

На правах рукописи



Ионин Александр Сергеевич

**Практическая реализация и экспериментальное  
исследование прототипов сверхпроводящих нейронов**

Специальность 1.3.8 —  
«Физика конденсированного состояния»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Черноголовка — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук

**Научный руководитель:** **Большинов Виталий Валериевич**

кандидат физико-математических наук

**Официальные оппоненты:** **Шукринов Юрий Маджнунович**

доктор физико-математических наук, Международная межправительственная научно-исследовательская организация «Объединённый институт ядерных исследований», ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики

**Пашин Дмитрий Сергеевич**

кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», научный сотрудник Лаборатории теории наноструктур

**Ведущая организация:**

**Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»**

Защита состоится **20 октября 2026 г. в 14 часов 30 минут** на заседании диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), расположенном **по адресу:** 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН и на сайте организации  
[http : //www.issp.ac.ru/main/images/Ionin\\_A.S.\\_Dissertation.pdf](http://www.issp.ac.ru/main/images/Ionin_A.S._Dissertation.pdf)

Автореферат разослан « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 года.

Учёный секретарь диссертационного совета

24.1.136.01 (Д 002.100.02),

доктор физико-математических наук



Гаврилов С. С.

## Общая характеристика работы

### Актуальность

Аппаратные и алгоритмические решения в области нейроморфных вычислений находят всё более широкое применение в различных областях современной науки и техники — от компьютерных систем до биофизики, нейрофизиологии, химии и материаловедения, особенно в задачах, требующих оперативной обработки больших и неоднородных массивов данных [1—13]. В настоящее время аппаратная реализация нейроморфных архитектур базируется преимущественно на классических полупроводниковых технологиях [14—16]. При этом необходимость интеграции нейроморфных вычислительных блоков с криогенными и квантовыми устройствами (в частности, со сверхпроводниковыми кубитными системами) требует функционирования такой электроники непосредственно в криостате при температурах 4 К и ниже [17; 18]. В этих условиях традиционные полупроводниковые решения сталкиваются с рядом фундаментальных и технических ограничений: замерзание носителей заряда, рост порогового напряжения, ухудшение подпороговой крутизны, большая рассеиваемая мощность [19—21]. Переход к туннельным полевым транзисторам не позволяет полностью преодолеть указанные проблемы, что стимулирует поиск альтернативных физических принципов построения вычислительных устройств [22]. Одним из перспективных направлений для реализации подобной архитектуры является использование эффекта Джозефсона в сверхпроводниковых гетероструктурах, на основе которых создаются сверхпроводящие интерферометры [23—25]. Такие элементы позволяют реализовывать как цифровые, так и аналого-нейроморфные вычислительные решения непосредственно на холодных плитах криостата (при температурах 4 К или даже милликельвинового уровня). Более того, они характеризуются временами переключения, существенно меньшими по сравнению с полупроводниковыми аналогами, а применение концепции адиабатических вычислений даёт возможность снизить энергопотребление на порядки, приближая его к фундаментальному термодинамическому пределу  $k_B T \ln 2$  на одну логическую операцию [26].

Основные принципы цифровой сверхпроводниковой электроники были заложены в начале 1990-х годов с развитием быстрой одноквантовой логики (БОК или от англ. RSFQ - Rapid Single Flux Quantum) [27]. Физической основой

кодирования информации в таких устройствах служит эффект квантования магнитного потока в сверхпроводящем кольце, обусловленный однозначностью макроскопической волновой функции. При достаточной индуктивности контура в нём могут существовать метастабильные состояния с различным числом квантов потока (флаксон). Логической операции ставится в соответствие рождение или уничтожение флаксона, что приводит к изменению фазы волновой функции на величину, кратную  $2\pi$ . Согласно нестационарному уравнению Джозефсона, такое изменение сопровождается появлением напряжения на элементе. При этом скорость изменения фазы определяется характеристическим напряжением  $U_c = I_c R_N$ . Диссипация энергии в RSFQ-ячейке (её динамическая часть) определяется произведением тока смещения и напряжения, что ограничивает энергоэффективность значением порядка 1 аДж на переключение. Это примерно на пять порядков меньше, чем у современных CMOS-схем [28; 29]. Однако технологические сложности воспроизводимости устройств и маленькая плотность интеграции логических элементов на чипе — всё это не позволило RSFQ-логике составить конкуренцию полупроводниковым транзисторам.

За прошедшие десятилетия был проделан значительный объём работ по миниатюризации и повышению энергоэффективности быстрой одноквантовой логики. Основные усилия были направлены на минимизацию статической диссипации, связанной с протеканием токов питания. Среди разработанных подходов можно выделить: LR-RSFQ — уменьшение сопротивления резисторов смещения и добавление индуктивностей для распределения токов [30]; LV-RSFQ — снижение напряжения питания и критических токов джозефсоновских переходов [31; 32]; ERSFQ — полная замена резисторов в цепях питания на индуктивности и джозефсоновские переходы [33–36]. Дальнейшее развитие привело к появлению семейств RQL (от англ. Reciprocal Quantum Logic) и AQFP-логики [26; 37; 38]. В этих подходах бит информации кодируется парой положительного и отрицательного квантов магнитного потока, что позволяет исключить резисторы смещения. Ключевым элементом AQFP (от англ. Adiabatic Quantum Flux Parametron) является адиабатический потоковый параметрон, работающий на переменном токе [26; 38] и представляющий собой сверхпроводящую петлю с одним или несколькими джозефсоновскими переходами. Совокупность этих исследований привела к созданию наиболее энергоэффективной на сегодняшний день концепции — адиабатических сверхпроводниковых вычислений [39]. В ней информация представлена направлением магнитного потока в кон-

туре, что позволяет выполнять переключения без перехода джозефсоновского контакта в резистивное состояние и существенно снижает требования к источникам питания.

Адиабатические вычисления, удовлетворяющие требованию физической обратимости (когда в каждый момент времени система находится в квазистационарном состоянии) [40], легли в основу предложенных в работах [41–43] концепций сверхпроводниковых нейроморфных систем. Ключевым элементом таких систем является искусственный нейрон, выполняющий функцию нелинейного преобразования (нормировки) входного сигнала. В работе будут рассмотрены две возможные функции активации: сигмоидальная (для  $\sigma$ -нейрона), необходимая для создания сверхпроводящего персептрона, и гауссоподобная (для G-нейрона) — для реализации так называемых сетей радиальных базисных функций, где требуется передаточная функция, близкая к производной некоторой сигмоидальной зависимости.

Важно отметить, что нейроморфная архитектура подразумевает реализацию не только искусственного нейрона, но и интегрированного сумматора (элемента, складывающего входные сигналы). В роли такого элемента в рамках концепции AQFP может выступать простой сверхпроводящий контур. Также необходима реализация синоптических связей нейронов, в задачи которых входит управление амплитудой сигналов, передаваемых от нейрона к нейрону. Для этих целей может быть использована ячейка гаусс-нейрона, где весовой коэффициент нейронной сети определяется разностью критических токов джозефсоновских переходов [42]. При этом в работе [44] теоретически рассмотрен вопрос об объединении сигма-нейронов в единую нейросеть, использующую постоянные синоптические связи, реализованные через трансформаторы. А в статье [45] рассматривалась возможность использования сигма-нейронов в квантовом режиме, что открывает перспективы синергии двух принципов вычислений.

С учётом вышеперечисленного, практическая реализация и исследование сверхпроводящих интерферометров, реализующих сигмоидальную и гауссоподобную передаточные функции, является перспективным направлением, и данная тема является **актуальной**.

**Целью работы** является практическая реализация и экспериментальное исследование прототипов сверхпроводящих нейронов, реализующих сигмоидальную и гауссоподобную передаточные функции.

**Научную новизну работы** определяют следующие впервые полученные результаты:

- Практически реализованы и экспериментально охарактеризованы прототипы сверхпроводящих нейронов сигмоидального (сигма-нейрон) и гауссоподобного (гаусс-нейрон) типов, выполненные на основе туннельных джозефсоновских переходов Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb.
- Экспериментально обнаружены и систематизированы физические эффекты, не учитывавшиеся в существующих теоретических моделях и влияющие на форму передаточных функций: перекрестные наводки между управляющим и приемным сверхпроводящими контурами, а также влияние начального тока смещения в линии обратной связи приемного контура. Показано, что эти эффекты приводит к искажению характеристик на величину, соизмеримую с выходным сигналом нейронов.
- Разработаны аналитические и численные методы расчета передаточных функций сигма- и гаусс-нейронов, учитывающие полную матрицу взаимных индуктивностей между всеми элементами схемы (включая управляющие и считывающие контуры), что позволяет повысить точность предсказания характеристик на этапе проектирования по сравнению с классическими приближениями независимых элементов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Одноконтактный джозефсоновский интерферометр с индуктивным шунтом демонстрирует периодическую поток-потоктовую передаточную функцию, которая в рамках одного периода аппроксимируется монотонной функцией активации сигмоидального вида.
2. Двухконтактный джозефсоновский интерферометр, шунтированный индуктивностью, демонстрирует периодическую поток-потоктовую передаточную характеристику, форма которой в пределах периода аппроксимируется функцией Гаусса, что позволяет реализовать нейрон с функцией активации, обеспечивающей локальную чувствительность к входному сигналу и подавление отклика при отклонении от рабочей точки.
3. Взаимные индуктивности между элементами сигма- и гаусс-нейронов вносят искажения в передаточные функции, соизмеримые по амплитуде с полезным выходным сигналом.

4. Изменение передаточных функций сверхпроводящих нейронов, обусловленное взаимной индуктивностью составляющих их элементов, а также начальным магнитным потоком в приёмном контуре, учитывается в рамках решения системы линейных уравнений, описывающих стационарное состояние сверхпроводящих интерферометров.

**Практическая ценность** работы связана, в целом, с расширением компонентной базы устройств сверхпроводниковой электроники. В частности, созданы прототипы сверхпроводящих нейронов двух видов, которые демонстрируют принципиальную возможность реализации сложных сверхпроводниковых нейроморфных архитектур. Проведен анализ влияния взаимных индуктивностей элементов конструкции нейронов, начального потока в считывающем контуре, а также вклада асимметрии джозефсоновских переходов в передаточные функции. Разработан и реализован метод численного расчета, позволяющий предсказывать передаточные функции спроектированных нейронов. Данные результаты являются крайне важными с практической точки зрения, поскольку открывают возможности для проектирования перспективных конструкций искусственных нейронов, а также оптимизации их архитектуры.

**Апробация результатов исследования.** Результаты, полученные в рамках работы над диссертацией, представлялись и обсуждались на пяти международных конференциях и выставках.

**Личный вклад автора** является значительным и связан с разработкой конструкции экспериментальных образцов, внедрением метода измерения передаточных функций, проведением экспериментальных исследований, анализом и аппроксимацией экспериментальных кривых.

**Объем и структура диссертации:** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций и библиографии. Общий объем диссертации составляет 118 страниц, включая 51 рисунок; библиография насчитывает 90 наименований.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, приведены сведения об апробации работы, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена литературному обзору, в котором рассмотрены теория сверхпроводящего состояния, эффект Джозефсона в туннельных переходах, интерферометрические структуры на их основе, а также современное состояние исследований в области сверхпроводящих нейтронов.

**Во второй главе** описаны технологические маршруты изготовления многослойных тонкоплёночных структур на основе трёх сверхпроводящих слоёв ниобия, методики численного расчёта индуктивностей, а также экспериментальная установка и методы измерений.

В первом разделе представлена технологическая схема, включающая восемь основных этапов, от формирования трёхслойной заготовки Nb/Al/AlO<sub>x</sub>/Nb методом магнетронного распыления в едином вакуумном цикле до создания верхнего слоя разводки. С использованием фотолитографии и плазмохимического травления сформированы мезы джозефсоновских переходов, сверхпроводящий экран, индуктивные элементы, два слоя изоляции на основе SiO<sub>2</sub>, резисторы из сплава Cu<sub>2</sub>Al и соединительная разводка.

Во втором разделе указаны две специализированные программы, применявшиеся для расчёта матриц индуктивностей. Программа 3D-MLSI [46] использовалась для трёхмерного моделирования структур со сложной топологией (нейтронов и интерферометров) с адаптивной триангуляцией расчётной области. Программа wxLL [47], основанная на методе граничных элементов, применялась для расчёта погонной индуктивности структур с непланарным профилем слоёв, трансляционно-инвариантных вдоль одного направления. Сравнение с литературными данными показывает, что погрешность расчётов в обеих программах не превышает 2% [47; 48].

В третьем разделе изложены принципы экспериментальных методов исследования. Измерения проведены на криогенном комплексе на основе криостата с жидким гелием-4 в диапазоне температур 2,8–10 К. Для подавления внешних магнитных полей реализована трёхуровневая система экранирования, включающая сверхпроводящий ниобиевый экран, криопермалловый экран и внешний пермалловый экран, что обеспечивает остаточное поле  $\sim 10^{-3}$  Гс. Монтаж образцов осуществлялся ультразвуковой микросваркой алюминиевой проволокой. Описаны следующие виды измерений: вольт-амперные характеристики джозефсоновских переходов (четырёхточечная схема, источники тока Keithley 224, нановольтметры Keithley 182, RC-фильтры с частотой среза 30 Гц); зависимости критического тока от магнитного поля (метод от-

сечки напряжения, поле создаётся сверхпроводящим соленоидом из NbTi); вольт-потокковые характеристики двухконтактных интерферометров, а также поток-потокковые передаточные функции нейронов, измеренные по разработанному алгоритму.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования двух типов адиабатических сверхпроводящих нейронов:  $\sigma$ -нейрона (с сигмоидальной передаточной функцией) и  $G$ -нейрона (с передаточной функцией, аппроксимируемой гауссовым распределением).

В первом разделе рассмотрена конструкция  $\sigma$ -нейрона (рис. 1а), представляющего собой Т-образный джозефсоновский интерферометр с тремя плечами: джозефсоновским ( $L$ ), индуктивным ( $L_a$ ) и выходным ( $L_{out}$ ). На основе модели полосы над сверхпроводящим экраном выполнены аналитические оценки индуктивностей:  $L = 2,7$  пГн,  $L_a = 21,3$  пГн,  $L_{out} = 5,7$  пГн. Взаимные индуктивности с контрольной линией и считывающим СКВИДом составили  $M_{in} = 1,6$  пГн и  $M_{out} = 1,8$  пГн соответственно. Из теоретического рассмотрения  $\sigma$ -нейрона определены необходимые критические токи джозефсоновских переходов для получения искомой передаточной функции. В частности, из условия  $L_a = L + L_J$ , обеспечивающего сигмоидальную форму передаточной функции, установлено оптимальное значение критического тока  $I_c \approx 17,6$  мкА. Выполнены численные расчёты ожидаемых передаточных функций в диапазоне критических токов 20–70 мкА, характерном для используемой технологии. Аналогичный анализ проведён для  $G$ -нейрона (рис. 1б), отличающегося симметричной структурой приёмного контура с двумя джозефсоновскими переходами. Для него оценки индуктивностей дали следующие значения:  $L = 4,3$  пГн,  $L_{out} = 7,2$  пГн,  $M_{in} = 2,4$  пГн,  $M_{out} = 2,7$  пГн. Установлено, что нетривиальное решение уравнений состояния  $G$ -нейрона существует при  $I_c > 22$  мкА, а требование безгистерезисного режима ограничивает критический ток значением  $I_c < 40$  мкА.

Во втором разделе описан метод измерения малых выходных магнитных потоков ( $\lesssim 0,3\Phi_0$ ). Для этого на одном кристалле с нейронами размещены интегрированные двухконтактные СКВИД-магнитометры. Разработан итерационный метод компенсации с обратной связью: изменение напряжения на СКВИДе, вызванное потоком от нейрона, компенсируется током в линии обратной связи  $I_{fb}$ , линейно связанным с выходным потоком нейрона:  $\Phi_{out} = I_{fb} \cdot (L_{out} L_{sq} / M_{out})$ . При этом достигнута точность стабилизации магнитного по-

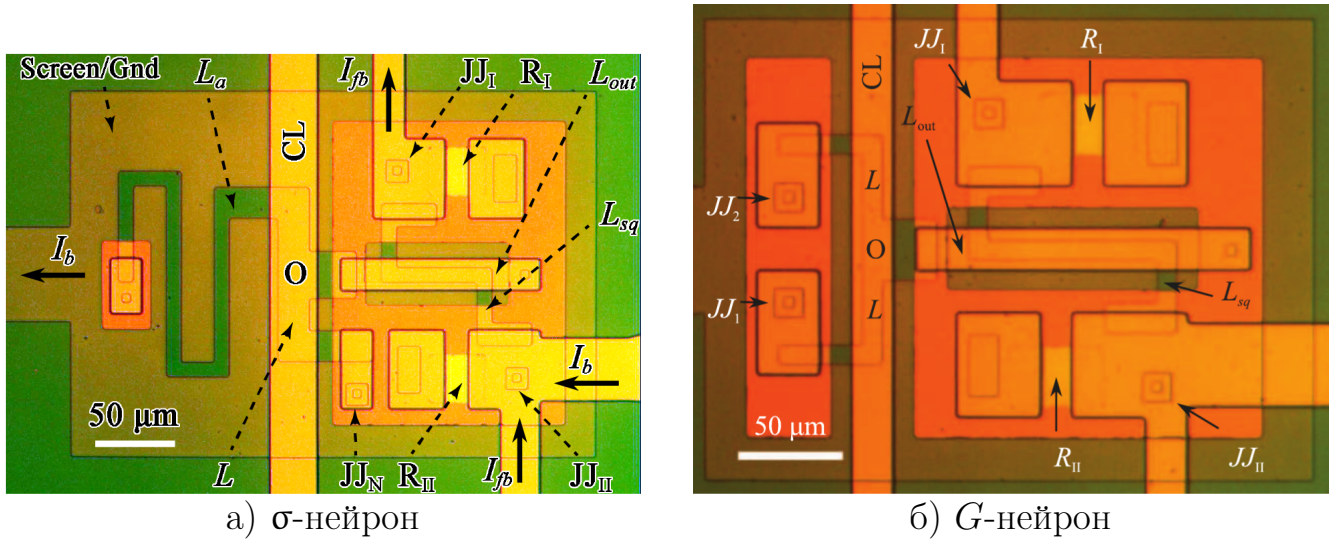


Рисунок 1 — Микрофотографии изготовленных образцов.

тока на уровне  $\sim 0,02\Phi_0$ . Проведена характеристика измерительных СКВИДов. На вольт-амперных характеристиках (рис. 2а) обнаружена особенность в виде «полки» при напряжении 47 мкВ для  $\sigma$ -нейрона и 37 мкВ для  $G$ -нейрона, обусловленная  $LC$ -резонансом в плече интерферометра ( $f_{\text{рез}} = 22,7$  ГГц и 19,3 ГГц соответственно). Этот эффект приводит к «срезу» модуляции вольт-потокоточной характеристики, ограничивая рабочий диапазон по току обратной связи. Проведено сравнение экспериментально полученных вольт-потокоточных характеристик и зависимостей критического тока от потока с численно рассчитанными для двухконтактных интерферометров (рис. 2б). На основе расчётов определены индуктивности плеч СКВИДов, которые согласуются с аналитическими оценками и данными, полученными из анализа особенностей вольт-амперных характеристик. Продемонстрировано характерное для асимметричного СКВИДа смещение и наклон характеристик относительно потока.

В третьем разделе представлены экспериментальные передаточные функции  $\sigma$ -нейрона. Зависимость  $I_{\text{fb}}(I_{\text{CL}})$  (рис. 3а) носит квазипериодический характер с периодом  $T_{\text{CL}} = 2,18$  мА. Отдельный период хорошо аппроксимируется суммой линейной и сигмоидальной составляющих:

$$I_{\text{fb}} = \alpha I_{\text{CL}} + \frac{\beta}{1 + \exp(-(I_{\text{CL}} - \delta)/\gamma)}, \quad (1)$$

с параметрами:  $\alpha = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\beta = 13$  мкА,  $\gamma = 35$  мкА,  $\delta = 2,12$  мА. Обнаружено наличие линейного наклона, отсутствующего в теоретических моделях изолированного нейрона. Сравнение коэффициентов параметрической модели, найденных из аппроксимации экспериментальной кривой с учётом обратного

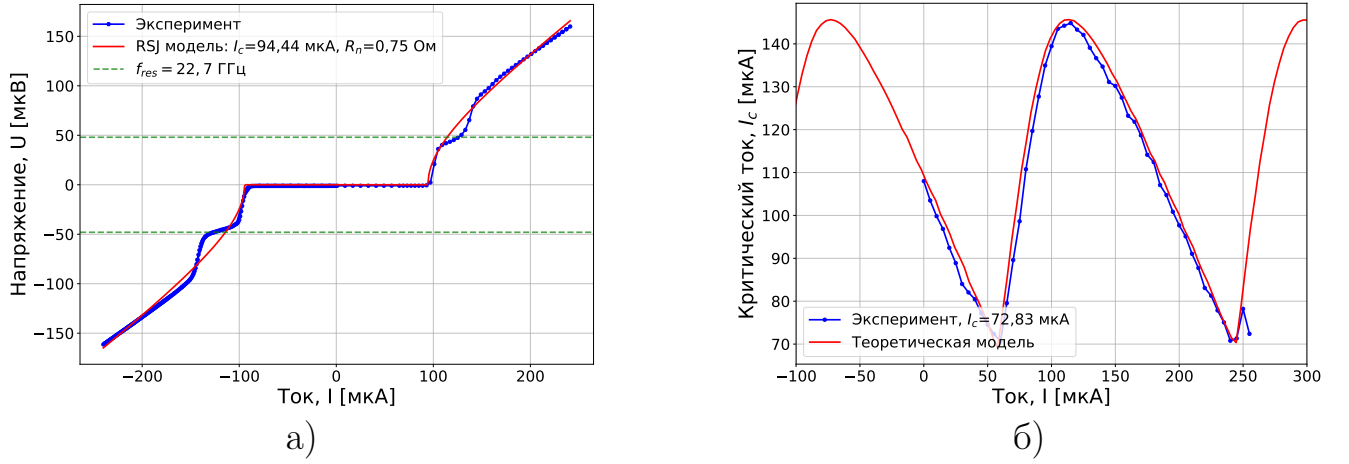


Рисунок 2 — Характеристики измерительного СКВИДа (на примере  $\sigma$ -нейрона,  $L = 11,13$  пГн): (а) вольт-амперная характеристика; (б) зависимость критического тока от магнитного потока, максимальное значение  $\max[I_c] = 72$  мкА.

влияния измерительного СКВИДа, с аналитическими расчётами показало: для нелинейных слагаемых расхождение не превышает 5%, что указывает на корректность оценок индуктивностей; в то же время коэффициент при линейном слагаемом оказался завышенным в три раза. Это позволило предположить, что источником линейного слагаемого служит паразитная взаимная индуктивность между контрольной линией и измерительным СКВИДом ( $M_{sq} \approx 0,07$  пГн). Исследованы два образца  $\sigma$ -нейрона одинаковой геометрии, но с разными критическими токами. При  $I_c = 40$  мкА (нормированная полная индуктивность  $l_t = 0,88 < 1$ ) передаточная характеристика безгистерезисна и близка к сигмоиде; при  $I_c = 65$  мкА ( $l_t = 1,43 > 1$ ) наблюдается ярко выраженный гистерезис (рис. 4а). Температурные измерения для образца  $\sigma$ -нейрона с критическим током  $I_c = 65$  мкА в диапазоне 4,2–7,0 К (рис. 4б) показали эволюцию формы от гистерезисной к линейной через сигмоидальную, что согласуется с аналитическими предсказаниями.

Для  $G$ -нейрона экспериментальные зависимости  $I_{fb}(I_{CL})$  (рис. 5а) представляют собой серию куполообразных пиков амплитудой  $\sim 10$  мкА по компенсирующему току и с периодом  $T_{CL} = 1,4$  мА по току в контрольной линии. Нормированная форма пика (рис. 5б) занимает промежуточное положение между гауссовыми распределениями с дисперсиями  $\sigma = 0,16$  (вершина) и  $\sigma = 0,1$  (крылья); наилучшее соответствие достигается при  $\sigma = 0,12$ . Нелинейные особенности наблюдаются на фоне линейной составляющей с наклоном  $M_{sq}I_{CL}$ , где  $M_{sq} = 0,12$  пГн. Сравнение с базовой теоретической моделью выявило расхождения: экспериментальный пик шире и имеет более плавный переход,

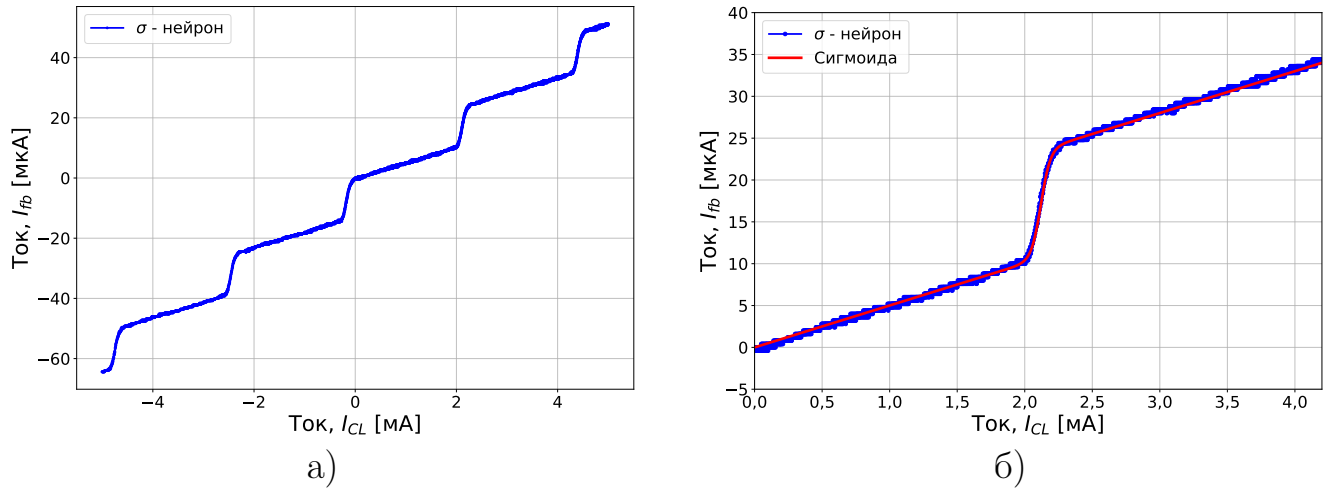


Рисунок 3 — Передаточные характеристики  $\sigma$ -нейрона: (а) полная зависимость  $I_{fb}(I_{CL})$ ; (б) отдельный период с сигмоидальной аппроксимацией (красная кривая).

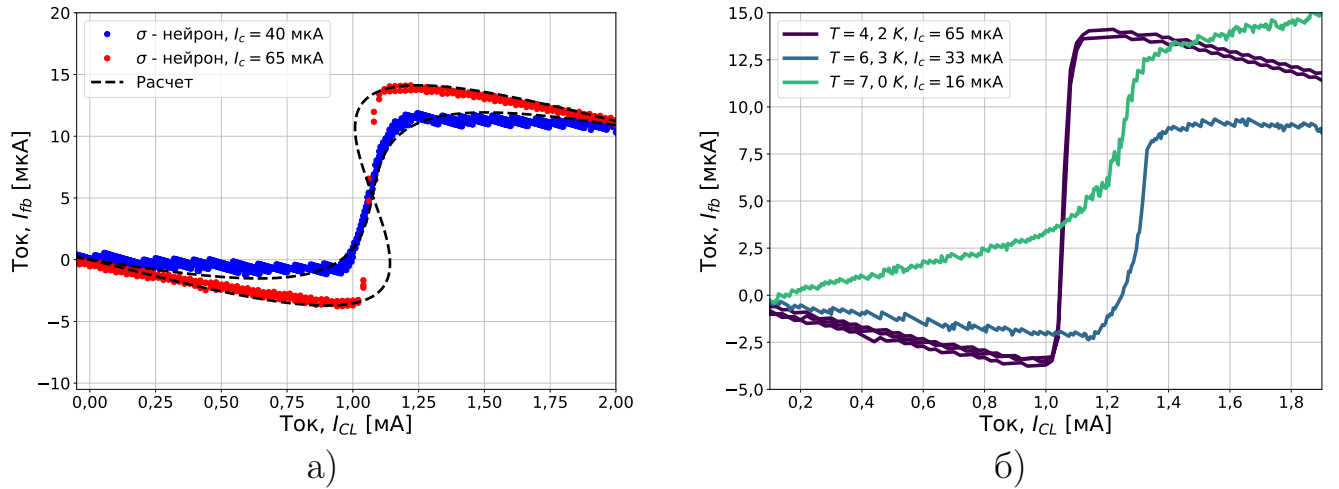


Рисунок 4 — (а) Передаточные характеристики двух  $\sigma$ -нейронов после вычитания линейного вклада: безгистерезисный режим (синяя кривая,  $I_c = 40$  мкА) и гистерезисный (красная кривая,  $I_c = 65$  мкА). (б) Эволюция передаточной функции с температурой: 4,2 К, 6,3 К, 7,0 К.

чем предсказываемый теорией (рис. 6а). Существенное улучшение аппроксимации достигнуто при учёте начального магнитного потока в измерительном интерферометре (рис. 6б); однако на первом периоде сохраняется асимметрия, указывающая на необходимость дальнейшего уточнения модели. Температурные исследования в диапазоне 2,8–5,9 К (рис. 7) показали, что период по току  $I_{CL}$  слабо зависит от температуры из-за малости отношения  $\lambda(0)/d \approx 0,27$ , а амплитуда купола монотонно уменьшается с ростом  $T$  вследствие спада  $I_c(T)$ . Ширина купола остаётся практически постоянной, так как определяется отношением нормированных индуктивностей ( $l = L/L_J$ )  $l_{out}/l$ , не зависящим от температуры. Это позволяет тонко настраивать дисперсию  $\sigma$  гауссова распределения без изменения периода.

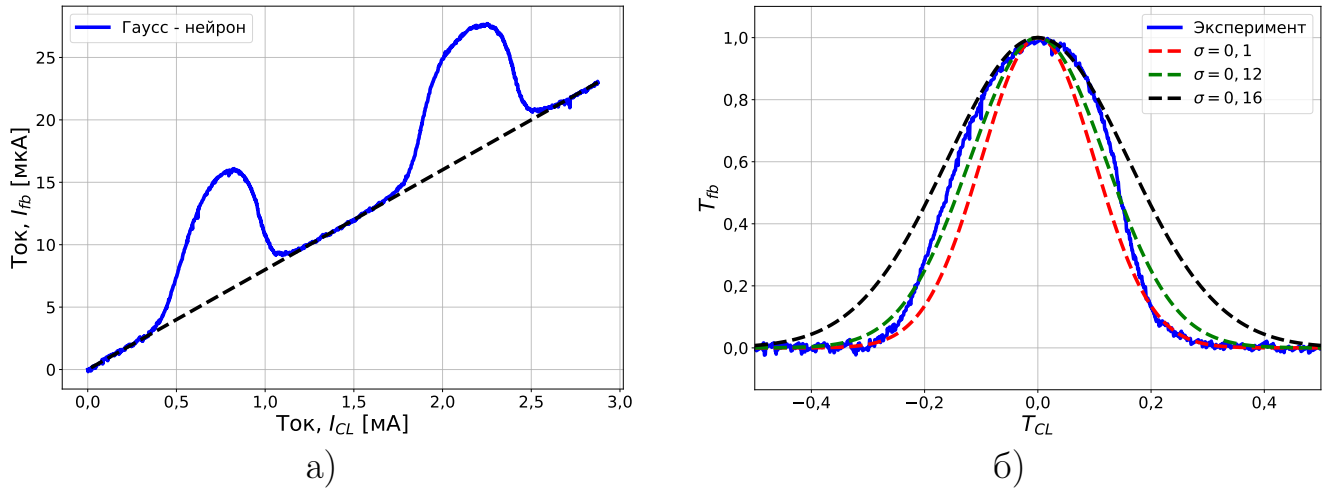


Рисунок 5 — Передаточные характеристики  $G$ -нейрона: (а) полная зависимость  $I_{fb}(I_{CL})$ ; (б) отдельный период с аппроксимацией гауссовыми распределениями ( $\sigma = 0, 1, 0, 12, 0, 16$ ).

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность реализации адиабатических сверхпроводящих нейронов с передаточными функциями сигмоидального и гауссова типа. Установлены критерии безгистерезисной работы: для  $\sigma$ -нейрона  $l_t < 1$ , для  $G$ -нейрона  $I_c < 40$  мкА. Выявлен эффект паразитной взаимной индуктивности между контрольной линией и измерительным СКВИДом ( $M_{sq} \approx 0,07\text{--}0,12$  пГн), приводящий к появлению линейного слагаемого в передаточных функциях нейронов. Продемонстрирована возможность перестройки формы передаточных функций изменением температуры эксперимента.

**В четвёртой главе** представлен анализ передаточных функций сверхпроводящих нейронов, включающий выявление механизмов паразитных связей,

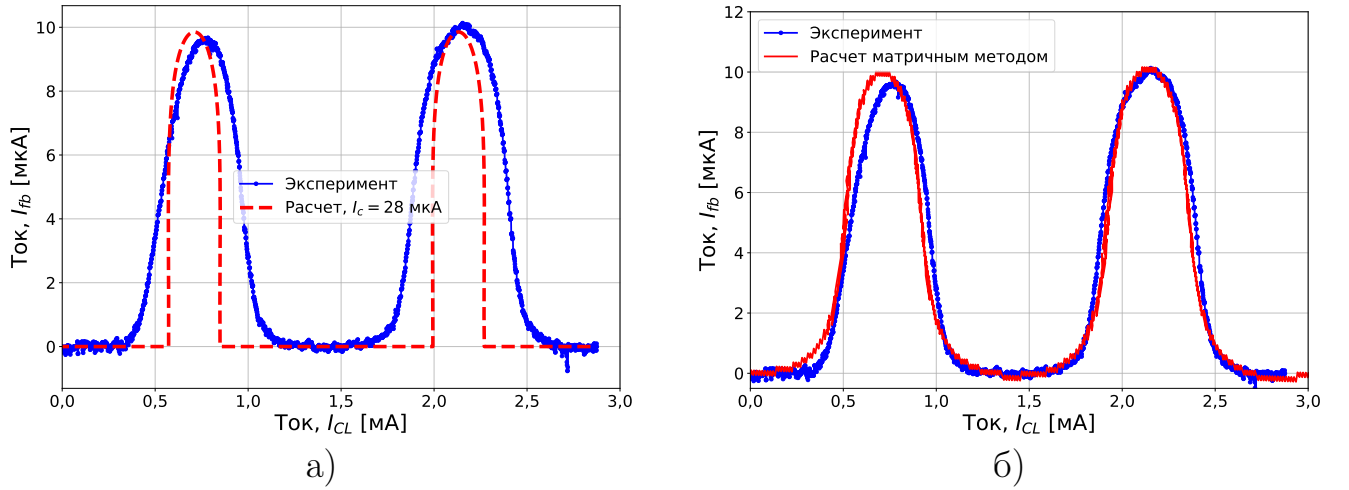


Рисунок 6 — Аппроксимация передаточной характеристики  $G$ -нейрона: (а) базовое уравнение состояния; (б) расширенное уравнение с учётом начального потока в измерительном интерферометре ( $\Phi_{sq} = L_{sq} I_{sq}^0$ ,  $I_{sq}^0 = 50$  мкА).

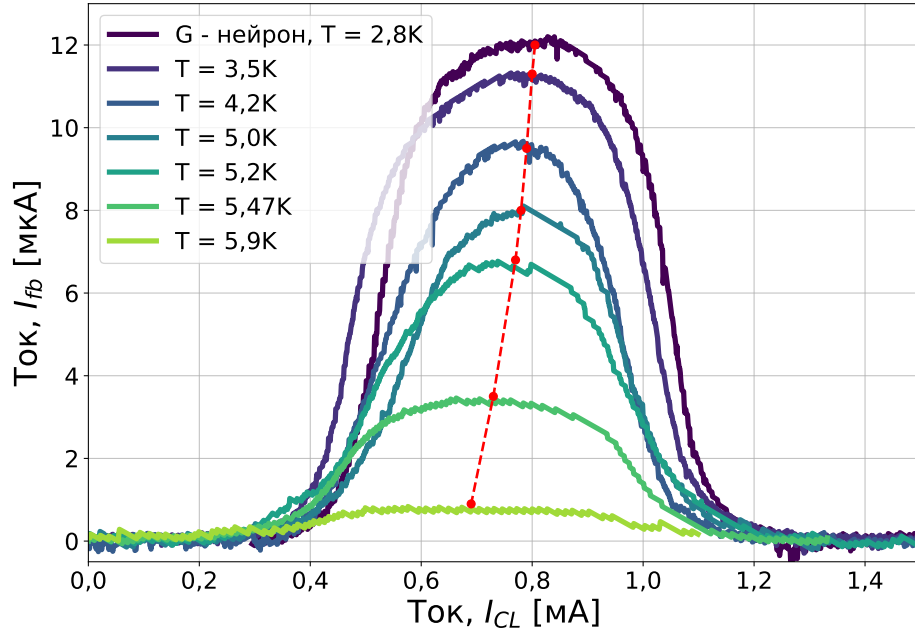


Рисунок 7 — Температурная эволюция первого периода передаточной функции  $G$ -нейрона после вычитания линейного наклона.

верификацию численных методов расчёта индуктивностей, расширение аналитического и численного подходов к моделированию передаточных функций, а также исследование влияния различных параметров на форму характеристик.

В первом разделе рассмотрен механизм линейной передачи входного сигнала в измерительную цепь, существование которого ранее предполагалось на основе анализа экспериментальных передаточных функций нейронов. Показано, что причиной возникновения этой «паразитной» взаимной индуктивности  $M_{sq}$  являются циркулирующие экранирующие токи в сверхпроводящем экране.

Используя принцип замыкания, получено аналитическое выражение для  $M_{sq}$ :

$$\Phi_m = \left( L_{\square} \sum \frac{w_{sq}}{2w_{scr}} N \right) I_{CL}, \quad (2)$$

которое для исследованных образцов даёт значения 0,12 пГн ( $\sigma$ -нейрон) и 0,15 пГн ( $G$ -нейрон), что хорошо согласуется с экспериментальными оценками (0,07–0,12 пГн).

Для верификации численных методов расчёта индуктивностей проведено исследование тестовых двухконтактных интерферометров, изготовленных по тому же технологическому процессу, что и нейронные ячейки. Сравнение экспериментальных и расчётных значений (программа 3D-MLSI) показало совпадение с точностью 3–5% для собственных индуктивностей и взаимных индуктивностей при наличии геометрического перекрытия элементов. В случае отсутствия геометрического перекрытия экспериментально измеренная взаимная индуктивность составила  $M = 0,12$  пГн, расчётная — 0,18 пГн, что подтверждает возможность оценки малых паразитных связей на уровне  $\sim 0,1$  пГн.

С использованием программ 3D-MLSI и wxLL (последняя позволяет учитывать реальный топологический профиль многослойной структуры) рассчитаны полные матрицы индуктивностей для  $\sigma$ - и  $G$ -нейронов (размерностью  $5 \times 5$ ). Анализ матриц показывает, что большинство недиагональных элементов на один-два порядка меньше основных. Однако выявлены значимые взаимные индуктивности, такие как связь между выходным и индуктивным плечами ( $L_{out} \leftrightarrow L_a$ ), а также между двумя джозефсоновскими плечами  $G$ -нейрона ( $L \leftrightarrow L$ ), величины которых сопоставимы с  $M_{in}$ .

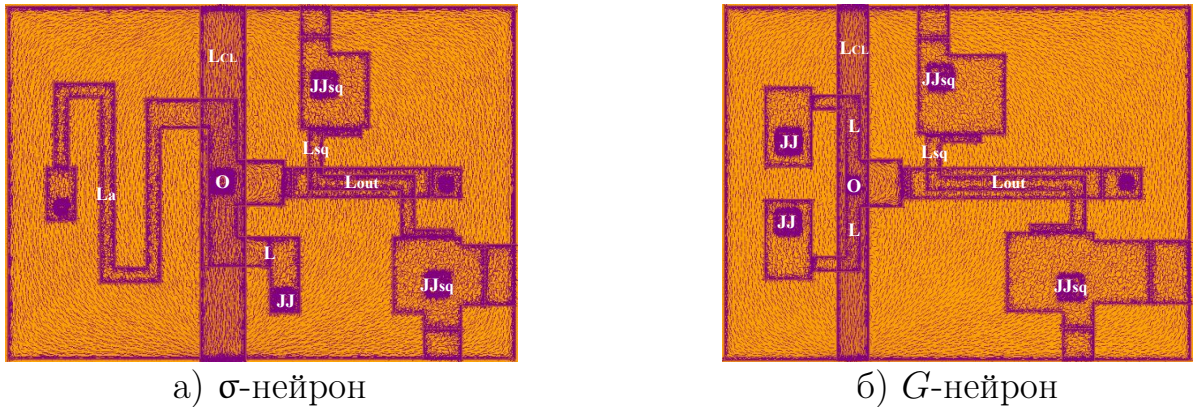


Рисунок 8 — Распределение плотности тока в сверхпроводящем экране, рассчитанное в 3D-MLSI.

Во втором разделе расширен подход к расчёту передаточных функций нейронов с учётом полной матрицы индуктивностей, влияния измерительного

СКВИДа и начальных потоков в контурах. Для  $\sigma$ -нейрона получена однопараметрическая форма передаточной функции:

$$i_{cl} = \frac{t_{cl}}{2\pi}(\varphi' + \alpha \sin \varphi' + \delta_{cl}), \quad i_{fb} = \frac{t_{fb}}{2\pi}(\varphi' + \sigma \sin \varphi') + \delta_{fb}, \quad (3)$$

где коэффициенты  $t_{cl} = -2\pi A_{11}^{-1}$ ,  $t_{fb} = -2\pi A_{51}^{-1}$ ,  $\alpha = -A_{15}^{-1}/A_{11}^{-1}$ ,  $\sigma = -A_{55}^{-1}/A_{51}^{-1}$  выражаются через элементы обратной матрицы системы, учитывающей все взаимные индуктивности, а  $\delta_{cl}$ ,  $\delta_{fb}$  определяют сдвиг передаточной функции.

Сравнение расчётных и экспериментальных передаточных функций для двух  $\sigma$ -нейронов с различными критическими токами (35 мкА и 55 мкА, рис. 9) показало хорошее количественное соответствие. Установлено, что начальный ток в измерительном СКВИДе ( $i_{fb}^0$ ) приводит к равномерному сдвигу передаточной функции по оси входного сигнала, не изменяя её формы (рис. 10). Анализ влияния недиагональных элементов матрицы индуктивностей показал, что для реализованной топологии их вклад несущественен; однако при уменьшении масштаба ячейки на порядок передаточная функция претерпевает качественные изменения, включая модификацию критерия безгистерезисности.

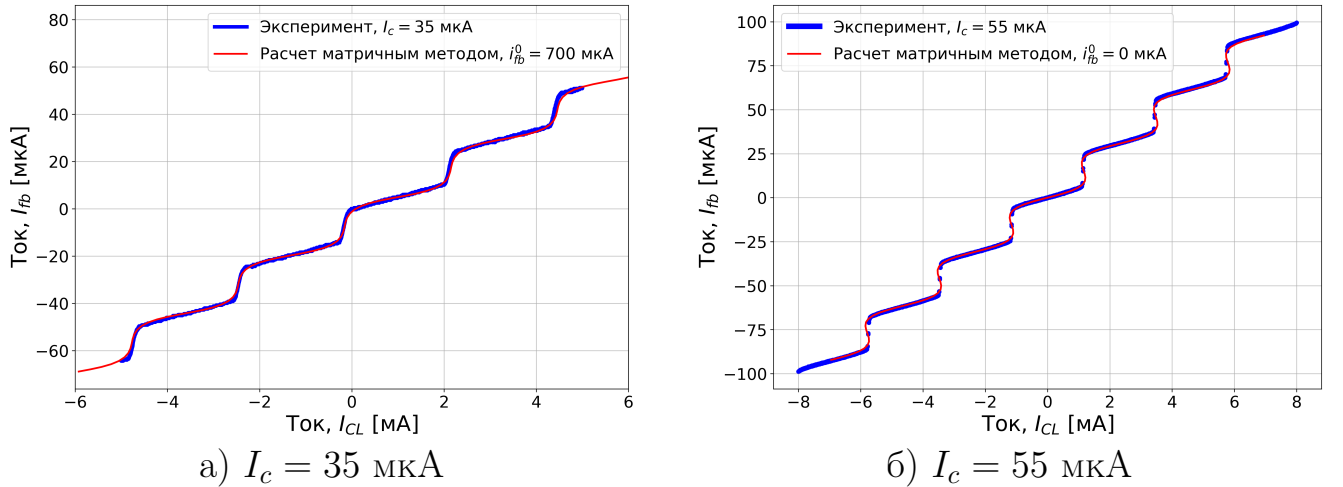


Рисунок 9 — Сравнение расчётных и экспериментальных передаточных функций  $\sigma$ -нейрона.

В третьем разделе для  $G$ -нейрона, содержащего два джозефсоновских перехода, разработан численный метод. На основе предложенного алгоритма создана программа в среде **Python**, позволяющая численно рассчитывать передаточные функции нейронов по заданной матрице индуктивностей. Расчёт передаточной функции  $G$ -нейрона с использованием полной матрицы индуктивностей и критическим током  $I_c = 28$  мкА, а также при начальном потоке

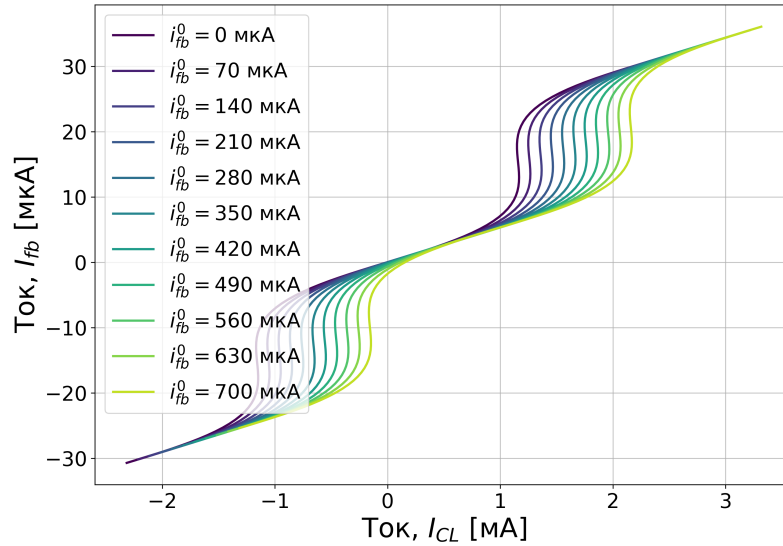


Рисунок 10 — Влияние начального тока в измерительном СКВИДе на передаточную функцию  $\sigma$ -нейрона.

в СКВИДе, соответствующем току 80 мкА (что согласуется с условиями эксперимента), показал хорошее согласие с экспериментом (рис. 11).

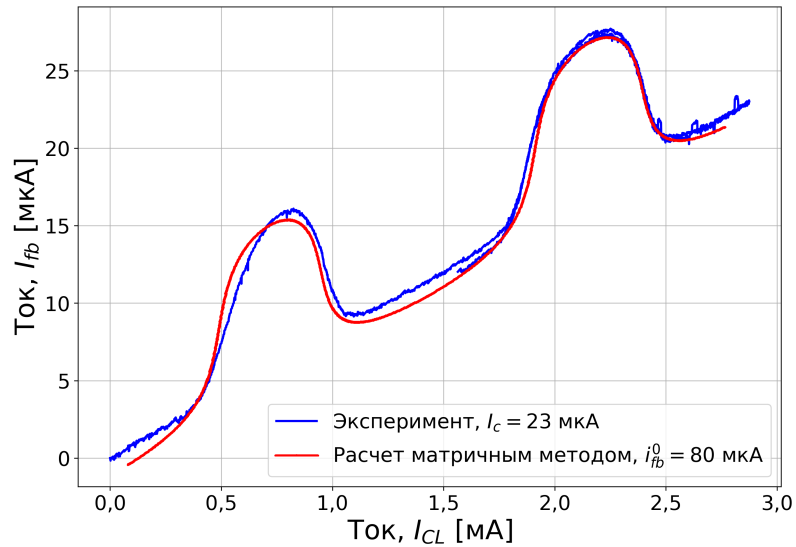


Рисунок 11 — Сравнение расчётной и экспериментальной передаточных функций  $G$ -нейрона.

Исследовано влияние начального тока в измерительном СКВИДе на передаточную функцию  $G$ -нейрона (рис. 12). В отличие от  $\sigma$ -нейрона, где это влияние сводится к сдвигу, для  $G$ -нейрона наблюдается более сложное поведение: при малых  $i_{fb}^0$  ( $\pm 10$ – $20$  мкА) происходит «переворот купола» — изменение знака нелинейного отклика; при больших  $i_{fb}^0$  ( $\pm 200$  мкА) возникает деформация передаточной функции с уменьшением амплитуды и уширением пиков. На

расчётных кривых обнаружены замкнутые решения в плоскости токов  $[i_{fb}, i_{CL}]$ , которые экспериментально не наблюдались.

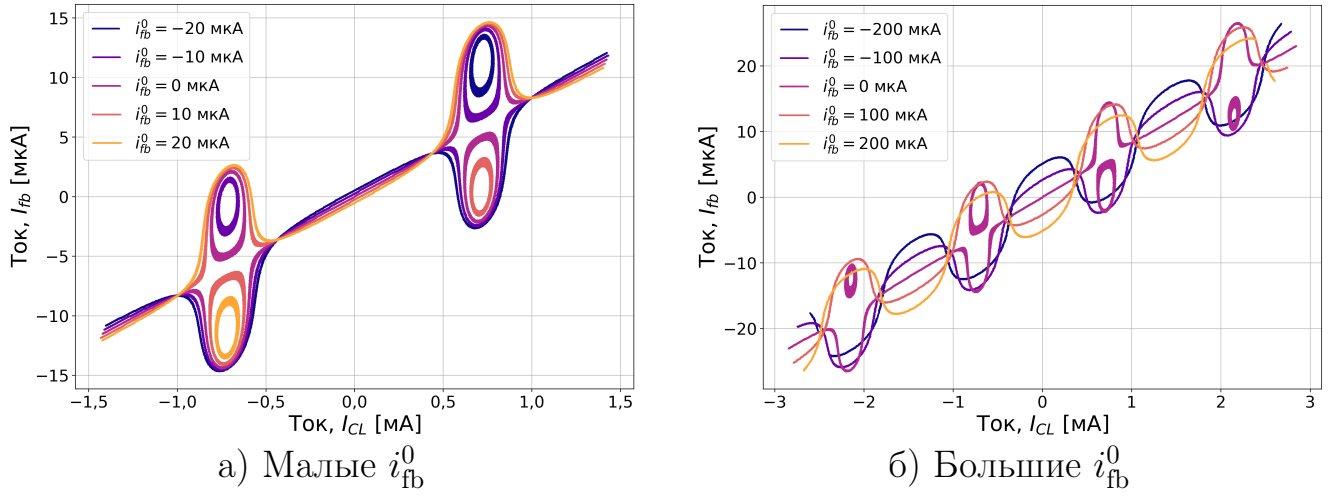


Рисунок 12 — Влияние начального тока в измерительном СКВИДе на передаточную функцию  $G$ -нейрона.

Экспериментально подтверждены оба режима (рис. 13): «переворот купола» реализован на образце с несимметричными критическими токами переходов (21 и 18 мкА) при  $i_{fb}^0 = -27$  мкА; режим прямоугольного цуга — на образце с  $I_c = 31$  мкА при  $i_{fb}^0 = 250$  мкА.

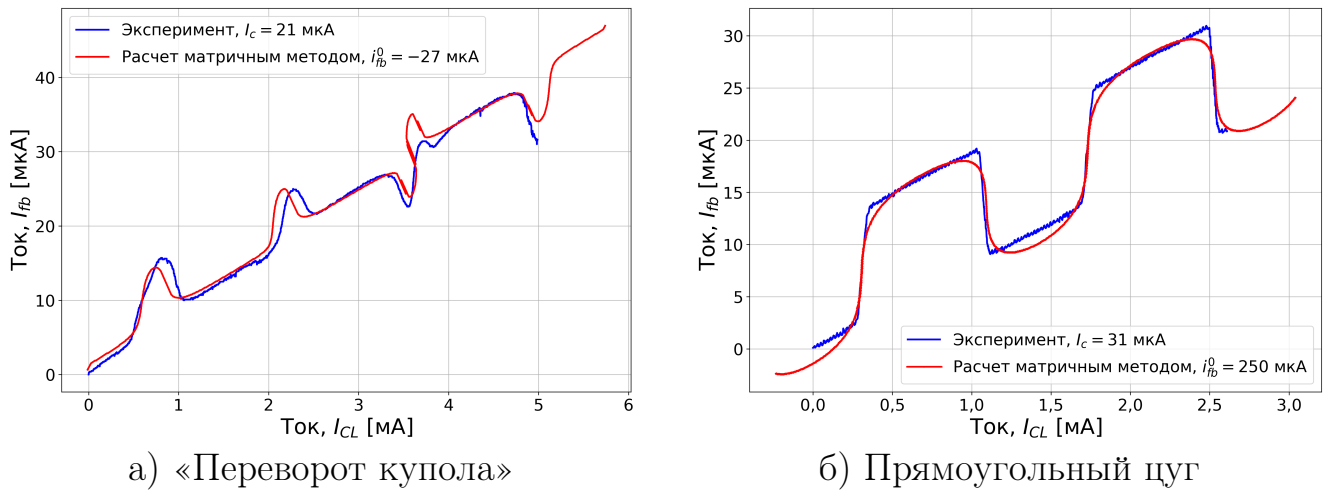


Рисунок 13 — Экспериментальная демонстрация различных режимов работы  $G$ -нейрона.

Продemonстрировано влияние асимметрии критических токов джозефсоновских переходов в плечах  $G$ -нейрона. При различии  $I_{c1} \neq I_{c2}$  происходит деформация передаточной функции: локализованное и основное решения теряют структурную обособленность, формируя сложную составную характеристику;

при этом деформация распространяется на соседние периоды, нарушая периодичность.

Таким образом, в главе выявлен и количественно описан механизм «паразитной» взаимной индуктивности между контрольной линией и измерительным СКВИДом, обусловленный экранирующими токами. Проведена верификация программ 3D-MLSI и wxLL на тестовых структурах, подтверждена точность расчёта индуктивностей на уровне 3–5%. Рассчитаны полные матрицы индуктивностей для  $\sigma$ - и  $G$ -нейронов, выявлены значимые недиагональные элементы. Описан метод расчёта передаточных функций, учитывающий все взаимные индуктивности и начальные потоки в измерительном контуре. Получено количественное соответствие расчётных и экспериментальных передаточных функций для обоих типов нейронов. Исследовано влияние начального тока в СКВИДе и асимметрии критических токов на форму характеристик  $\sigma$ - и  $G$ -нейрона.

**В заключение** сформулированы основные результаты проделанной работы:

- Продемонстрирована возможность реализации сверхпроводящих нейронов в виде многослойных тонкоплёночных структур, расположенных над толстым сверхпроводящим экраном.
- Для сигма-нейрона измерена передаточная функция, представляющая собой сумму сигмоидальной и линейной компонент.
- Для гаусс-нейрона экспериментально измерена передаточная функция, также состоящая из двух компонент: линейной и периодической куполообразной.

Анализ экспериментальных данных выявил ограниченность исходных упрощённых моделей, не учитывающих паразитные связи между элементами конструкции. Для преодоления этого ограничения в работе выполнены следующие исследования:

- Установлено, что линейная компонента, существенно влияющая на характеристику, обусловлена эффектом прямой передачи входного магнитного потока в измерительную цепь через кольцевые сверхпроводящие токи в экране.
- Показано, что форма нелинейной компоненты для гаусс-нейрона может быть описана в рамках существующей теоретической модели, но с учётом постоянного «потока смещения», вызванного начальным током в

измерительном интерферометре ( $I_{fb}^0$ ), и влиянием его на состояние самого нейрона.

- С помощью программных методов расчёта индуктивностей показано наличие ненулевых паразитных связей, демонстрирующих, что сверхпроводящий экран не обеспечивает полной магнитной развязки элементов.
- Расширены модели стационарных состояний сверхпроводящих нейронов, что позволяет учесть взаимную индуктивную связь их составных элементов, а также взаимное влияние состояния измерительного интерферометра на состояние нейрона.

Полученные результаты и разработанные модели создают основу для последующего проектирования более сложных схем, минимизирующих паразитные связи и реализующих требуемые нелинейные передаточные характеристики.

Кроме того, в процессе подготовки диссертационной работы был выполнен ряд исследований, непосредственно не связанных с вышеизложенными результатами, но представляющих самостоятельную ценность для дальнейших работ в области криогенной электроники.

- Проведена серия экспериментов по отработке методики изготовления гетероструктур сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник. В ходе исследования получены зависимости критической плотности туннельных переходов от времени и давления окисления барьерного слоя  $AlO_x$ .
- Выполнена серия экспериментов по изучению влияния резистивного шунтирующего контура на динамику джозефсоновского перехода и форму его вольт-амперной характеристики.
- Спроектирована и изготовлена криогенная вакуумная вставка, позволяющая проводить частотные измерения.
- Разработаны программы для характеристики измеренных зависимостей шунтированных и нешунтированных джозефсоновских контактов, а также для анализа двухконтактных сверхпроводящих интерферометров.
- Проведены поисковые исследования динамики джозефсоновских контактов: точечных переходов, шунтированных резонансным контуром, и распределённых переходов, длина которых превышает джозефсоновскую длину  $\lambda_J$ .

Полученные результаты и накопленный опыт создают основу для дальнейших исследований и разработки компонент криогенной электроники.

**Публикации автора по теме диссертации.** В основе диссертационной работы лежит 4 статьи, опубликованных в российских научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

1. Экспериментальное исследование прототипа сверхпроводящего сигма-нейрона для адиабатических нейронных сетей / А.С. Ионин, Н.С. Шуравин, Л.Н. Карелина, А.Н. Россоленко, М.С. Сидельников, С.В. Егоров, В.И. Чичков, М.В. Чичков, М.В. Жданова, А.Е. Щеголев, В.В. Больгинов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2023. — Т. 164. — С. 1008.
2. Экспериментальное исследование передаточной функции прототипа сверхпроводящего гаусс-нейрона / А.С. Ионин, Л.Н. Карелина, Н.С. Шуравин, М.С. Сидельников, Ф.А. Разоренов, С.В. Егоров, В.В. Больгинов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2023. — Т. 118, № 10. — С. 761—768.
3. Обобщенная модель сверхпроводникового сигма-нейрона / Н.С. Шуравин, Л.Н. Карелина, А.С. Ионин, Ф.А. Разоренов, М.С. Сидельников, С.В. Егоров, В.В. Больгинов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2024. — Т. 120, № 11. — С. 863—870.
4. Численное моделирование конструкции сверхпроводящего сигма-нейрона / А.С. Ионин, С.В. Егоров, М.С. Сидельников, Л.Н. Карелина, Н.С. Шуравин, М.М. Хапаев, В.В. Больгинов // Физика твердого тела. — 2024. — Т. 66, № 7. — С. 1019—1025.

## Список литературы

1. *Bartolozzi, C.* Embodied neuromorphic intelligence / C. Bartolozzi, G. Indiveri, E. Donati // *Nature communications*. — 2022. — Vol. 13, no. 1. — P. 1024.
2. Opportunities for neuromorphic computing algorithms and applications / C. D. Schuman, S. R. Kulkarni, M. Parsa, [et al.] // *Nature Computational Science*. — 2022. — Vol. 2, no. 1. — P. 10—19.
3. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing / B. J. Shastri, A. N. Tait, T. Ferreira de Lima, [et al.] // *Nature Photonics*. — 2021. — Vol. 15, no. 2. — P. 102—114.
4. Chemformer: a pre-trained transformer for computational chemistry / R. Irwin, S. Dimitriadis, J. He, E. J. Bjerrum // *Machine Learning: Science and Technology*. — 2022. — Vol. 3, no. 1. — P. 015022.
5. Nanoparticle synthesis assisted by machine learning / H. Tao, T. Wu, M. Aldeghi, [et al.] // *Nature reviews materials*. — 2021. — Vol. 6, no. 8. — P. 701—716.
6. High energy physics calorimeter detector simulation using generative adversarial networks with domain related constraints / G. R. Khattak, S. Vallecorsa, F. Carminati, G. M. Khan // *IEEE Access*. — 2021. — Vol. 9. — P. 108899—108911.
7. Advancing neuromorphic computing with loihi: A survey of results and outlook / M. Davies, A. Wild, G. Orchard, [et al.] // *Proceedings of the IEEE*. — 2021. — Vol. 109, no. 5. — P. 911—934.
8. Physics for neuromorphic computing / D. Marković, A. Mizrahi, D. Querlioz, J. Grollier // *Nature Reviews Physics*. — 2020. — Vol. 2, no. 9. — P. 499—510.
9. Organic electronics for neuromorphic computing / Y. van De Burgt, A. Melianas, S. T. Keene, [et al.] // *Nature electronics*. — 2018. — Vol. 1, no. 7. — P. 386—397.
10. Neuromorphic computing using non-volatile memory / G. W. Burr, R. M. Shelby, A. Sebastian, [et al.] // *Advances in Physics: X*. — 2017. — Vol. 2, no. 1. — P. 89—124.

11. *Furber, S.* Large-scale neuromorphic computing systems / S. Furber // Journal of neural engineering. — 2016. — Vol. 13, no. 5. — P. 051001.
12. Backpropagation for energy-efficient neuromorphic computing / S. K. Esser, R. Appuswamy, P. Merolla, [et al.] // Advances in neural information processing systems. — 2015. — Vol. 28.
13. Reconstruction and simulation of neocortical microcircuitry / H. Markram, E. Muller, S. Ramaswamy, [et al.] // Cell. — 2015. — Vol. 163, no. 2. — P. 456—492.
14. *Indiveri, G.* Modeling selective attention using a neuromorphic analog VLSI device / G. Indiveri // Neural computation. — 2000. — Vol. 12, no. 12. — P. 2857—2880.
15. *Indiveri, G.* A neuromorphic VLSI device for implementing 2D selective attention systems / G. Indiveri // IEEE Transactions on Neural Networks. — 2001. — Vol. 12, no. 6. — P. 1455—1463.
16. Analog VLSI implementation of a neural network with competitive learning / F. Pelayo, A. Prieto, B. Pino, P. Martin-Smith // IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications. — 1990. — P. 197—205.
17. Cryogenic electronics for high performance computing applications: A comprehensive review / F. Bashir, H. Abbas, A. Nisar, [et al.] // Materials Today Physics. — 2025. — P. 101960.
18. Cryogenic III-V and Nb electronics integrated on silicon for large-scale quantum computing platforms / J. Jeong, S. K. Kim, Y.-J. Suh, [et al.] // Nature Communications. — 2024. — Vol. 15, no. 1. — P. 10809.
19. Ultra-low-power cryogenic complementary metal oxide semiconductor technology / Q.-T. Zhao, Y. Han, H.-C. Han, [et al.] // Nature Reviews Electrical Engineering. — 2025. — Vol. 2, no. 4. — P. 277—290.
20. Performance and hot-carrier effects of small CRYO-CMOS devices / M. Aoki, S. Hanamura, T. Masuhara, K. Yano // IEEE transactions on electron devices. — 1987. — Vol. 34, no. 1. — P. 8—18.
21. CMOS reliability issues for emerging cryogenic Lunar electronics applications / T. Chen, C. Zhu, L. Najafizadeh, [et al.] // Solid-state electronics. — 2006. — Vol. 50, no. 6. — P. 959—963.

22. Investigation of analog/RF behaviour of asymmetrical gate tunnel FET at cryogenic temperatures / S. Misra, C. Bose, R. Ghosh, P. Saha // *Silicon*. — 2024. — Vol. 16, no. 11. — P. 4753—4762.
23. Unconventional compute methods and future challenges for superconducting digital computing / G. Michelogiannakis, A. Butko, P. Gonzalez-Guerrero, [et al.] // *Frontiers in Materials*. — 2025. — Vol. 12. — P. 1618615.
24. *Mitrovic, A.* Josephson junctions with ferromagnetic barriers for digital superconducting electronics: A review / A. Mitrovic, M. Bocko // *Physical Review Applied*. — 2025. — Vol. 23, no. 6. — P. 067001.
25. Analog-to-digital converter based on voltage-controlled superconducting devices / M. M. Islam, C. A. Good, D. Ferrer, [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2026. — Vol. 128, no. 14.
26. *Takeuchi, N.* Energy efficiency of adiabatic superconductor logic / N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa // *Superconductor Science and Technology*. — 2014. — Vol. 28, no. 1. — P. 015003.
27. *Likharev, K. K.* RSFQ logic/memory family: A new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems / K. K. Likharev, V. K. Semenov // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2002. — Vol. 1, no. 1. — P. 3—28.
28. *Wang, C.-C.* 67.5-fJ per access 1-kb SRAM using 40-nm logic CMOS process / C.-C. Wang, C.-P. Kuo // 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). — IEEE. 2021. — P. 1—4.
29. *Mishra, A. K.* A partially static high frequency 18T hybrid topological flip-flop design for low power application / A. K. Mishra, U. Chopra, D. Vaithiyanathan // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. — 2021. — Vol. 69, no. 3. — P. 1592—1596.
30. *Yoshikawa, N.* Reduction of power consumption of RSFQ circuits by inductance-load biasing / N. Yoshikawa, Y. Kato // *Superconductor Science and Technology*. — 1999. — Vol. 12, no. 11. — P. 918.
31. 18-GHz, 4.0-aJ/bit operation of ultra-low-energy rapid single-flux-quantum shift registers / M. Tanaka, M. Ito, A. Kitayama, [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 2012. — Vol. 51, 5R. — P. 053102.

32. Low-energy consumption RSFQ circuits driven by low voltages / M. Tanaka, A. Kitayama, T. Koketsu, [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2013. — Vol. 23, no. 3. — P. 1701104—1701104.
33. Implementation of energy efficient single flux quantum digital circuits with sub-aJ/bit operation / M. H. Volkmann, A. Sahu, C. J. Fourie, O. A. Mukhanov // Superconductor Science and Technology. — 2012. — Vol. 26, no. 1. — P. 015002.
34. *Mukhanov, O. A.* Energy-efficient single flux quantum technology / O. A. Mukhanov // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — P. 760—769.
35. *Kirichenko, D.* Zero static power dissipation biasing of RSFQ circuits / D. Kirichenko, S. Sarwana, A. Kirichenko // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — P. 776—779.
36. ERSFQ 8-bit parallel adders as a process benchmark / A. F. Kirichenko, I. V. Vernik, J. A. Vivalda, [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2014. — Vol. 25, no. 3. — P. 1—5.
37. Ultra-low-power superconductor logic / Q. P. Herr, A. Y. Herr, O. T. Oberg, A. G. Ioannidis // Journal of Applied Physics. — 2011. — Vol. 109, no. 10.
38. An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device / N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa // Superconductor Science and Technology. — 2013. — Vol. 26, no. 3. — P. 035010.
39. *Takeuchi, N.* Measurement of 10 zJ energy dissipation of adiabatic quantum-flux-parametron logic using a superconducting resonator / N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa // Applied Physics Letters. — 2013. — Vol. 102, no. 5.
40.  $\pi$ -контакты в ячейках адиабатической сверхпроводниковой логики / И. Соловьев, Г. Хисматуллин, Н. Кленов, А. Щеголев // Радиотехника и электроника. — 2022. — Т. 67, № 12. — С. 1232—1244.
41. Adiabatic superconducting cells for ultra-low-power artificial neural networks / A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, M. V. Tereshonok // Beilstein Journal of Nanotechnology. — 2016. — Vol. 7, no. 1. — P. 1397—1403.

42. Adiabatic superconducting artificial neural network: Basic cells / I. I. Soloviev, A. E. Schegolev, N. V. Klenov, [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2018. — Vol. 124, no. 15.
43. Передаточные характеристики ячеек адиабатической сверхпроводниковой логики / А. Е. Щеголев, Н. В. Кленов, И. И. Соловьев, М. В. Терешонок // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 946—949.
44. Optimisation Challenge for a Superconducting Adiabatic Neural Network That Implements XOR and OR Boolean Functions / D. Pashin, M. Bastrakova, D. Rybin, [et al.] // Nanomaterials. — 2024. — Vol. 14, no. 10. — P. 854.
45. A superconducting adiabatic neuron in a quantum regime / M. V. Bastrakova, D. S. Pashin, D. A. Rybin, [et al.] // Beilstein Journal of Nanotechnology. — 2022. — Vol. 13, no. 1. — P. 653—665.
46. 3D-MLSI: Software package for inductance calculation in multilayer superconducting integrated circuits / M. M. Khapaev, A. Kidiyarova-Shevchenko, P. Magnelind, M. Kupriyanov // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2002. — Vol. 11, no. 1. — P. 1090—1093.
47. *Khapaev, M. J.* Extraction of inductances of a multi-superconductor transmission line / M. J. Khapaev // Superconductor Science and Technology. — 1996. — Vol. 9, no. 9. — P. 729.
48. Experimentally verified inductance extraction and parameter study for superconductive integrated circuit wires crossing ground plane holes / C. J. Fourie, O. Wetzstein, J. Kunert, [et al.] // Superconductor Science and Technology. — 2012. — Vol. 26, no. 1. — P. 015016.