

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО
РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»
(МТУСИ)**



**MINISTRY OF DIGITAL
DEVELOPMENT,
COMMUNICATIONS
AND MASS MEDIA OF
THE RUSSIAN FEDERATION**

**MOSCOW TECHNICAL
UNIVERSITY
OF COMMUNICATIONS
AND INFORMATICS
(MTUCI)**

ул. Авиамоторная, д. 8а, Москва, 111024,
www.mtuci.ru; мтуси.рф; e-mail: kanc@mtuci.ru
Телефон (495) 957-77-31; факс (495) 957-77-36

ОГРН 1027700117191; ИНН/КПП 7722000820/772201001; ОКПО 01179952;
ОКВЭД 85.22, 46.19, 58.19, 61.10, 68.32, 72.19, 85.21, 85.23, 85.42.9, 71.20, 33.13, 26.60 ; ОКТМО 45388000

_____ 20 _____ № _____

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Ордена Трудового Красного
Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования

«Московский технический университет
связи и информатики», Председатель НТС
МТУСИ, кандидат технических наук,

доцент МТУСИ
С.Д. Ерохин



_____ 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики» на
диссертационную работу

Ионина Александра Сергеевича

«Практическая реализация и экспериментальное исследование прототипов
сверхпроводящих нейронов», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 –
«Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа А.С. Ионина посвящена актуальной проблеме разработки и экспериментального исследования сверхпроводниковых нейроморфных вычислительных элементов на основе джозефсоновских интерферометров. Актуальность темы обусловлена необходимостью создания высокоэнергoeffективной и быстродействующей элементной базы для гибридных квантово-классических вычислительных систем, работающих при криогенных температурах. В условиях, когда традиционные полупроводниковые технологии достигают своих фундаментальных ограничений, представленный в работе подход к реализации адиабатических сверхпроводящих нейронов открывает новые перспективы для создания нейроморфных процессоров, интегрируемых с кубитными системами. Практическая значимость исследования подтверждается созданием действующих прототипов нейронов с сигмоидальной и гауссоподобной функциями активации, а также разработкой усовершенствованных методов их проектирования и анализа, что напрямую способствует развитию компонентной базы сверхпроводниковой электроники.

Диссертационная работа А.С. Ионина состоит из введения, четырёх содержательных глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 118 страниц, включая 51 рисунок. Список литературы содержит 90 наименований. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 научных работах, опубликованных в рецензируемых журналах.

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

Первая глава содержит развёрнутый литературный обзор, в котором последовательно изложены микроскопическая и феноменологическая теории сверхпроводимости, физические основы эффекта Джозефсона в туннельных контактах, резистивная (RSJ) и резистивно-ёмкостная (RCSJ) модели, а также описаны принципы работы одно- и двухконтактных сверхпроводящих интерферометров. Особое внимание уделено концепции адиабатических сверхпроводниковых нейронов, что составляет теоретическую основу выполненных в диссертации экспериментальных исследований.

Вторая глава детально описывает технологический маршрут изготовления многослойных тонкоплёночных структур на основе Nb/AlO_x/Nb, включающий восемь основных этапов. Подробно изложены экспериментальные методики низкотемпературного исследования образцов и численные подходы к расчёту индуктивностей (программы 3D-MLSI и wxLL), что свидетельствует о высоком уровне методической проработки диссертационного исследования.

Третья глава посвящена конструкциям экспериментальных ячеек сигма- и гаусс-нейронов, а также методике измерения их передаточных функций с помощью сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИД-магнитометра). В этой главе представлен и проанализирован основной массив экспериментальных данных, демонстрирующий полученные сигмоидальные и гауссоподобные передаточные характеристики. Автором показано, что экспериментальные кривые содержат, помимо искомой нелинейной компоненты, паразитную линейную составляющую. Выявлены эффекты, ранее не учитывавшиеся в теоретических моделях, в частности, влияние начального тока смещения в линии обратной связи измерительного интерферометра. Продemonстрировано изменение формы передаточных функций при вариации температуры, что позволяет осуществлять тонкую настройку характеристик нейронов.

В четвёртой главе раскрыт физический механизм возникновения паразитной линейной связи между контрольной линией и измерительным СКВИДом через экранирующие токи в сверхпроводящем экране. С помощью численного моделирования рассчитаны полные матрицы индуктивностей нейронных ячеек и показано, что недиагональные элементы матрицы могут вносить существенные искажения в передаточные функции. На основе матричного подхода разработаны усовершенствованные аналитические и численные методы расчёта, которые с высокой точностью описывают экспериментальные передаточные функции сигма- и гаусс-нейронов, включая эффекты «переворота купола» и трансформации передаточной функции в прямоугольный цуг.

В заключении сформулированы основные итоги работы и выводы.

В диссертационной работе получены новые интересные научные результаты. Из них можно отметить следующие:

- Впервые практически реализованы и экспериментально охарактеризованы прототипы сверхпроводящих нейронов сигмоидального и гауссоподобного типов, выполненные на основе туннельных джозефсоновских переходов $Nb/AlO_x/Nb$, что подтверждает принципиальную возможность реализации сложных сверхпроводниковых нейроморфных архитектур. Совместимость использованной в работе технологии изготовления с маршрутом фабрикации других сверхпроводящих цифровых устройств и интерферометрических сенсоров определяет высокий потенциал внедрения исследуемых нейроморфных ячеек в существующие схемотехнические решения.

- Экспериментально обнаружены и систематизированы физические эффекты, не учитывавшиеся в существующих теоретических моделях: перекрёстные наводки между управляющим и приёмным сверхпроводящими контурами, а также влияние начального тока смещения в линии обратной связи приёмного контура. Показано, что эти эффекты приводят к искажению характеристик на величину, соизмеримую с выходным сигналом нейронов.

- Разработаны аналитические и численные методы расчёта передаточных функций сигма- и гаусс-нейронов, учитывающие полную матрицу взаимных индуктивностей между всеми элементами схемы. Показана возможность прогнозирования и модификации формы передаточной функции, включая трансформацию гауссова купола в прямоугольный пик и переворот его полярности, что открывает новые возможности для создания управляемых нейроморфных элементов и логических вентилях.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать ряд замечаний и пожеланий:

1. Неочевидность практического использования полученных активационных функций. В работе продемонстрировано, что форма передаточных функций сигма- и гаусс-нейронов сильно зависит от паразитных связей и начальных условий (тока смещения в измерительном СКВИДе). При этом для сигма-нейрона показано, что чисто сигмоидальная форма достигается лишь в узком диапазоне параметров, а для гаусс-нейрона форма купола искажается асимметрией и может трансформироваться в прямоугольный пик. Однако в диссертации отсутствует анализ того, **как эти неидеальности повлияют на работу многослойной нейронной сети,**

построенной на таких элементах. Не рассмотрены вопросы кумулятивного дрейфа характеристик при каскадировании нейронов, влияние разброса критических токов в пределах одного чипа, а также возможность (или необходимость) калибровки каждого нейрона в составе сети. Без такого анализа остаётся неясным, насколько предлагаемые элементы пригодны для практического построения масштабируемых нейроморфных систем, а не только для демонстрации единичных прототипов.

2. Недостаточная обоснованность выбора гауссовой функции активации и проблемы её реализации. Автор утверждает, что гауссоподобная передаточная функция необходима для сетей радиальных базисных функций (RBF-сетей). Однако в диссертации не показано, что экспериментально реализованная кривая действительно близка к гауссовой в смысле, достаточном для практического применения RBF-сетей – например, не приведены количественные метрики (среднеквадратичное отклонение, коэффициент детерминации) для оценки степени соответствия. Более того, как следует из результатов работы, форма «купола» существенно асимметрична и зависит от начального тока в измерительном СКВИДе. Автор упоминает возможность «тонкой настройки» формы за счёт температуры, но не обсуждает, как такая подстройка может быть реализована в реальном вычислительном устройстве, где температура задаётся глобально, а не индивидуально для каждого нейрона. Также остаётся открытым вопрос: **является ли полученная функция Гаусса действительно оптимальной**, или же более практичным было бы использование аппроксимируемых функций с более простой реализацией (например, треугольной, как показано на рис. 4.12), что могло бы упростить конструкцию и повысить стабильность характеристик.

3. Отсутствие анализа интеграции нейронов с другими компонентами криогенной системы. В работе нейроны исследуются как изолированные ячейки, а их взаимодействие с внешним миром ограничено индуктивной связью через контрольные линии и считывающий СКВИД. Однако в реальной вычислительной системе нейроны должны обмениваться сигналами друг с другом, а также, возможно, с квантовыми процессорами или классическими управляющими электронными схемами. В диссертации не рассмотрены вопросы **сопряжения предложенных нейроморфных элементов с цифровыми сверхпроводниковыми схемами** (например, на базе быстрой одноквантовой логики или при

помощи адиабатических квантовых параметронов), не обсуждаются задержки передачи сигнала, энергетические затраты на межсоединения и проблемы согласования уровней сигналов. Учитывая, что одним из заявленных преимуществ является работа при криогенных температурах «на холодной плите» совместно с кубитами, следовало бы хотя бы качественно оценить, как предложенные нейроны могут быть интегрированы в гибридную квантово-классическую архитектуру, и не станет ли интерфейс между нейронами и остальной системой «узким горлышком», сводящим на нет достигнутые энергетические преимущества.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация А.С. Ионина представляет собой законченное научно-квалификационное исследование, выполненное на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Основные выводы и положения работы являются обоснованными и достоверными. Существенным является личный вклад автора, который участвовал в разработке конструкции образцов, внедрении методики измерения передаточных функций, проведении экспериментальных исследований, а также в анализе, аппроксимации и интерпретации экспериментальных кривых. Результаты работы достаточно полно опубликованы в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК, и представлены на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание, выводы и основные положения, выносимые на защиту.

Диссертационная работа А.С. Ионина соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Ионин Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв заслушан и утвержден на заседании научно-технического совета МТУСИ (протокол № 14 от «8» сентября 2026 г.).

Составитель отзыва:

Кленов Николай Викторович, доцент, доктор технических наук,

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения;
05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах (техн. науки);

Проректор по научной работе МТУСИ

Адрес: г. Москва, ул. Авиамоторная, 8А

Тел. +7(917) 537-88-93

E-mail: nvklenov@mail.ru

«23» сентября 2026 г.



(Handwritten signature)

Н.В. Кленов

Согласен на обработку персональных данных

«23» сентября 2026 г.

(Handwritten signature)

Н.В. Кленов

Подпись Н.В. Кленова заверяю:

Сведения об организации:

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

111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8А.

+7(495) 957-79-17

<https://mtuci.ru/>

e-mail: mtuci@mtuci.ru