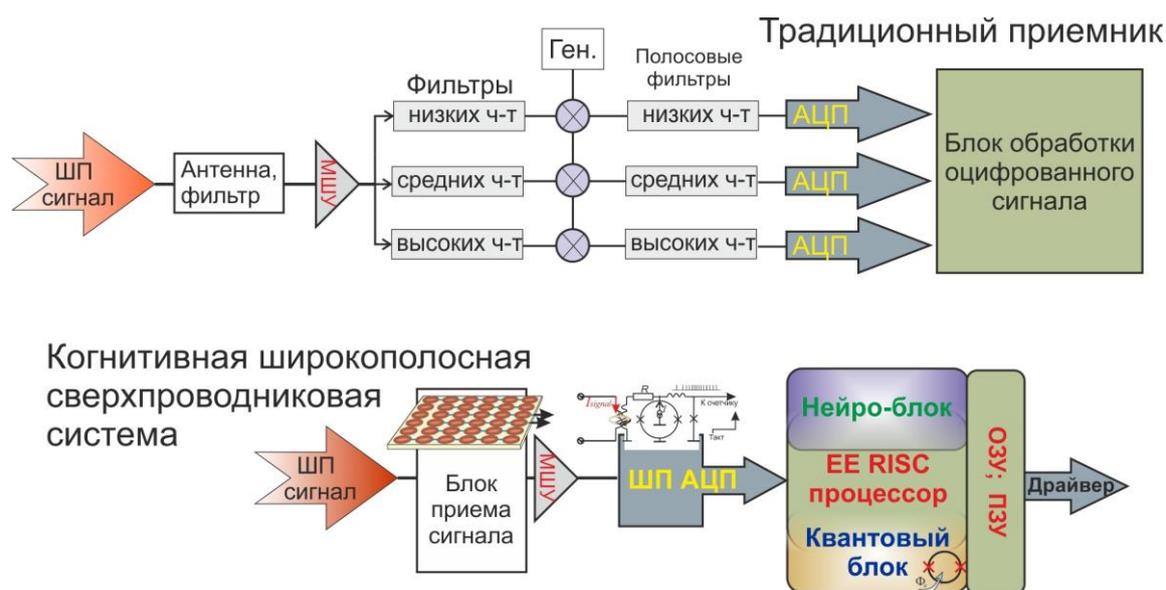


Рисунок 1 – Сравнение принципов построения традиционного (вверху) и полностью цифрового приемника на основе когнитивной технологии (внизу), рассчитанного на прием сигнала в широком диапазоне частот

**III АЦП.** Ключевым элементом рассматриваемой когнитивной системы являются широкополосные высокопроизводительные АЦП, производящие оцифровку быстропеременных сигналов с высоким разрешением для радиосистем сверхвысокочастотного (СВЧ) и миллиметрового диапазонов. Типичные требования к таким АЦП – частота импульсов выборки 60 Гвыб/сек с точностью не менее 6.0 ЕНОВ (эффективных двоичных разрядов, ЭЧБ). Стандартная транзисторная электроника, в силу известных физических и технологических ограничений для «частотных» и «усилительных» параметров микросхем, не смогла взять такую высокую планку.

Эта задача может быть успешно решена с помощью сверхпроводниковых маломощных АЦП, обеспечивающих в требуемой широкой полосе высоколинейное преобразование аналогового сигнала с динамическим диапазоном до 100 дБ и выше. Тактовые частоты таких преобразователей, составляющие 40 – 50 ГГц (недоступные для полупроводниковых аналогов), обеспечивают возможность реализации прямой оцифровки сигналов на частотах до 25 ГГц, соответствующих сантиметровому и миллиметровому диапазонам (X, Ku, K, Ka). На базе сверхпроводниковых АЦП американской фирмой HYPRES (под руководством О. А. Муханова) уже реализованы коммерчески доступные высокоэффективные широкополосные системы сотовой и спутниковой связи. Комбинация широкополосных систем связи со сверхпроводниковыми комплексами обработки сигнала, включающими, в частности, и искусственные нейронные сети, позволяет создавать новые интеллектуальные телекоммуникационные системы в рамках работ по реализации направления Н1 Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

**Блок приема сигнала.** Сверхпроводниковая технология позволяет создавать также элементы активных принимающих систем с предельно высокой чувствительностью к магнитным сигналам: энергетическое разрешение таких элементов (изготовленных, например, в группе Дж. Кларка) достигает  $10^{-30} \dots 10^{-32}$  Дж/Гц, причем в отдельных экспериментах было достигнуто отношение  $\delta E/\Delta F$  порядка двух постоянных Планка  $h$ . Здесь стоит указать, что в исследованиях слабых электрических полей с помощью современных полупроводниковых приборов экспериментаторы только пытаются взять порог  $10^{-22}$  Дж/Гц. Типичные образцы усилителей, работающих по схеме «модулятор-демодулятор» на основе тонких пленок ниобия, продемонстрировали шумовые характеристики на уровне квантового шума на частотах до 8 ГГц, шумовую температуру ниже 1 К и температуру насыщения около 150 К. Смесители на основе гетероструктур сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (SIS), созданные в группе В.П. Кошельца, успешно используются для создания приемников излучения в субтерагерцовом диапазоне частот.

**Блок обработки сигнала.** На базе этой же сверхпроводниковой технологии уже реализованы быстродействующие процессоры с тактовыми частотами 20–40 ГГц: речь идет о 8-битном процессоре с сокращенным набором команд (англ. restricted instruction set computer, RISC) CORE1Beta в Японии и 8- и 16-битных процессорах FLUX в США. На этом направлении развития методов цифровой обработки сигнала получены следующие критически важные для развития всей отрасли результаты:

- частота работы цифрового делителя частоты на базе логического элемента Т-триггер доведена до 750 ГГц, что почти в 8 раз больше такого же показателя для современного полупроводникового аналога;
- продемонстрированы (например, в группе В. К. Семенова) вычисления с диссипацией энергии менее 1 аДж на операцию, что на три порядка меньше характерных для «полупроводникового репера» значений. Для адекватной оценки последней величины стоит указать, что обычные криокулеры, обеспечивающие требуемую для функционирования сверхпроводниковых устройств температуру, при весе порядка десяти килограмм потребляют 1.2 кВт, тогда как энергопотребление лучших современных суперкомпьютеров доходит до 20 МВт.

На настоящий момент уже достаточно проработаны такие системы, как WCDMA-детектор (Wide Band Code Division Multiple Access) для распознавания пользователей в составе базовой станции систем связи большой емкости; цифровой коммутатор-маршрутизатор; уже упоминавшиеся аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи; сигнальные процессоры для работы в составе интегрального приёмника для миллиметровых и субмиллиметровых длин волн.

Наконец, проявление в сверхпроводящих структурах квантовых эффектов на макроскопических масштабах обеспечило возможность создания демонстрационного процессора, состоящего из более чем двух тысяч квантовых битов и успешно использованного для поиска глобального экстремума функции многих переменных. Здесь стоит отметить вклад работ Дж. Мартинеса, Ф. Нори, Ю. Г. Махлина, А. В. Устинова, О. А. Астафьева, Е. В. Ильичева. При этом в смежной области в нашей стране ведется разработка (под руководством В. П. Кулика) высокопроизводительных шифраторов (10 Гбит в секунду) с квантовым каналом распределения криптографических ключей (обновление – один раз в несколько секунд) для быстрой и абсолютно безопасной передачи информации по оптоволоконным и радиолиниям связи.

Можно выделить три серьезные технологические проблемы, не позволившие до сих пор реализовать очевидный потенциал использования макроскопических квантовых

эффектов в сверхпроводниках для создания полноценных комплексов приема: это проблема интеграции, проблема интеграции и опять проблема интеграции. Речь идет о

- слишком большом (микронном) размере джозефсоновских туннельных гетероструктур, ключевых элементов упомянутых выше аналоговых и цифровых устройств;
- слишком большом (порядка нескольких микрометров) размере базовых логических элементов, создаваемых на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров, и ячеек для постоянных и оперативных запоминающих устройств (ПЗУ и ОЗУ), работающих с квантами магнитного потока;
- отсутствии технических решений, позволяющих адекватно использовать при обработке сигнала те возможности по радикальному уменьшению количества используемых логических элементов, что открывают известные на сегодняшний день квантовые и нейросетевые алгоритмы.

Поэтому решаемая в настоящей работе **научная проблема** – теоретический и экспериментальный поиск путей увеличения эффективной интеграции в сверхпроводниковых комплексах приема и обработки сигнала – является весьма актуальной.

### **Цель и задачи работы**

Целью данной работы является разработка перспективных путей реализации когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем (КШСС) для приема и обработки сигналов с использованием классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов.

Технологии когнитивного радио нуждаются в полностью цифровом модуле приёма и обработки сигнала без применения аналоговых входных фильтров, аналоговых преобразователей частоты, схем автоматической регулировки усиления.

В перспективе это должно привести к:

- расширению полосы приема (до 100 ГГц и выше) и, как следствие, увеличению количества одновременно принимаемых радиосигналов;
- увеличению динамического диапазона (до 160 дБ), что позволяет исключить из схем радиоприёмных устройств систем автоматической регулировки усиления (АРУ);
- повышению чувствительности приемно-передающих устройств (до уровня -300 дБВт), что позволяет расширить зону охвата радиосетей;
- повышению быстродействия (до  $10^{13}$  операций в секунду), что позволит обрабатывать сигналы в широкой полосе частот в реальном времени при затратах энергии на уровне 1 Дж на  $10^{15}$  операций.

Достижение указанной цели потребовало решения ряда задач по разработке физических основ создания элементов и ячеек для перспективного радиоприёмного устройства (представленного на рисунке 1), включающего:

- (а) высокочастотные (диапазон частот в пределе до 100 ГГц) и чувствительные (разрешение по магнитному потоку на уровне  $\delta\Phi_e \approx 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{Гц}$ ) сверхпроводящие детекторы магнитной компоненты электромагнитного сигнала («Блок приема сигнала»);
- (б) сверхбыстрые (тактовые частоты до 700 ГГц) энергоэффективные (энерговыделение на операцию  $\sim 1$  аДж) аналого-цифровые преобразователи, способные обеспечить оцифровку получаемого сигнала без предварительного преобразования частоты (ШП АЦП);
- (в) компактные и энергоэффективные логические цепи и блоки криогенной памяти (ОЗУ и ПЗУ), совместимые со сверхпроводниковыми детекторами и АЦП;
- (г) нейросетевые и квантовые блоки обработки оцифрованного сигнала;
- (д) интерфейсные цепи, связывающие сверхпроводящие детекторы и аналого-цифровые преобразователи с блоками обработки сигнала (в том числе и квантовыми), а также обеспечивающих передачу сигнала в цепи полупроводниковой электроники (соединения-«драйверы»).

### **Научная новизна**

Научная новизна работы обусловлена следующими решениями:

1. Использован комплексный подход к разработке универсальной сверхпроводниковой энергоэффективной технологии, пригодной для реализации КШСС с высокой скоростью цифровой обработки радиосигналов за счет использования классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов. Созданы и прошли апробацию при разработке устройств методики для анализа процессов переноса заряда в компактных джозефсоновских элементах и фазовых батареях (с учетом особенностей влияния топологии при переходе к наноразмерным структурам), входящих как в состав ШП АЦП, так и в состав RISC процессора, нейросетевого и квантового блока обработки сигнала.

2. Применяется согласованный анализ процессов как в отдельных джозефсоновских элементах, так и в цепях на их основе, обеспечивающий возможность выполнения требований к блокам КШСС: созданы методики для анализа и оптимизации характеристик как отдельных элементов, так и систем в составе постоянных и оперативных сверхпроводниковых запоминающих устройств, квантовых регистров, нейронов и синаптических связей для увеличения скорости цифровой обработки радиосигналов.

3. Использована методика анализа макроскопических квантовых эффектов в многоконтактных и многоконтурных сверхпроводящих квантовых интерферометрах с магнитными джозефсоновскими контактами впервые:

– при разработке цепей управления для производительных и энергоэффективных адиабатических квантовых вычислений;

– для исследования возможностей интеграции искусственных нейронных сетей в системы обработки оцифрованного сигнала со встроенной магнитной джозефсоновской памятью.

4. Применен метод построения высоко-линейных последовательных и последовательно-параллельных цепочек сверхпроводящих квантовых интерферометров и систем на их основе для расширения частотного диапазона радиоприёмных устройств, а также для увеличения динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы; внедрение её результатов**

Оптимизация элементов КШСС потребовала решения ряда значимых теоретических задач, среди которых:

- 1) анализ специфических проявлений эффекта близости в джозефсоновских гетероструктурах субмикронного размера с непосредственной проводимостью в области слабой связи, построение «диаграммной техники» для процессов токопереноса в таких структурах;
- 2) изучение механизмов, определяющих вид ток-фазовых зависимостей для джозефсоновских гетероструктур с магнитными материалами в области слабой связи;
- 3) самосогласованный анализ поведения коллектива носителей заряда в гетероструктурах со сверхпроводящими, изолирующими, магнитными слоями и слоями нормального металла;
- 4) исследование статических характеристик и специфики динамических процессов, протекающих в гетероструктурах со сверхпроводящими, изолирующими, магнитными слоями и слоями нормального металла;
- 5) анализ особенностей макроскопической квантовой интерференции в джозефсоновских цепях, содержащих несколько сверхпроводящих контуров;
- 6) разработка специализированных методов анализа джозефсоновских цепей в квантовом пределе;
- 7) изучение динамики джозефсоновских квантовых битов под действием управляющих полей пикосекундной длительности
- 8) самосогласованный анализ динамики квантовых битов и связанных с ними квазисолитонных возбуждений в джозефсоновских средах;
- 9) создание специализированных методик расчета и оптимизации характеристик сверхпроводниковых активных антенных систем.

Полученные результаты позволяют уменьшить более чем в 2 раза характерные размеры на плоскости базовых элементов КШСС; дают возможность увеличить более чем на 20 дБ предельную линейность и динамический диапазон активной приемной системы. Также разработанные методы и подходы открывают возможность уменьшить более чем на порядок

(до десятков пикосекунд) длительность операций «Запись» и «Считывание» в криогенных блоках памяти в составе КШСС, а также базовых логических операций для квантового блока обработки сигнала, увеличив до 100 ГГц предельную тактовую частоту функционирования элементов блока цифровой обработки сигнала. Найден способ уменьшить диссипацию энергии в элементах нейросетевого блока обработки сигнала более чем на два порядка до уровня менее 10 аДж на операцию.

Результаты диссертации были использованы при разработке устройств сверхпроводниковой электроники для радиотехнических применений в рамках ряда научно-исследовательских работ. При реализации федеральных целевых программ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» и «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» были успешно выполнены следующие исследования:

- «Разработка технологии получения конструкционных наноматериалов для ВТСП проводов 3-го поколения» (2014–2015);
- «Разработка миниатюрного интегрального СВЧ-СКВИД–усилителя сигналов С-диапазона на основе тонких пленок ВТСП для спутниковых бортовых систем связи» (2013);
- «Сверхпроводниковый спиновый вентиль на основе джозефсоновского перехода с прослойкой из изолятора, сверхпроводника и ферромагнетика» (2012–2013);
- «Исследование нелинейно-оптических процессов в высокоинтенсивных лазерных импульсах ультракороткой длительности для разработки методов диагностики и управления процессами со сверхвысоким временным и пространственным разрешением» (2010–2012);
- «Исследование процессов в новых устройствах электроники на основе квантования переноса заряда и магнитного потока» (2009–2010).

В рамках проектов Российского Фонда Фундаментальных Исследований и Совета по грантам Президента Российской Федерации проводились (в том числе и под руководством автора диссертации) следующие работы:

- «Физические основы создания компактной и быстрой джозефсоновской памяти, сопряженной с энергоэффективной сверхпроводниковой электроникой» (2014-2015);
- «Когнитивные комплексы приема, обработки и защиты информации на основе сверхпроводниковой элементной базы нового поколения» (2016-2018).

В МТУСИ результаты работы использовались для исследования новых методов обработки широкополосного группового сигнала в научно-исследовательских работах «Экспедиция-2020-МТУСИ», «Экспедиция-2020-МТУСИ-2», «Эстафета-Ф-МТУСИ», «Эстафета-2030-МТУСИ».

Также результаты диссертации использовались при совершенствовании учебного процесса в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, при подготовке бакалаврами и магистрантами выпускных квалификационных работ, что подтверждено соответствующими документами.

В перспективе когнитивные широкополосные сверхпроводниковые системы для приема и обработки сигналов должны послужить основой для создания:

- стационарных станций радиосвязи, работающих с большим количеством источников сигналов разного уровня, для увеличения их производительности и «пропускной» способности, для одновременного приема контента различного типа и назначения;
- систем, реализующих задачи удаленного доступа к вычислительным центрам и «облачные» технологии хранения и обработки информации;
- комплексов, реализующих новые принципы функционирования систем защиты информации посредством программно-определяемой связи, в рамках которой частота и тип кодировки радиосигнала устанавливается динамически в широкой полосе частот;
- программно-аппаратных комплексов специального назначения.

#### **Методы исследования, достоверность полученных результатов**

Основные теоретические результаты по оптимизации базовых элементов КШСС были получены автором с использованием аналитических и численных методов решения граничных задач для интегро-дифференциальных уравнений квазиклассической микроскопической теории сверхпроводимости применительно к различным геометриям многослойных гетероструктур. Численный расчет характеристик переноса заряда в джозефсоновских контактах производился на основе самосогласованного решения уравнений Узаделя итерационным методом с использованием схемы продольно-поперечной прогонки. Многоэлементные цепи с джозефсоновскими контактами анализировались на основе обобщенной резистивной модели, где ток фазовая зависимость представлялась в виде ряда Фурье с амплитудами гармонических компонент, полученными из микроскопического рассмотрения. Выводы аналитических исследований были проверены и развиты при помощи численного моделирования, выполненного на высокопроизводительных вычислительных комплексах (например, на суперкомпьютерном кластере Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского). Результаты работы выдержали экспериментальную проверку в различных исследовательских группах в нескольких странах (РФ, США, Германия) и активно применяются в продолжающихся в этой области исследованиях.

#### **Личный вклад**

Автором была предложена концепция единых сверхпроводниковых систем для приема и обработки информации с использованием классических, нейросетевых и квантовых

алгоритмов [A2, A8, A11, A12, A32, A33, A77-A79]. Под вытекающие из такой концепции задачи были разработаны или оптимизированы ключевые элементы и ячейки (джозефсоновские контакты и системы на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров) [A7, A10, A14, A16, A18, A19, A23, A27, A30, A34, A40].

Автором лично было выполнено численное моделирование физических процессов в многоэлементных джозефсоновских структурах (в том числе с учетом флуктуаций) с помощью программного комплекса PSCAN, а также другого современного программного обеспечения [A20, A22, A26, A28, A36, A37, A39, A49-A55, A58]. Автором были оптимизированы на основе результатов экспериментальных исследований с учетом целей настоящей работы топологии и характеристики как отдельных джозефсоновских гетероструктур и сверхпроводящих квантовых интерферометров, так и их последовательных и параллельно-последовательных цепочек [A4-A6, A29, A38, A57, A67-A76]. Также была разработана методика оптимизации элементов «магнитной» памяти для интеграции в состав блока обработки сигнала [A13, A21, A24, A27, A60, A61]. Автор принимал личное участие в экспериментальной отработке методов характеристики ключевых элементов и ячеек.

Лично автором была создана представленная концепция использования адиабатических сверхпроводящих цепей для реализации логических операций на субнаносекундных временах и процедур неразрушающего измерения в квантовом блоке обработки сигнала [A1, A3, A15, A17, A20, A22, A25, A31, A35, A42, A53, A56, A62-A66].

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах:

- лаборатории криоэлектроники и 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,
- Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
- Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Основные положения и результаты диссертации были представлены на 60 международных конференциях и симпозиумах, среди которых:

- международные конференции по прикладной сверхпроводимости (*Applied Superconductivity Conference, ASC*) в 2004, 2006, 2008, 2010, 2012 и 2014 годах, причем в 2012 году одна из сессий включала в название упоминание предложенного автором инновационного решения: «SQIFs, BiSQUIDs and Arrays»;

- 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 (*Superconductivity Centennial Conference, EUCAS-ISEC-ICMC*) в 2011 году;
- международные симпозиумы «*Нанофизика и Наноэлектроника*» в 2005, 2006, 2009-2017;
- 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 наноэлектронике (*Int. Conf. “Micro- and nanoelectronics”, ICMNE*) в 2007, 2009, 2014, 2016 годах;
- всероссийская конференция (с международным участием) «*Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации*» (*РСПОВИ*) в 2016 году;
- международная отраслевая научно-техническая конференция «*Технологии информационного общества*» в 2017 и 2018 годах.

В общей сложности по теме диссертации было сделано 107 докладов.

### **Публикации**

По результатам вошедших в диссертацию исследований опубликовано 112 научных трудов и 5 учебных пособий, среди которых 58 статей в журналах, индексируемых поисковыми системами Web of Science и/или Scopus. Сверх того, имеется еще 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК, но не имеющих на момент публикации переводной версии, учитываемой международными поисковыми системами (всего 22 публикации в российских журналах из списка ВАК). Результаты диссертации были использованы при создании 9 патентов РФ и 3 патентов США.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанные джозефсоновские гетероструктуры с непосредственной проводимостью в области слабой связи в топологии «мостик переменной толщины» позволяют существенно (до 200 нм) уменьшить размеры сверхпроводниковых элементов в составе блока обработки сигнала КШСС.
2. Разработанные джозефсоновские гетероструктуры со сверхпроводящими, изолирующими и магнитными слоями в области слабой связи позволяют существенно (до

500 нм) уменьшить размеры базовых элементов сверхпроводниковых запоминающих устройств в составе блока обработки сигнала КШСС.

3. Разработанные джозефсоновские гетероструктуры со сверхпроводящими, изолирующими и магнитными слоями в области слабой связи позволяют для устройств хранения информации в составе КШСС

– уменьшить длительность операции «Считывание» до 10 пс;

– добиться аналогичной длительности операции «Запись» для элементов оперативных запоминающих устройств.

4. Разработанные энергоэффективные джозефсоновские передающие линии для управления и считывания состояний в квантовых блоках обработки сигналов КШСС позволяют на два порядка (до пикосекундных масштабов) уменьшить длительность логических операций, а также реализовать неразрушающую операцию «Считывание».

5. Разработанные ячейки адиабатических джозефсоновских передающих линий в составе нейросетевых блоков обработки сигналов КШСС позволяют на четыре порядка (до аттоджоулевых масштабов, порядка  $10^{-18}$  Дж/операция) уменьшить выделение энергии при функционировании нейронов и синапсов.

6. Предложенная методика построения электрически малых активных антенн на основе последовательных цепочек сверхпроводящих квантовых интерферометров позволяет без использования цепей обратной связи осуществлять преобразование магнитной компоненты сигнала в отклик напряжения с коэффициентом преобразования до 8000 мкВ/мкТ и линейностью более 100 дБ.

7. Совокупность разработанных элементов и схемотехнических решений позволяет реализовать в одном криогенном пакете широкополосную радиоприемную систему, состоящую из:

– широкополосной антенны, совмещенной с маломощным усилителем, базовые ячейки которого функционируют в частотном диапазоне до 100 ГГц с возможностью увеличения динамического диапазона;

– аналого-цифрового преобразователя и блока обработки сигнала с увеличенным быстродействием за счет использования сверхпроводящих искусственных нейросетей и магнитной памяти, совместимой с логическими цепями, для элементов которых тактовая частота достигает 100 ГГц.

#### **Соответствие положений выбранной специальности**

Выносимые на защиту положения относятся к специальности «05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», включающей, согласно паспорту, «вопросы исследования и создания теории новых электромагнитных явлений и

устройств, новых принципов работы систем, устройств и их элементов ... радиотехнических устройств». Положение 7 относится к определенной в паспорте специальности области исследований, включающей «исследование новых процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств», а также «разработку методов и устройств ... обработки и хранения информации». Положения 4 и 5 относятся к определенной в паспорте специальности области исследований, включающей «разработку перспективных информационных технологий, в том числе цифровых, а также с использованием нейронных сетей ... в радиотехнических устройствах».

Положение 6 относится к определенной в паспорте специальности области исследований, включающей «разработку устройств ... преобразования радиосигналов в радиосредствах различного назначения».

Выносимые на защиту Положения 1, 2 и 3 относятся к специальности «05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах», включающей, согласно паспорту создание «новых и совершенствование существующих твердотельных электронных приборов, радиоэлектронных компонентов, изделий микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах, включающая проблемы и задачи, связанные с разработкой научных основ, физических и технических принципов создания и совершенствования указанных приборов, компонентов», «разработку и исследование физических принципов» такого создания.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 409 страниц, включая 158 рисунков, 6 таблиц, и список цитируемой литературы из 500 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе «Анализ предметной области. Постановка задачи»** представлена концепция создания когнитивных широкополосных систем, использующих прямую оцифровку принимаемого сигнала (вплоть до СВЧ) и последующую обработку в режиме реального времени при помощи классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов. На основании сопоставительного анализа выявленного набора требований к элементной базе радиотехнических комплексов, работающих с широкополосным групповым СВЧ сигналом, продемонстрирована перспективность использования энергоэффективной сверхпроводниковой технологии.

В основу физических принципов функционирования сверхпроводниковых аналоговых и цифровых устройств положено явление макроскопической квантовой интерференции,

одним из следствий которого является способность замкнутого сверхпроводящего контура с двумя «слабыми связями» – джозефсоновскими контактами – преобразовать изменения магнитного поля в отклик напряжения. Это позволяет рассматривать такую систему как электрически малую ненаправленную активную антенну, совмещенную с усилителем–преобразователем сигнала, причем её рабочий диапазон частот определяется характерной частотой используемых джозефсоновских контактов, каковая может достигать сотен ГГц.

Сверхпроводящий контур с джозефсоновскими контактами (сверхпроводящий квантовый интерферометр, СКВИД) может быть использован также как базовая логическая ячейка: существование здесь циркулирующего тока, связанного с квантом магнитного потока  $\Phi_0$ , ассоциируют с «логической единицей», отсутствие такого тока – с «логическим нулем». Слабые связи, функционирующие как нелинейные индуктивности, позволяют осуществлять логические операции, перестраивая распределение токов и меняя число квантов  $\Phi_0$  в контуре. Каждый такой процесс сопровождается появлением «одноквантового» импульса напряжения на одном из джозефсоновских контактов (иллюстрация приведена на рисунке 2,а). Преобразование магнитного сигнала в импульсы напряжения положено также в основу работы сверхпроводниковых аналого-цифровых преобразователей. Создание общих для перечисленных технических решений принципов разработки и проектирования элементов и цепей позволит сконструировать полностью цифровой модуль приёма и обработки сигнала без применения аналоговых входных фильтров, аналоговых преобразователей частоты, схем автоматической регулировки усиления.

В диссертации представлен краткий очерк современной цифровой сверхпроводниковой электроники и выявлены проблемы, тормозящие внедрение такой элементной базы в комплексы приема, обработки и защиты информации. Представлено исследование конкурирующих «пост-металл-оксид-полупроводниковых» решений – включая нейроморфные мемристорные схемы и интегральную фотонику – и определены разумные ниши для внедрения сверхпроводниковых технологий.

Основное преимущество сверхпроводниковой элементной базы – уникальная энергоэффективность при обработке и передаче информации (**на уровне менее 1 аДж на операцию**). Важнейшее с точки зрения радиоприемных систем «дополнение» – уникальная чувствительность детекторов на основе СКВИДов, а также «квантовая» точность оцифровки в сверхпроводниковых АЦП, реализованных на преобразование магнитного сигнала в частоту следования пикосекундных «одноквантовых» импульсов напряжения.

Уже в 2005 году была продемонстрирована работа устройства с тактовой частотой 20 ГГц, динамическим диапазоном на уровне 120 дБ и числом эффективных двоичных разрядов на уровне 17.84 (для частоты выходного сигнала 1 МГц).

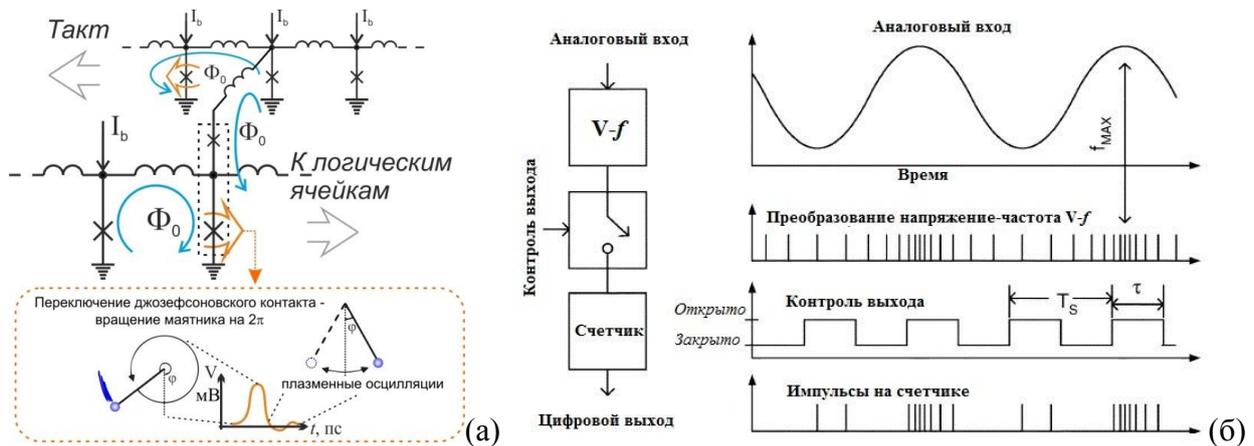


Рисунок 2 – (а) Принципиальная схема простейшего компаратора, функционирующего на основе принципов быстрой одноквантовой логики. Приведены иллюстрации к расчету характеристик одноквантовых импульсов (длительность, напряжение) на основах разработанных для джозефсоновских гетероструктур подходов.

(б) Схематическое представление концепции функционирования совместимой с БОК логикой последовательной АЦП (с избыточной дискретизацией), построенной на основе связи между напряжением на джозефсоновском контакте и частотой следования одноквантовых импульсов.

Именно совместное использование сильных сторон технологии – равно как и эксплуатирование удачных идей, найденных при создании прототипов нейроморфных и фотонных вычислительных систем, для проектирования пассивных передающих линий на чипе и нейросетевых блоков обработки сигнала – открывает возможности для создания эффективных КШСС. В перспективе сочетание на одном кристалле функциональных элементов различных аналоговых и цифровых устройств, участвующих в детектировании и последующей обработке сигнала, существенно уменьшит потребление электроэнергии, увеличит компактность и надежность системы в целом. Выполнение работ по выявлению ключевых технических проблем на этом пути позволило в заключение к первой главе обоснованно сформулировать цели и задачи настоящего исследования.

**В главе 2 «Фундаментальные основы для реализации предлагаемых технических решений»** кратко описаны макроскопические квантовые эффекты в сверхпроводниках. Цель этого изложения – ввести важные для работы понятия и подготовить почву для их использования при решении актуальных задач исследования. Особое внимание уделено принципам определения основного состояния электронных систем с взаимодействием и формализму описания возбуждений на основании преобразования Боголюбова с переходом к анализу пространственно-неоднородных систем при помощи уравнений Боголюбова – де Жена,

$$\mathcal{E}_k \begin{pmatrix} u_k \\ v_k \end{pmatrix} = \hat{\Omega} \begin{pmatrix} u_k \\ v_k \end{pmatrix}, \quad \hat{\Omega} = \begin{pmatrix} \hat{H}_e + B(\vec{r}) & \Delta(\vec{r}) \\ \Delta^*(\vec{r}) & -(\hat{H}_e^* + B(\vec{r})) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

и «квазиклассических приближений». В приведенной здесь записи  $\varepsilon_k$  – энергия возбуждения,  $\hat{H}_e$  – «одноэлектронный гамильтониан»;  $B(\vec{r})$  – энергия взаимодействия между электронами за счет сил кулоновского отталкивания, представленная через взаимодействие со «средним полем» Хартри-Фока (существующее и в нормальном металле «действительное среднее поле»),  $\Delta(\vec{r})$  – аналог этого поля, учитывающий существование электрон-фононного взаимодействия между электронами с противоположно направленными спинами, называемый потенциалом спаривания. Анализ решений уравнений (1) позволяет среди прочего ввести важное для всего дальнейшего изложения понятие длины когерентности для сверхпроводящих корреляций  $\xi$ .

Из представленного в первой главе очерка современного состояния сверхпроводниковой электроники вытекает возможность расширения функционала сверхпроводниковых блоков обработки сигнала за счет использования квантовых и нейросетевых алгоритмов. Поэтому при обсуждении фундаментальных основ реализации предлагаемых технических решений отдельный параграф посвящен современному состоянию исследований на указанном направлении. Развитие технологии в этой области уже привело к созданию вычислительных устройств, работающих с квантовым представлением информации, к которым относятся, например, аналоговые симуляторы спиновых решеток, позволяющие моделировать характеристики простых магнитных систем. Этот подход используется также в некоторых задачах оптимизационного характера при помощи так называемого «квантового отжига». В данной главе заметное место отведено анализу возможностей конвергентного использования квантовых и нейросетевых алгоритмов, намечены пути их имплементации в рассматриваемые радиотехнические системы.

В качестве выводов к главе 2 сформулированы основные проблемы теоретического и экспериментального изучения сверхпроводниковых структур и цепей, решение которых в рамках данной работы позволило добиться прогресса при создании КШСС. Речь идет о способах увеличения достигнутой степени интеграции джозефсоновских микросхем и увеличении относительно малого (менее миллисекунды) времени потери когерентности состояний для созданных на такой основе квантовых регистров. Заложена база для разработки подходов к оптимальной реализации как классических нейронов, так и квантовых битов на основе сверхпроводниковой технологии, а также перестраиваемых связей между базовыми элементами «нейросетевого» и квантового блоков КШСС.

**В третьей главе «Разработка методов исследования базовых элементов и ячеек систем приема и обработки сигнала»** излагаются основные подходы, выбранные и оптимизированные для:

- 1) теоретического рассмотрения специфики процессов переноса заряда в джозефсоновских гетероструктурах субмикронного размера с непосредственно проводимостью (использовано в главах 4 и 5);
- 2) исследования природы связи между протекающим через многосоставную гетероструктуру током  $I$  макроскопически большого числа куперовских пар и фазой комплексной функции (параметра порядка), описывающей концентрацию сверхпроводящих корреляций (использовано в главах 4 и 5);
- 3) исследования особенностей электронного транспорта в гетероструктурах, содержащих сверхпроводники (S), магнитные материалы (F), нормальные металлы (N), изоляторы/полупроводники (I) (использовано в главах 4 и 5);
- 4) моделирования динамических процессов в структурах с джозефсоновскими контактами, в том числе – и с нетривиальной (несинусоидальной) ток-фазовой зависимостью (использовано в главах 5, 6 и 7 для анализа характеристик ячеек блоков приема, обработки и хранения информации в составе КШСС);
- 5-6) разработки концепции функционирования универсального сверхпроводникового комплекса обработки оцифрованного сигнала для работы в классическом, адиабатическом, обратимом, квантовом режиме и режиме искусственной нейронной сети (использовано в главе 6);
- 7) анализа возможностей реализации основных логических операций, включая и исследование взаимодействия ячеек в квантовом режиме с импульсными магнитными полями для управления на пикосекундных временах (использовано в главе 6);
- 8) исследования процессов в интерфейсных устройствах, обеспечивающих связь между классическими, нейросетевыми и квантовыми блоками комплекса обработки информации, а также передачу сигнала в цепи полупроводниковой электроники (использовано в главе 6);
- 9) исследования принципов функционирования сверхпроводниковых широкополосных активных приемных систем радиочастотного диапазона (методика расчета преобразования магнитной компоненты сигнала в отклик напряжения  $V$  использована в главе 7).

Для важнейших параметров выбранной базовой модели с резистивным шунтированием

$$I = I_C \cdot f(\varphi) + V/R_N + C \frac{dV}{dt} + I_F \quad (I_F - \text{«шумовой» ток, } C - \text{емкость}), \quad (2)$$

к которым относятся критический ток  $I_C$ , нормальное сопротивление  $R_N$  и ток-фазовая зависимость  $f(\varphi)$ , разобраны основы наиболее перспективной стратегии теоретического анализа на основе микроскопического рассмотрения. Развитие этого подхода в следующих главах позволило разработать методы оптимизации параметров для обеспечения необходимых свойств многоэлементных и многоконтурных джозефсоновских цепей.

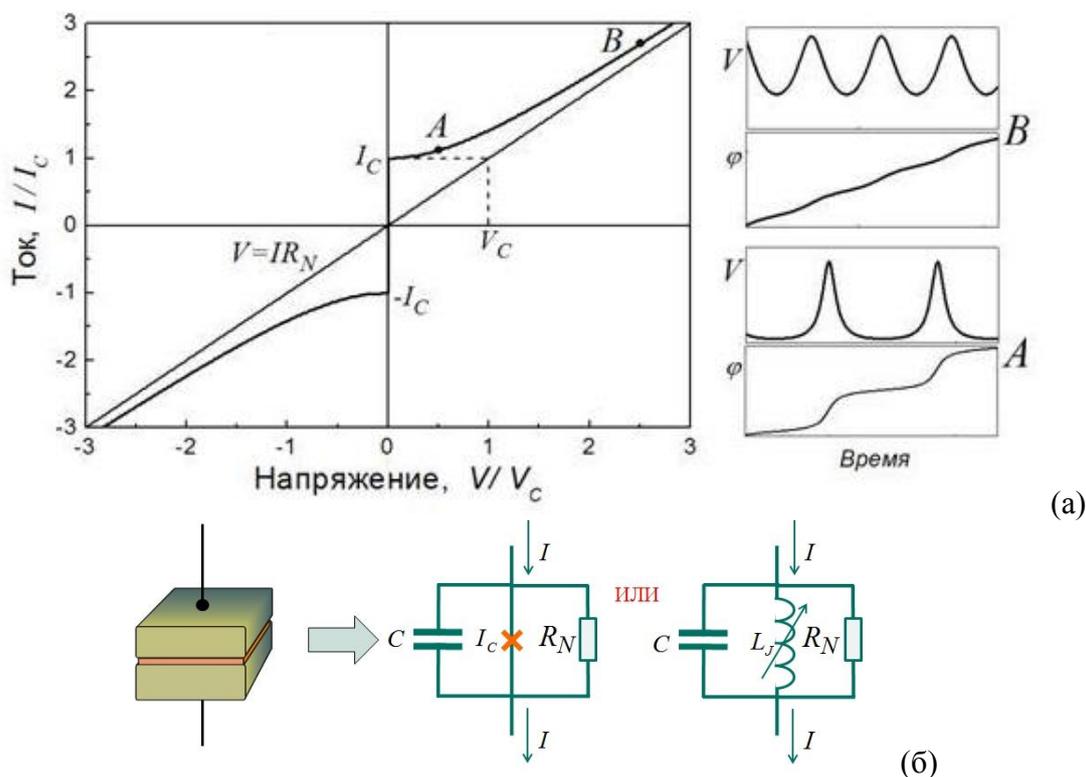


Рисунок 3 – (а) Вольт-амперная характеристика (ВАХ) джозефсоновского перехода с малой емкостью в рамках резистивной модели (RSJ) и схематическое изображение изменения фазы и напряжения в различных точках этой характеристики. (б) Эквивалентная схема рассматриваемого базового элемента КШСС в рамках модели с резистивным шунтированием

Для обеспечения эффективной оптимизации преобразования магнитного сигнала в отклик напряжения для базовых ячеек (и блока приема, и блока обработки сигнала) на основе резистивной модели описания токового транспорта через джозефсоновские гетероструктуры построена методика «последовательных приближений». Это позволило создать общую схему для аналитического описания базовых ячеек радиотехнических систем – сверхпроводящих квантовых интерферометров с набором параметров, вытекающим из специфики решаемых задач и возможностей технологии.

В данной главе сформулированы конкретные требования к ячейкам квантовых блоков обработки сигнала и на основе анализа текущего состояния исследований выбраны фазовые и потоковые кубиты как наиболее перспективные ячейки, в том числе с точки зрения интеграции с другими блоками КШСС. В рамках работ по совершенствованию инструментария, предназначенного для оптимизации характеристик элементов квантового блока КШСС, был развит метод расчета ортонормированного базиса состояний джозефсоновского потокового кубита в двухуровневом приближении. Оказалось, что аналитические выражения для матричных элементов оператора Гамильтона в таких системах удобно выписывать в «спиновом» базисе, полагая, что потенциальная энергия системы

является совокупностью двух потенциальных ям, разделенных туннельным барьером. Корректность всех проведенных рассмотрений удалось наглядно продемонстрировать путем сравнения полученных результатов численных и аналитических расчетов с литературными данными.

**Четвертая глава «Джозефсоновские гетероструктуры с нормальной проводимостью в области слабой связи для миниатюризации элементов в системе приема и обработки сигнала»** посвящена поиску путей увеличения эффективной интеграции за счет перехода к новым типам сверхпроводниковых аналогов транзистора.

Для этого оптимизирован самосогласованный численный алгоритм расчета критического тока, нормального сопротивления, ток-фазовой зависимости и других ключевых электрофизических характеристик джозефсоновских структур (в том числе и для двумерной сетки) с многокомпонентной областью слабой связи (включающей слои изолятора, ферромагнетика, сверхпроводника, нормального металла). Показано, что исключительно важная роль в увеличении степени интеграции джозефсоновских устройств обработки сигнала отводится использованию ранее малоизученных свойств джозефсоновских систем, и в первую очередь – использованию компактных джозефсоновских гетероструктур с нетривиальными (в отдельных случаях – управляемыми) ток-фазовыми зависимостями.

Среди полученных результатов можно выделить демонстрацию принципиальной возможности создания субмикронных джозефсоновских контактов с расчетными характеристиками на основе SNS структур в топологии «мостик переменной толщины». На основе разобранных в третьей главе методов анализа токового транспорта в сверхпроводниковых гетероструктурах со «сложной» слабой связью был построен программный комплекс. Успешная апробация последнего состоялась в процессе интерпретации экспериментальных данных для SNS-«мостиков», представленных в работе [А30], проиллюстрированная рисунком 4,б. Свое развитие этот подход к созданию субмикронных джозефсоновских структур нашел в экспериментальных работах В.В. Рязанова, В.С. Столярова и соавторов.

Добавляя в область слабой связи «мостика переменной толщины» ферромагнитный слой (F) таким образом, чтобы обеспечить существование конкурирующих каналов с разными знаками эффективного критического тока, мы открываем дорогу к созданию компактной фазовой батареи. Её принципиальная схема приведена на рисунке 5,а вместе с полученным в расчетах распределением тока по каналам. Стоит отметить, что предлагаемая структура такой фазовой батареи позволяет на порядок (до долей микрометра) уменьшить её геометрические размеры.

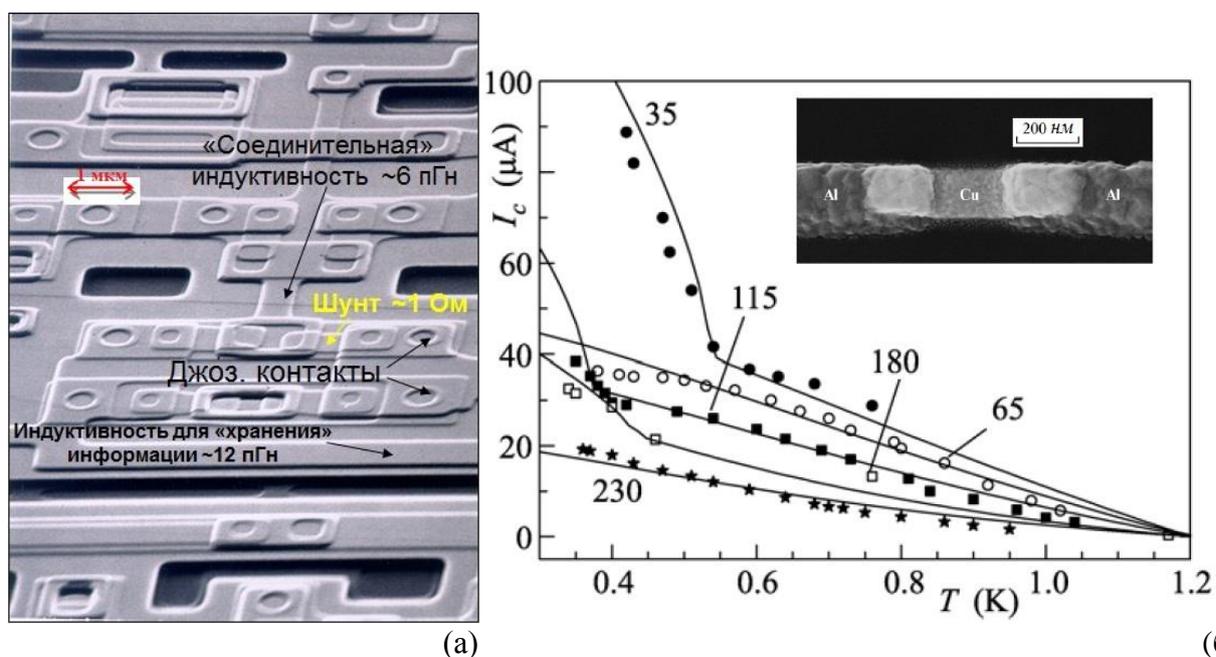


Рисунок 4 – Иллюстрация к обсуждению топологии джозефсоновских структур с указанием ключевых геометрических и электрофизических характеристик на основе (а) туннельной технологии изготовления джозефсоновских элементов; (б) с использованием контактов сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник. Приведено также и сравнение результатов расчета критического тока по разработанным методикам (линии) с результатами экспериментальных исследований прототипов наноразмерных элементов SNS типа (точки, размеры области слабой связи указаны в нм)

Созданный для оптимизации такого элемента программный комплекс при исследовании токового транспорта в сверхпроводниковых гетероструктурах со сложной топологией составной слабой связи, содержащей ферромагнитные области, позволил построить новый метод анализа влияний неоднородностей. Выполненные работы позволили среди прочего объяснить поведение наведенных сверхпроводящих корреляций в реальных контактах SFS типа, используемых для уменьшения размера типовых ячеек блока обработки сигнала в КШСС.

Развитие изложенных подходов для исследования более сложных компактных стекловых структур со сверхпроводящим электродом (S) и чередующимися нормальными (N) / сверхпроводящими и ферромагнитными (F) слоями (рисунок 4, б) позволило рассмотреть возможность практического использования сверхпроводимости, наведенной посредством генерации двух параллельно существующих каналов. Один из этих каналов характеризуется плавным монотонным «спаданием сверхпроводимости», в то время как для второго имеют место затухающие осцилляции критического тока как функции длины структуры, что открывает новые возможности для развития технологии изготовления управляемых джозефсоновских элементов. Свое развитие концепция использования многослойных

структур с возможностью управления эффективной обменной энергией нашла в работах М.Ю. Куприянова, С.В. Бакурского и соавторов.

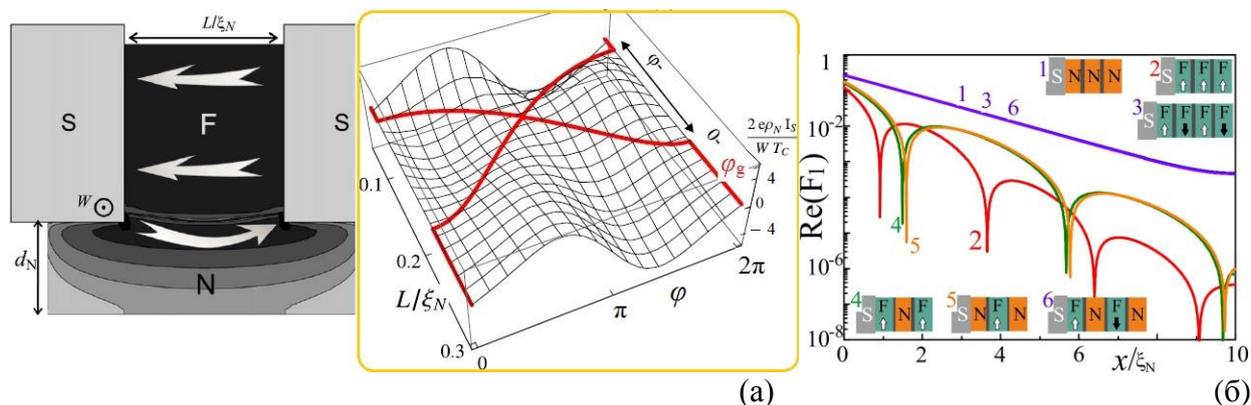


Рисунок 5 – (а) Разработанная топология компактной фазовой батареи с конкурирующими токовыми каналами и рассчитанные для неё ток-фазовые зависимости.

(б) Различные виды стековых гетероструктур, содержащих сверхпроводящие, нормальные и магнитные слои, и рассчитанные для них концентрации наведенных сверхпроводящих корреляций в «нормально-ферромагнитной» области как функции расстояния до границы сверхпроводника

**В Главе 5 «Компактные джозефсоновские переключатели, вентили и элементы памяти»** излагаются методы создания и оптимизации таких сверхпроводниковых аналогов магниторезистивной туннельной памяти, совместимых с ячейками сверхпроводникового комплекса приема и обработки сигнала на основе быстрой одноквантовой логики (БОК).

Развитие БОК-логики, модифицированные принципы функционирования которой активно используются и в блоках КШСС, долгое время сдерживалось отсутствием компактных ячеек памяти, работающих при низких температурах. В экспериментах последнего времени было показано, что такая память может быть создана на базе бистабильных джозефсоновских структур, содержащих сверхпроводящие, диэлектрические и ферромагнитные слои.

В представленной на рисунке 6,а схеме простейшей ячейки постоянного запоминающего устройства процессы в джозефсоновском элементе определяются взаимной ориентацией намагниченностей F-слоев (или «эффективным обменным полем») в области слабой связи SIFsFS структуры. Величина критического тока такого переключателя в зависимости от установленного в ходе операции «Запись» эффективного обменного поля либо не достигает («0»), либо превышает («1») значение критического тока в линии Чтение. Вошедший одноквантовый импульс, переносящий информацию, либо выходит через SFIsFS контакт («0»), либо проходит в линию Выход («1»). На рисунке 6,б представлены результаты теоретического анализа бистабильных джозефсоновских структур для описанных ПЗУ-ячеек.

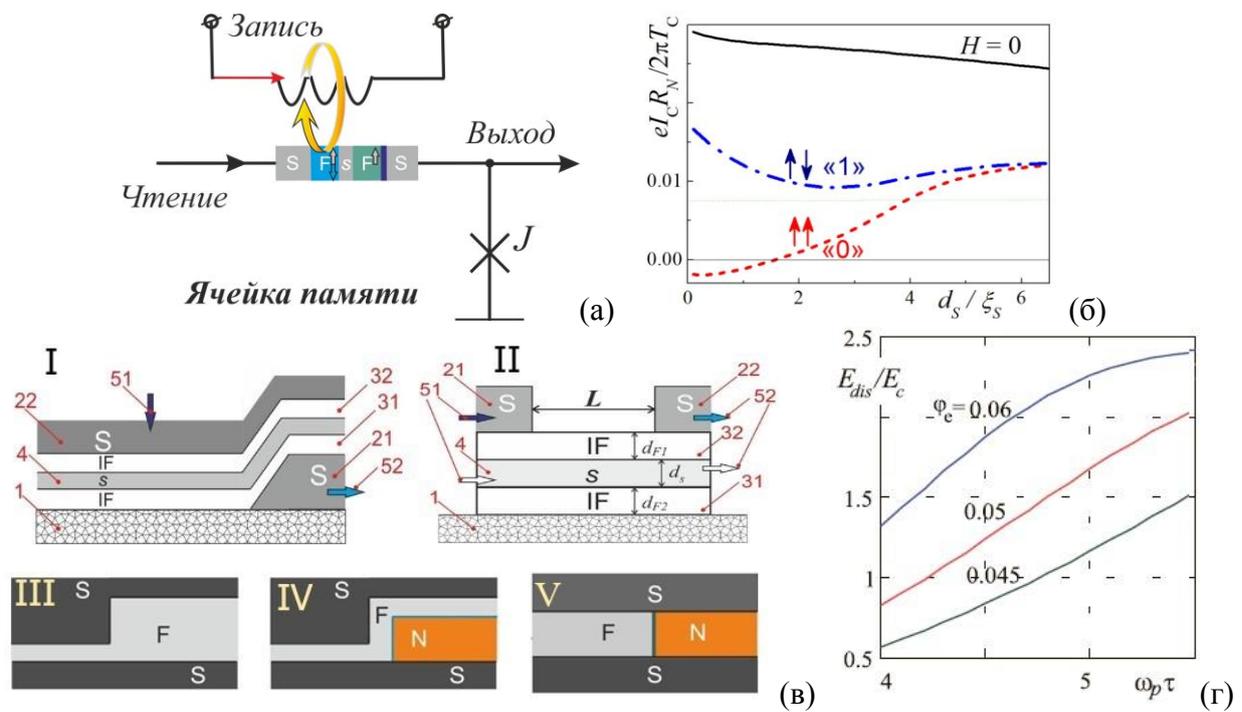


Рисунок 6 – (а) Принципиальная схема предлагаемой оптимизированной компактной ячейки ПЗУ, содержащей структуру с магнитными материалами. (б) Зависимости критического тока SFsFIS-контакта от толщины s-слоя для параллельной (штриховая линия) и антипараллельной (штрихпунктирная) ориентаций намагниченностей в F-слоях. (в) I и II. Дополнительно оптимизированная часть переключаемого элемента ПЗУ на подложке (1) с двумя слоями магнитного материала (31 и 32) и дополнительным слоем сверхпроводника (4). Представлено возможное расположение сверхпроводящих электродов (21 и 22) с токоподводами (51, 52) как для торцевой топологии (I), так и для топологии «мостик переменной толщины» (II). III, IV и V. Топологии джозефсоновских гетероструктур с пространственно неоднородными областями слабой связи с одним магнитным слоем для реализации ячеек ОЗУ и ПЗУ. Для варианта (III) представлены нормированные энергии диссипации для операции «Запись» для различных нормированных амплитуд управляющего импульса магнитного потока как функции длительности перехода между состояниями бистабильной системы

Проведенные расчеты позволили оптимизировать основные режимы работы предлагаемой криогенной памяти. Продемонстрирована возможность создания переключаемого инвертора фазы для устройств БОК-логики, характерная частота которого на 2 – 3 порядка превосходит характерные значения для всех известных аналогов.

Для совершенствования джозефсоновских магнитных элементов запоминающих устройств были развиты методики расчета их основных характеристик (например, для критического тока джозефсоновских контактов) как функции внешних управляющих параметров (температуры, эффективной обменной энергии ферромагнитных слоев, внешнего магнитного поля, взаимной ориентации векторов намагниченности F-пленок). В частности, продемонстрированы перспективы использования гетероструктур с одним магнитным слоем, разделенным на части за счет разной «связи» со сверхпроводниками для реализации быстрых

ячеек оперативных запоминающих устройств (рисунок 6,в). Из приведенных на рисунке 6,г результатов имитационного моделирования операции «Запись» в ОЗУ-ячейки вытекает возможность управления импульсами с длительностью менее 100 пс при выделении энергии на уровне порядка  $10^{-18}$  Дж/операция.

Объединение в одном самосогласованном процессе моделирования «микроскопического» описания джозефсоновских гетероструктур с составной областью слабой связи и «макроскопического» описания джозефсоновских же систем с нетривиальными ток-фазовыми зависимостями в итоге позволило выявить пути для дополнительного существенного увеличения степени интеграции для всех блоков обработки сигнала в составе КШСС. Речь идет о том, чтобы заменить в ячейках, хранящих информацию, «громоздкие» сверхпроводящие квантовые интерферометры на аналогичные по функционалу, но куда более компактные управляемые джозефсоновские контакты.

Обобщение и оценка полученных результатов позволили сформулировать обоснованные рекомендации по созданию и использованию

- (1) элемента постоянного запоминающего устройства на основе SISFS структуры (особенно плодотворной представляется замена слоев изолятора и ферромагнетика на магнитные изоляторы для построения джозефсоновского вентиля с высокоуровневыми характеристиками);
- (2) 0- $\pi$  переключателя с высокой характерной частотой на основе той же SISFS структуры;
- (3) высокочастотного элемента памяти на основе джозефсоновской гетероструктуры с двумя магнитными слоями для защиты от ложных срабатываний;
- (4) элемента оперативной памяти на основе наноразмерных аналогов СКВИДов (Рисунок 6,в III, IV, V), где реализация операции «Запись» возможна при помощи одноквантовых импульсов тока пикосекундной длительности.

В шестой главе «Квантовые и нейросетевые блоки обработки сигнала» приведены результаты разработки концепции использования новых принципов обработки сигнала на основе описанных в главе 2 алгоритмов. Ускорение процессов обработки здесь возможно, в частности, за счет того, что квантовая система, состоящая из  $N$  базовых двухуровневых квантовых логических ячеек (кубитов) имеет  $2^N$  линейно независимых состояний. Пространство состояний такого квантового регистра является  $2^N$ -мерным гильбертовым пространством, произвольная квантовая операция над которым соответствует повороту вектора состояния регистра, при котором выполняется параллельная обработка сразу всех  $2^N$  возможных состояний (от классического сигнального процессора подобная операция потребует  $2^N$  отдельных шагов). Сверхпроводящие интерферометры в квантовом пределе позволяют создавать для КШСС макроскопические квантовые логические ячейки –

потокковые кубиты – с заданными параметрами (например, с заданным «расстоянием» между энергетическими уровнями системы). Включая в такие интерферометры фазовые инвертеры и фазовые батареи – как показано на рисунке 1, на вставке для «квантового блока» КШСС – описанные в главах 4 и 5, можно существенно увеличить время потери когерентности состояний и получить новые возможности для интеграции в цепи энергоэффективной быстрой однокубитовой логики (включая и адиабатический вариант последней). В основу методов оптимизации ячеек квантовых блоков обработки сигнала здесь положены представленные в главе 3 методы расчета матричных элементов оператора Гамильтона. Для кубита на основе сверхпроводящего интерферометра рассчитаны характеристики используемых при обработке сигнала логических состояний, а также предложены способы эффективной защиты от шумов (источников потери когерентности) за счет использования контактов с несинусоидальными ток-фазовыми зависимостями.

Также предложены и оптимизированы энергоэффективные джозефсоновские нейроны, предназначенные для многослойных персептронов и сетей на радиальных базисных функциях (РБФ), обеспечивающих эффективную классификацию источников сигналов. На рисунке 7,а представлена такая компактная ячейка на основе двухконтактного сверхпроводящего квантового интерферометра, шунтированного индуктивностью. Этот вариант нейрона работает с «магнитной репрезентацией информации» (в виде направления или величины магнитного потока в сверхпроводящем контуре), что позволяет легко связать его с описанными выше элементами БОК-логики в составе блока обработки сигнала КШСС, равно как и использовать для построения перестраиваемых синаптических связей. Из приведенных на рисунке 7,б результатов имитационного моделирования видно, что предложенная ячейка позволяет с высокой точностью получать оптимальную активационную функцию для РБФ-сетей.

Также глава содержит анализ физических основ оптимизации управляющих цепей для квантового блока обработки сигнала на основе новой теории распространения солитоноподобных возмущений в нелинейных, пространственно-неоднородных средах в присутствии флуктуаций. Эта техническая задача имеет сейчас первостепенное техническое значение: традиционные методы управления регистрами кубитов требуют использования высокостабильных генераторов гигагерцового излучения и высокочувствительных детекторов (стоимость одного управляющего канала составляет порядка 600000 рублей). В работе предлагается перейти к использованию интегрированных на чип генераторов излучения, передающих линий и счетчиков на основе макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках, что позволит радикально уменьшить стоимость управляющих систем и при этом улучшить их характеристики.

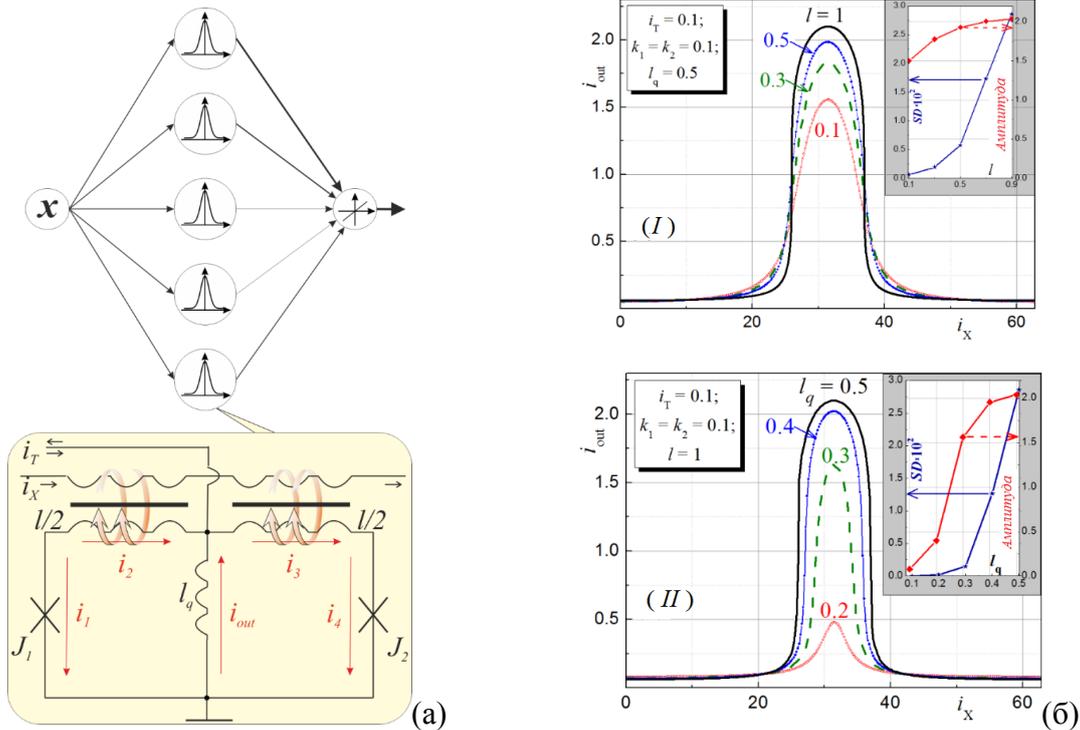


Рисунок 7 – (а) Принципиальная схема искусственной нейронной сети на радиальных базисных функциях (РБФ-сеть), в качестве ячейки которой мы предлагаем использовать двухконтактный сверхпроводящий квантовый интерферометр, шунтированный индуктивностью.

(б) Ток-поточковые преобразования для предлагаемой ячейки, рассчитанные численно и аналитически для разных параметров ячейки; на вставках представлены амплитуда преобразования и функция R-квадрат ( $SD$ ), позволяющая сравнить близость полученных активационных функций с оптимальной для данного класса нейросетей функцией Гаусса

Так, характерная частота квантовых когерентных осцилляций в упомянутых выше потоковых кубитах может составлять от нескольких сотен МГц до десятков ГГц, что позволяет считать здесь «ультракороткими» даже пикосекундные управляющие импульсы поля (при этом существует возможность адиабатически менять параметры квантовых систем *in situ*). Отдельно необходимо отметить возможность организации контролируемого взаимодействия между сверхпроводниковыми кубитами посредством как резонаторов, так и джозефсоновских передающих линий (рисунок 8).

Для эффективного взаимодействия обычных атомов характерное расстояние между ними должно быть менее 10 – 20 Å, что очень затрудняет адресное воздействие на интересующую нас отдельную квантовую систему. Предложена концепция интеграции с цепями адиабатической сверхпроводниковой логики, обеспечивающая для квантового регистра возможность реализации считывания/управления на пикосекундных временах при сохранении достаточно большого времени потери когерентности состояний отдельных кубитов.

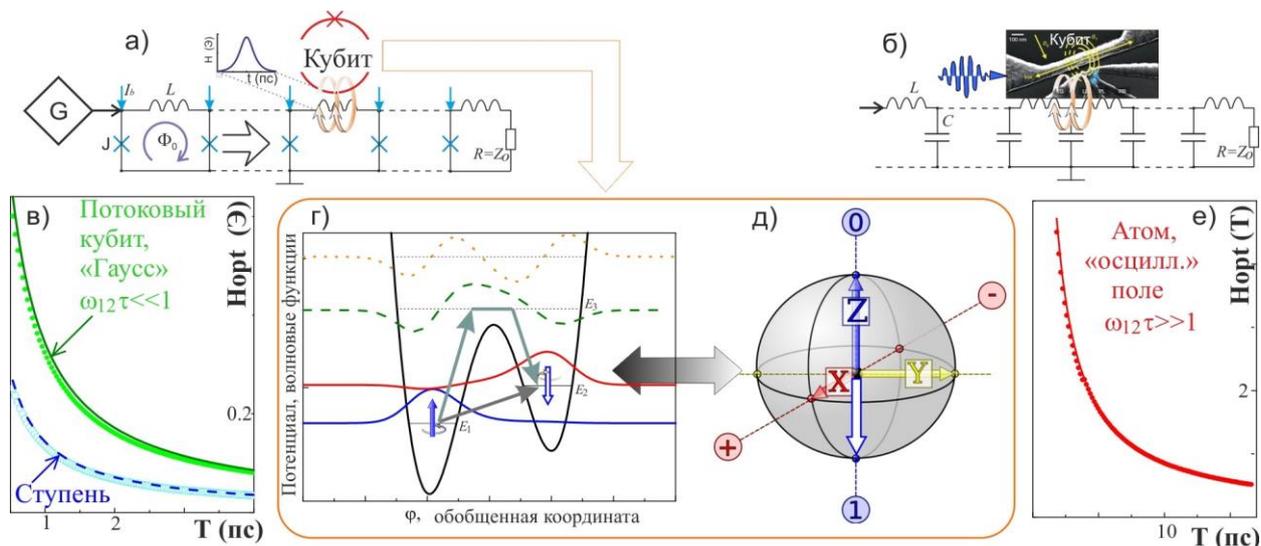


Рисунок 8 – Принципиальная схема цепей управления потоковым кубитом на основе резонатора (для «осциллирующих» воздействий, б) и параллельной цепочки джозефсоновских контактов (для «униполярных» воздействий, а); соответствующие связи между амплитудой и длительностью воздействий для реализации операции НЕ при разных типах воздействия на систему (в и е). В центре рисунка представлена иллюстрация для реализации операции НЕ как перехода между состояниями спинового базиса (г) и поворот вектора Блоха (д), описывающего состояние кубита

Это было показано, в частности, на основе анализа систем уравнений для населенностей  $|a|^2$  и  $|b|^2$  уровней кубита под действием магнитного поля с напряженностью  $H_0 f(t)$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix} = \hat{B} \begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix}, \quad \hat{B}(t) = \begin{pmatrix} 0 & \chi(t) \\ -\chi^*(t) & 0 \end{pmatrix}, \quad \chi(t) = \frac{i}{\hbar} \mu_{12} H_0 f(t) e^{-i\omega_{12}t} \quad (3)$$

где  $\mu_{12} = \mu_{21}$  – матричные элементы оператора магнитного дипольного момента для базисных состояний,  $\omega_{12}$  – частота резонансного перехода в двухуровневой системе,  $i$  – мнимая единица,  $\hbar$  – постоянная Планка.

Разработаны технические решения, позволяющие за счет замены джозефсоновских контактов в передающей линии на сверхпроводящие квантовые интерферометры особого вида на порядок уменьшить диссипацию энергии в управляющих и считывающих цепях. Полученные результаты открывают возможность включить квантовый блок обработки сигнала в состав КШСС, обеспечивая как ввод, так и вывод данных.

В седьмой главе «Принципы построения когнитивных широкополосных сверхпроводниковых приемных систем», завершающей настоящую работу, формулируются вытекающие из предыдущего рассмотрения требования к аналоговому компоненту комплекса и изучаются способы оптимизации известных сверхпроводящих квантовых интерферометров, позволяющие указанные требования удовлетворить. Сегодня

наиболее серьезные ограничения на общую эффективность сверхпроводниковых прототипов приемных устройств для когнитивного радио вытекают из параметров антенного тракта и следующего за ним полупроводникового усилителя, обладающего существенно меньшим динамическим диапазоном и линейностью по сравнению с упомянутыми выше ШП АЦП.

Решение этой проблемы в рамках предлагаемой концепции видится в замене существующего приемного тракта на полностью сверхпроводниковый с широкополосным приемом электромагнитного сигнала и его высоколинейным преобразованием в напряжение.

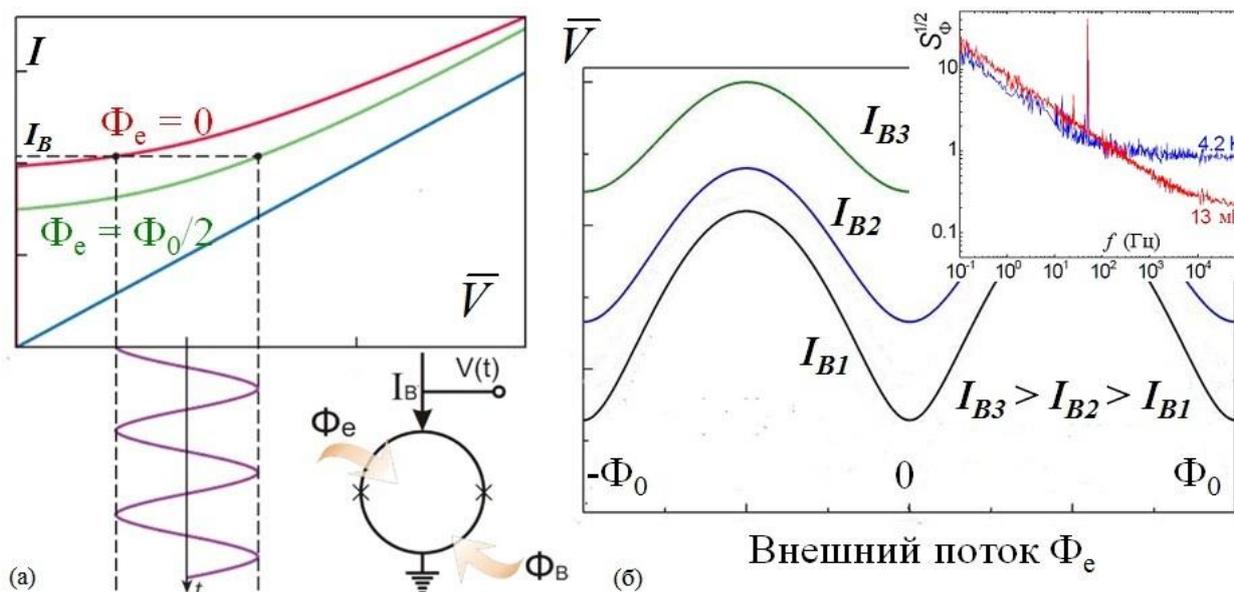


Рисунок 9 – Принципиальная схема элементарной ячейки активной широкополосной сверхпроводниковой антенны, её вольт-амперные (а) и вольт-поточковые (б) характеристики при разных значениях тока смещения интерферометра  $I_B$ , иллюстрирующие принцип преобразования магнитной компоненты сигнала в отклик напряжения. На вставке к рисунку (б) представлены характерные спектральные плотности «магнитных» шумов для такой ячейки (выраженных в  $\text{мк}\Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$ )

Принцип работы базовой ячейки блока приема сигнала – магнитная компонента сигнала влияет на ВАХ интерферометра, а через это и на снимаемое с ячейки напряжение – представлен на рисунке 9 вместе с результатами расчета в рамках резистивной модели её вольт-поточковых характеристик.

В рамках работы разобрана специфика макроскопической квантовой интерференции в многоэлементных структурах, проявляющаяся при их использовании в качестве основы для сверхпроводящих усилителей-преобразователей высокочастотных сигналов. В работе заложены основы использования джозефсоновских систем с нетривиальной топологией для работы с сигналами гигагерцового ( $10 \dots 20$  ГГц и выше) диапазона частот для достижения линейности вольт-поточкового преобразования выше 100 дБ.

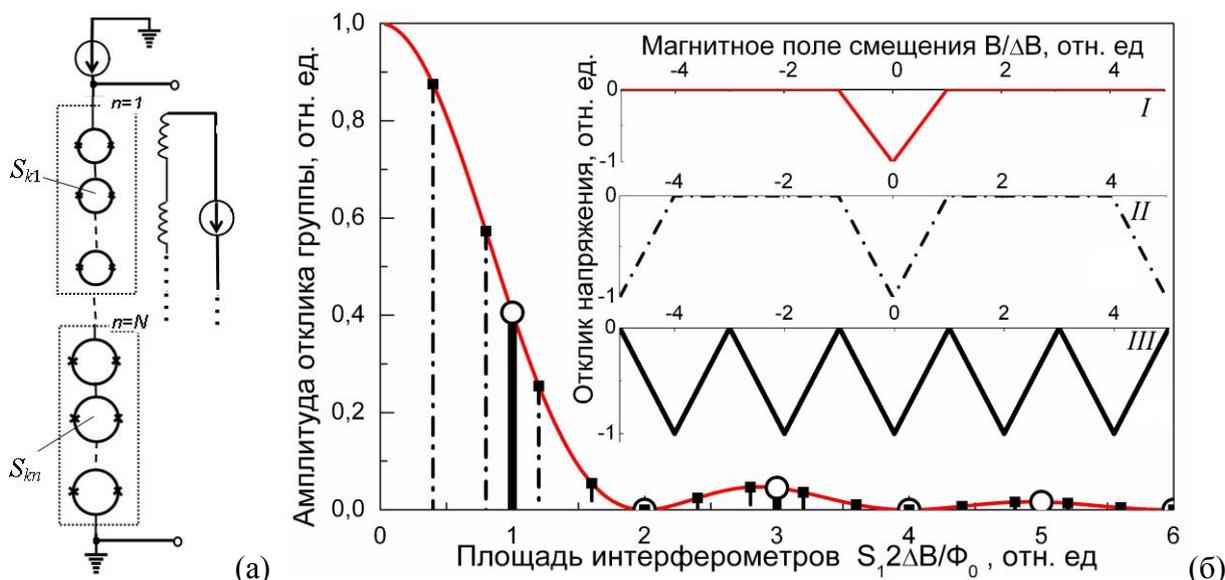


Рисунок 10 – (а) Принципиальная схема простейшей сверхпроводящей квантовой решетки (СКР). (б) Амплитудно-«частотный» спектр СКР, обеспечивающих треугольный отклик напряжения. Данный спектр описывает распределение числа интерферометров, дающих гармонический отклик напряжения, по значениям их эффективной площади.

Непрерывный спектр обеспечивает отклик напряжения с одним единственным пиком (отклик «I» на вставке). Дискретные спектры, показанные вертикальными штрихпунктирными и сплошными линиями, обеспечивают периодические треугольные отклики напряжения с разными периодами (отклики «II» и «III» на вставке)

В основе предложенного подхода – использование многоконтактных и многоконтурных цепочек, состоящих из групп интерферометров. В варианте реализации, основанном на последовательной цепочке элементов, представленном на рисунке 10, эффективные площади ячеек растут с номером группы  $n$  по закону  $S_n = n \cdot S_1$ . Это позволяет увеличить линейность суммарных вольт-поточковых характеристик без использования систем обратной связи, если количество интерферометров  $m$  в каждой группе подобрано так, чтобы с учетом реального вида откликов единичных интерферометров выполнялось соотношение

$$m \left( \begin{array}{c} \text{отклик интерферометра} \\ n\text{-ой группы} \end{array} \right) = \text{Const} \cdot \text{sinc}^2 \left( n \frac{\pi S_1}{\Phi_0} \left( \begin{array}{c} \text{период по полю} \\ \text{общего отклика} \end{array} \right) \right). \quad (4)$$

В рамках развития концепции в работах В.К. Корнева, И.И. Соловьева и соавторов предложено использовать более компактное дифференциальное соединение параллельных цепочек неравномерно распределенных джозефсоновских контактов – СКИФов (сверхпроводящих квантовых интерференционных фильтров). В качестве альтернативного решения возможно использование специализированных ячеек с линейным откликом напряжения на приложенный магнитный сигнал (биСКВИДов), состоящих из традиционного двухконтактного СКВИДа и одноконтактного интерферометра. Параметры сверхпроводящего одноконтактного интерферометра подбираются таким образом, чтобы

осуществляемое им нелинейное преобразование входного магнитного сигнала компенсировало нелинейность преобразования сигнала в напряжение двухконтактного интерферометра. Построение СКИФ-структур на основе таких элементов позволяет, как подтверждают экспериментальные работы О.А. Муханова, Г. В. Прокопенко и соавторов, дополнительно оптимизировать работу аналоговой компоненты приемной системы КШСС.

Объединение на одном чипе (или хотя бы в одном криогенном комплексе) и уникальной приемной системы, и логических цепей, обеспечивающих первичную обработку (классификацию) поступающих данных, обещает вдобавок ко всему прочему и резкое уменьшение потерь и задержек на соединениях между различными частями телекоммуникационной системы.

В заключении сформулированы **основные результаты диссертационной работы**

1. Разработана методика анализа токового транспорта в гетероструктурах со сверхпроводящими материалами для получения субмикронных воспроизводимых базовых элементов когнитивных широкополосных систем приема и обработки сигналов. Продемонстрирована возможность построения джозефсоновских контактов с непосредственной проводимостью в области слабой связи, выполненных в топологии «мостик переменной толщины», с критическим током до 1 мА и характерным напряжением до 4 мВ. Результаты модельных расчетов демонстрируют хорошее совпадение с экспериментальными данными, что подтверждает эффективность разработанной методики при исследовании компактных джозефсоновских элементов с характерным размером области слабой связи 35... 250 нм.

2. С использованием разработанной методики выполнена оптимизация характеристик фазовой батареи на основе джозефсоновских гетероструктур с непосредственной проводимостью в области слабой связи в топологии «мостик переменной толщины», позволившая на порядок (до 100 нм) уменьшить допустимый размер элемента по сравнению с известными аналогами. Предложена на основе исследованного джозефсоновского элемента с нетривиальной ток-фазовой зависимостью топология более компактной по сравнению с аналогами логической ячейки со встроенным заданием рабочей точки. Продемонстрированы возможности расширения функционала использованной методики для анализа токового транспорта через магнитные слои с нормальными включениями в реальных джозефсоновских гетероструктурах.

3. Исследованы способы увеличения быстродействия базовых элементов постоянных запоминающих устройств для когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем приема и обработки сигналов; показано, что использование здесь джозефсоновских гетероструктур со сверхпроводящими, изолирующими и магнитными слоями в области

слабой связи позволяет довести длительность операции «Считывание» до 10 пс. Плодотворной представляется замена слоев изолятора и ферромагнетика на магнитные изоляторы для построения джозефсоновского вентиля ( $\pi$ -контакта для встроенной системы задания рабочей точки) с характерным напряжением в  $\pi$ -состоянии на уровне туннельных гетероструктур, высокой воспроизводимостью и подавленным током квазичастиц.

4. Оптимизированы базовые элементы оперативных запоминающих устройств и определены условия, при которых использование джозефсоновских гетероструктур со сверхпроводящими, изолирующими и магнитными слоями в области слабой связи позволяет сделать длительность операции «Запись» менее 1 нс. Выявлены возможности управления джозефсоновскими гетероструктурами при помощи только импульсов тока, без переворота вектора намагниченности в области слабой связи элемента ОЗУ (специфика такого переворота ограничивает сверху быстрдействие современной магнитной памяти).

5. Оптимизированы базовые ячейки для нейросетевого блока когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем приема и обработки сигналов на основе одно- и двухконтактных сверхпроводящих квантовых интерферометров, шунтированных дополнительной индуктивностью; энерговыделение на одну логическую операцию в таких ячейках (эквивалентный элемент при реализации на основе полупроводниковой элементной базы состоит примерно из 20 транзисторов) может быть уменьшено до 10 аДж.

6. Выполнен анализ характеристик сверхпроводящих интерферометров в квантовом пределе, что позволило выявить дополнительные возможности

- для увеличения времени потери когерентности до 10 мкс;
- интеграции с цепями когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем для уменьшения на порядок стоимости создания одного управляющего канала.

В рамках общей для всей работы парадигмы самосогласованного исследования свойств сверхпроводниковых гетероструктур и элементов на их основе показано, как использование разработанных ранее компактных фазовых батарей позволяет существенно уменьшить негативное влияние паразитных магнитных полей.

7. Выполнен анализ воздействия распространяющихся по нелинейным джозефсоновским резонаторам солитоноподобных возбуждений (флаксонов) на динамику состояния квантовой системы для доказательства возможности осуществления манипуляций с состояниями кубита за счет приложения импульсов магнитного потока длительностью 0.5...5 пс. Радикальное уменьшение крайне нежелательной диссипации энергии в процессе таких логических операций (до уровня 1 аДж и ниже, вплоть до термодинамического предела  $2\ln k_B T$ ) возможно при переходе к адиабатическим (обратимым) передающим

линиям, где вместо джозефсоновских гетероструктур используются сверхпроводящие квантовые интерферометры с отрицательной индуктивной связью между частями ячейки.

8. Разработаны методы линеаризации вольт-потокowego преобразования в системе приема магнитной компоненты сигнала на основе последовательной цепочки, состоящей из групп интерферометров со специальным образом подобранными площадями для получения свободного от искажения динамического диапазона до 120 дБ в гигагерцовом диапазоне частот. Для анализа поведения подобных многоэлементных структур в составе электрически-малых активных антенн с учетом растекания токов разработана концепция радиуса взаимодействия, позволившая определить параметры параллельно-последовательной структуры для достижения коэффициента линейного преобразования магнитного сигнала в отклик напряжения на уровне 8000 мкВ/мкТ (при чувствительности радиоприемной системы до 3 фТл/Гц<sup>1/2</sup>).

### Основные публикации по теме диссертации

#### Публикации в изданиях из списка ВАК, индексируемые поисковыми системами Web of Science и/или Scopus

- [A1] **Klenov N. V.**, Kuznetsov A.V., Soloviev I.I., Bakurskiy S.V., Denisenko M.V., Satanin A.M. Flux qubit interaction with rapid single-flux quantum logic circuits: Control and readout // *Low Temperature Physics*. — 2017. — Vol. 43, no. 7. — P. 789–798.
- [A2] Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Bakurskiy S.V., Kupriyanov M.Yu, Gudkov A.L., Sidorenko A.S. Beyond Moore’s technologies: operation principles of a superconductor alternative // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. — 2017. — Vol. 8. — P. 2689–2710.
- [A3] Kuznetsov A. V., **Klenov N. V.** An optimization method for the calculation of Hamiltonian matrix elements for Josephson flux qubits // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2017. — Vol. 72, no. 3. — P. 287–293.
- [A4] Bakurskiy S. V., Filippov V. I., Ruzhickiy V. I., **Klenov N. V.**, Soloviev I. I., Kupriyanov M. Y., Golubov A. A. Current-phase relations in SISFS junctions in the vicinity of 0- $\pi$  transition // *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. — 2017. — Vol. 95, no. 9. — P. 094522.
- [A5] Bakurskiy S. V., **Klenov N. V.**, Soloviev I. I., Kupriyanov M. Y., Golubov A. A. Observability of surface currents in p-wave superconductors // *Superconductor Science and Technology*. — 2017. — Vol. 30, no. 4. — P. 044005.
- [A6] Schegolev A.E., **Klenov N.V.**, Soloviev I.I., Tereshonok M.V. Adiabatic superconducting cells for ultra-low-power artificial neural networks // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. — 2016. — Vol. 7. — P. 1397–1403.
- [A7] Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Schegolev A.E., Bakurskiy S.V., Kupriyanov M.Yu. Analytical derivation of dc SQUID response // *Superconductor Science and Technology*. — 2016. — Vol. 29, no. 9. — P. 094005.

- [A8] Adjemov S.S., **Klenov N.V.**, Tereshonok M.V., Chirov D.S. A neural-network method for the synthesis of informative features for the classification of signal sources in cognitive radio systems // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2016. — Vol. 71, no. 2. — P. 174–179.
- [A9] Bakurskiy S.V., **Klenov N.V.**, Soloviev I.I., Kupriyanov M.Yu., Golubov A.A. Superconducting phase domains for memory applications // *Applied Physics Letters*. — 2016. — Vol. 108, no. 4. — P. 042602.
- [A10] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Kolotinskiy N. V. Design issues of HTS bi-SQUID // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2016. — Vol. 26, no. 5. — P. 1601205.
- [A11] Adjemov S.S., **Klenov N.V.**, Tereshonok M.V., Chirov D.S. The use of artificial neural networks for classification of signal sources in cognitive radio systems // *Programming and Computer Software*. — 2016. — Vol. 42, no. 3. — P. 121–128.
- [A12] Adjemov S.S., **Klenov N.V.**, Tereshonok M.V., Chirov D.S. Methods for the automatic recognition of digital modulation of signals in cognitive radio systems // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2015. — Vol. 70, no. 6. — P. 448–456.
- [A13] **Klenov N.V.**, Ruzhickiy V. I., Soloviev I. I. Switching between the stable states of a long Josephson  $\phi$ -junction // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2015. — Vol. 70, no. 5. — P. 404–410.
- [A14] Bakurskiy S.V., Kupriyanov M.Yu., Baranov A.A., Golubov A.A., **Klenov N.V.**, Soloviev I.I. Proximity effect in multilayer structures with alternating ferromagnetic and normal layers // *JETP Letters*. — 2015. — Vol. 102, no. 9. — P. 586–593.
- [A15] **Klenov N.V.**, Kuznetsov A.V., Soloviev I.I., Bakurskiy S.V., Tikhonova O.V. Magnetic reversal dynamics of a quantum system on a picosecond timescale // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. — 2015. — Vol. 6. — P. 1946–1956
- [A16] Porokhov N.V., Kalabukhov A.S., Chukharkin M.L., Maresov A.G., Khrykin D.A., **Klenov N.V.**, Snigirev O.V. The physical basis of the fabrication of the third generation of high-temperature superconducting wires on quartz substrates // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2015. — Vol. 70, no. 2. — P. 134–139.
- [A17] **Klenov N.V.**, Soloviev I.I., Shchegolev A.E., Pankratov A.L. Ballistic detection of weak signals in active Josephson media // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2015. — Vol. 70, no. 1. — P. 35–41.
- [A18] Bakurskiy S.V., Golubov A.A., **Klenov N.V.**, Kupriyanov M.Yu., Soloviev I.I. Josephson effect in SIFS tunnel junctions with domain walls in the weak link region // *JETP Letters*. — 2015. — Vol. 101, no. 11. — P. 765–771.
- [A19] Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Bakurskiy S.V., Kupriyanov M.Yu., Golubov A.A. Critical current of SF–NFS Josephson junctions // *JETP Letters*. — 2015. — Vol. 101, no. 4. — P. 240–246.
- [A20] Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Pankratov A.L., Revin L.S., Il'ichev E., Kuzmin L.S. Soliton scattering as a measurement tool for weak signals // *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. — 2015. — Vol. 92. — P. 014516.

- [A21] Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Bakurskiy S.V., Bol'ginov V.V., Ryazanov V.V., Kupriyanov M.Yu., Golubov A.A. Josephson magnetic rotary valve // *Applied Physics Letters*. — 2014. — Vol. 105, no. 24. — P. 242601.
- [A22] Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Bakurskiy S.V., Pankratov A.L., Il'ichev E., Kuzmin L.S. Symmetrical Josephson vortex interferometer as an advanced ballistic single-shot detector // *Applied Physics Letters*. — 2014. — Vol. 105. — P. 202602.
- [A23] Bakurskiy S.V., Gudkov A.L., **Klenov N.V.**, Kupriyanov M.Yu., Kuznetsov A.V., Soloviev I.I. Progress in the area of new energy efficient basic elements for superconducting electronics // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2014. — Vol. 69, no. 4. — P. 275–286.
- [A24] Bakurskiy S.V., **Klenov N.V.**, Soloviev I.I., Kupriyanov M.Yu., Golubov A.A. Theory of supercurrent transport in SISFS Josephson junctions // *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. — 2013. — Vol. 88, no. 14. — P. 144519.
- [A25] Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Pankratov A.L., Il'ichev E., Kuzmin L.S. Effect of Cherenkov radiation on the jitter of solitons in the driven underdamped Frenkel-Kontorova model // *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. — 2013. — Vol. 87, no. 6. — P. 060901.
- [A26] Soloviev I.I., Kornev V.K., Sharafiev A.V., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Approaches to the creation of an active electrically small superconductive antenna // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. — 2013. — Vol. 7, no. 4. — P. 667–670.
- [A27] Bakurskiy S.V., **Klenov N.V.**, Soloviev I.I., Bol'ginov V.V., Ryazanov V.V., Vernik I.V., Mukhanov O.A., Kupriyanov M.Yu., Golubov A.A. Theoretical model of superconducting spintronic SISFS devices // *Applied Physics Letters*. — 2013. — Vol. 102. — P. 192603.
- [A28] Kornev V.K., Soloviev I.I., Sharafiev A.V., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Active electrically small antenna based on superconducting quantum array // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2013. — Vol. 23, no. 3. — P. 1800405.
- [A29] Bakurskiy S.V., **Klenov N.V.**, Karminskaya T.Yu., Kupriyanov M.Yu., Golubov A. A. Josephson phi-junctions based on structures with complex normal/ferromagnet bilayer // *Superconductor Science and Technology*. — 2013. — Vol. 26, no. 1. — P. 015005.
- [A30] Golikova T.E., Hubler F., Beckmann D., **Klenov N.V.**, Bakurskiy S.V., Kupriyanov M.Yu., Batov I.E., Ryazanov V.V. Critical current in planar SNS Josephson junctions // *JETP Letters*. — 2013. — Vol. 96, no. 10. — P. 668–673.
- [A31] **Klenov N.V.**, Kornev V.K., Sharafiev A.V., Bakurskiy S.V. Description of the evolution of the state of "Josephson atoms" in the context of the informational interpretation of quantum mechanics // *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. — 2012. — Vol. 6, no. 3. — P. 524–529.
- [A32] Soloviev I.I., Kornev V.K., Sharafiev A.V., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Bi-SQUID arrays and parallel SQIF structures for active electrically small antennas // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. — 2012. — Vol. 6, no. 4. — P. 591–597.

- [A33] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Sharafiev A.V., Mukhanov O.A. Array designs for active electrically small superconductive antennas // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. — 2012. — Vol. 479. — P. 119–122.
- [A34] Bakurskiy S.V., **Klenov N.V.**, Karminskaya T.Yu., Kupriyanov M.Yu., Kornev V.K. Current-phase relation in Josephson junctions with complex ferromagnetic/normal metal interlayers // *Solid State Phenomena*. — 2012. — Vol. 190. — P. 401–404.
- [A35] **Klenov N.V.**, Sharafiev A.V., Bakurskiy S.V., Kornev V.K. Informational description of the flux qubit evolution // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — P. 864–866.
- [A36] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Sharafiev A.V., Mukhanov O.A. Linear bi-SQUID arrays for electrically small antennas // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — P. 713–716.
- [A37] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Design and experimental evaluation of SQIF arrays with linear voltage response // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — P. 394–398.
- [A38] Rumyantseva T.S., Pugach N.G., **Klenov N.V.** Current–phase relation in SFS Josephson junctions in the presence of s-d scattering // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2011. — Vol. 66, no. 1. — P. 28–32.
- [A39] Soloviev I.I., Kornev V.K., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Superconducting Josephson structures with high linearity of transformation of magnetic signal into voltage // *Physics of the Solid State*. — 2010. — Vol. 52, no. 11. — P. 2252–2258.
- [A40] **Klenov N.V.**, Pugach N.G., Sharafiev A.V., Bakurskiy S.V., Kornev V.K. Josephson junctions with nonsinusoidal current-phase relations based on heterostructures with a ferromagnetic spacer and their applications // *Physics of the Solid State*. — 2010. — Vol. 52, no. 11. — P. 2246–2251.
- [A41] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Progress in high-linearity multi-element Josephson structures // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. — 2010. — Vol. 470, no. 19. — P. 886–889.
- [A42] **Klenov N.V.**, Kornev V.K., Sharafiev A.V., Bakurskiy S.V., Pugach N.G. Superconductor-ferromagnet-superconductor junctions in flux and phase qubits // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2010. — Vol. 234. — P. 042017.
- [A43] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Dc SQUID array with nonlinear inductance // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2010. — Vol. 234. — P. 042034.
- [A44] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Bi-SQUID: a novel linearization method for dc SQUID voltage response // *Superconductor Science and Technology*. — 2009. — Vol. 22, no. 11. — P. 114011.
- [A45] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Filippov T.V., Engseth H., Mukhanov O.A. Performance advantages and design issues of SQIFs for microwave applications // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2009. — Vol. 19, no. 3. — P. 916–919.

- [A46] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. High linearity SQIF-like Josephson-junction structures // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2009. — Vol. 19, no. 3. — P. 741–744.
- [A47] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Differential parallel-serial SQIF structures providing high linearity response // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2008. — Vol. 97. — P. 012011.
- [A48] **Klenov N.V.**, Kornev V.K., Vedyayev A.V., Ryzhanova N.V., Pugach N.G., Rumyantseva T.S. Examination of logic operations with silent phase qubit // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2008. — Vol. 97. — P. 012037.
- [A49] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. High linearity Josephson-junction array structures // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. — 2008. — Vol. 468, no. 7-10. — P. 813–816.
- [A50] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. How to build up the high linearity SQIF structures // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2008. — Vol. 97. — P. 0120110.
- [A51] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Synthesis of high-linearity array structures // *Superconductor Science and Technology*. — 2007. — Vol. 20, no. 11. — P. S362–S366.
- [A52] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Development of SQIF-based output broad band amplifier // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2007. — Vol. 17, no. 2. — P. 569–572.
- [A53] **Klenov N. V.**, Kornev V. K., Pedersen N. F. The unharmonic dc SQUID energy level splitting // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2006. — Vol. 43. — P. 1409–1412.
- [A54] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Splitting and broadening techniques for SFQ-pulse driver based on SQIF // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2006. — Vol. 43. — P. 1191–1194.
- [A55] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. Splitting circuits for a single-flux-quantum-pulse driver based on a superconducting quantum interference filter // *Superconductor Science and Technology*. — 2006. — Vol. 19, no. 5. — P. S390–S393.
- [A56] **Klenov N.V.**, Kornev V.K., Pedersen N.F. The energy level splitting for unharmonic dc-SQUID to be used as phase Q-bit // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. — 2006. — Vol. 435, no. 1. — P. 114–117.
- [A57] Kornev V.K., **Klenov N.V.**, Oboznov V.A., Feofanov A.K., Bol'ginov V.V., Ryazanov V.V., Pedersen N.F. Vortex dynamics in Josephson ladders with pi-junctions // *Superconductor Science and Technology*. — 2004. — Vol. 17, no. 5. — P. S355–S358.
- [A58] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Pedersen N.F., Borisenko I.V., Mozhaev P.B., Ovsyannikov G.A. The 0 and pi contact array model of bicrystal junctions and interferometers // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2003. — Vol. 13, no. 2. — P. 825–828.

### Другие публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

- [A59] Адиабатические сверхпроводящие ячейки для энергоэффективных нейронных сетей / А. Е. Щеголев, **Н. В. Кленов**, И. И. Соловьев, М. В. Терешонок // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). — 2016. — Т. 9.
- [A60] **Кленов, Н.В.** Сверхпроводящие ф-элементы на основе джозефсоновских структур с ферромагнитными слоями / Н. В. Кленов, С. В. Бакурский, В. И. Ружицкий и др. // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). — 2013. — Т. 5.
- [A61] **Кленов Н.В.**, Корнев В.К. Особенности токового транспорта в джозефсоновских гетероструктурах с нормальным и ферромагнитным би-каналом слабой связи // Радиотехника. — 2012. — № 12. — С. 42–48.
- [A62] Корнев В.К., Соловьев И.И., Шарафиев А.В., **Кленов Н.В.** От одно- и двухконтактного СКВИДов к би-СКВИДу // Радиотехника. — 2012. — № 12. — С. 32–41.
- [A63] Кислинский Ю.В., Овсянников Г.А., Константибян К.И., Шадрин А.В., Комиссинский Ф.В., **Кленов Н.В.**, Корнев В.К. Гибридные джозефсоновские контакты с d-волновой симметрией параметра порядка для элементов квантовых вычислительных систем // Радиотехника. — 2009. — №6. — С. 10-15.
- [A64] Корнев В.К., Соловьев И.И., **Кленов Н.В.**, Шадрин А.В., Муханов О.А. Выходной интерфейс для сверхпроводниковых цифровых устройств / В.К.Корнев, И.И.Соловьев, Н.В.Кленов и др.// Радиотехника. — 2009.— № 3.— С.131–141.
- [A65] **Кленов Н. В.**, Корнев В. К. Фазовый кубит на основе двухконтактного СКВИДа с несинусоидальной ток-фазовой характеристикой джозефсоновских переходов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2006. — № 5. — С. 38–43.
- [A66] **Кленов, Н.В.** Нетривиальная ток-фазовая зависимость в джозефсоновских переходах из анизотропных сверхпроводников: механизм и применение / Н. В. Кленов, В. К. Корнев, И. И. Соловьев и др. // Нелинейный мир. — 2005. — Т. 3, № 1-2. — С. 75–91.

### Патенты РФ, а также международные патенты

- [A67] Порохов Н.В., Хрыкин Д.А., **Кленов Н.В.**, Маресов А.Г., Снигирев О.В., Евлашин С.А. Способ получения высокотемпературной сверхпроводящей пленки на кварцевой подложке RU 2629136 от 24.08.2017.
- [A68] Соловьев И.И., Корнев В.К., **Кленов Н.В.**, Колотинский Н.В., Шарафиев А.В. Сверхпроводящая квантовая решетка на основе СКИФ-структур RU 2620760 от 29.05. 2017.
- [A69] Kornev V.K., Soloviev I.I., **Klenov N.V.**, Mukhanov O.A. High linearity superconducting radio frequency magnetic field detector Патент США US 008179133 от 15.05.2012; US 008933695 от 13.01.2015; US 9588191 B1 от 07.03.2017.
- [A70] Куприянов М.Ю., Бакурский С.В., **Кленов Н.В.**, Соловьев И.И. Джозефсоновский фазовый доменный вентиль. Патент РФ RU 2620027 от 22.05.2017.

- [A71] Куприянов М.Ю., Бакурский С.В., **Кленов Н.В.**, Соловьев И.И. Джозефсоновский магнитный поворотный вентиль. Патент РФ RU 2601775 от 10.11.2016.
- [A72] Соловьев И.И., Куприянов М.Ю., Снигирев О.В., **Кленов Н.В.** Флаксонный баллистический детектор. Патент РФ RU 2592735 от 27.07.2016.
- [A73] Куприянов М.Ю., Бакурский С.В., **Кленов Н.В.**, Соловьев И.И. Джозефсоновский 0-пи переключатель. Патент РФ RU 2554614 от 27.06.2015.
- [A74] Куприянов М.Ю., Бакурский С.В., **Кленов Н.В.**, Соловьев И.И., Гудков А.Л., Рязанов В.В. Высокочастотный сверхпроводящий элемент памяти. Патент РФ RU 2554612 от 27.06.2015 г.
- [A75] Соловьев И.И., Корнев В.К., **Кленов Н.В.**, Шарафиев А.В., Калабухов А.С., Чухаркин М.Л., Снигирев О.В. СВЧ-усилитель на основе высокотемпературного СКВИДа с четырьмя джозефсоновскими контактами. Патент РФ RU 2544275 от 20.05.2015.
- [A76] Корнев В.К., Соловьев И.И., **Кленов Н.В.** Сверхпроводящий широкополосный СВЧ усилитель. Патент РФ RU 2353051 от 20.04.2009.

**Избранные публикации в рецензируемых научных изданиях (в том числе –  
индексируемых Российским Индексом Научного Цитирования)**

- [A77] **Кленов Н.В.** Принципы построения сверхпроводниковых искусственных нейросетей // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 1031-1034.
- [A78] **Кленов Н.В.** Системы приема и обработки сигнала на основе макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках // 6-ая Всероссийская конференция «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ-2016). Доклады. Москва, 2016. — С. 5–9.
- [A79] Гудков А., **Кленов Н.**, Соловьев И. Цифровые системы приема и обработки информации на основе сверхпроводниковой электроники // Электроника. Наука. Технологии. Бизнес. — 2014. — Т. 137. — С. 86–93.

Подписано в печать 14.07.2018

Формат А5. Объем 2 п.л.

Тираж 100 экз.

Заказ №