

ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертации Ионина Александра Сергеевича «Практическая реализация и экспериментальное исследование прототипов сверхпроводящих нейронов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа А. С. Ионина посвящена практической реализации и экспериментальному исследованию сверхпроводящих нейронных структур, формирующих сигмоидальную и гауссоподобную передаточные функции. Тематика работы представляется актуальной в связи с развитием нейроморфных вычислений и растущим интересом к криогенной электронике, способной работать непосредственно при низких температурах. Использование джозефсоновских структур и принципов адиабатической сверхпроводниковой логики в этом контексте представляет особый интерес благодаря потенциально высокой энергоэффективности и естественной совместимости со сверхпроводниковыми квантовыми и сенсорными системами.

Существенным достоинством работы является её выраженная экспериментальная направленность. Автором реализованы и исследованы прототипы двух типов сверхпроводящих нейронов — сигма-нейрона и гаусс-нейрона — на основе туннельных джозефсоновских переходов Nb/AlOx/Nb. Для изготовленных структур проведена комплексная криогенная характеристика, включающая измерение вольт-амперных характеристик, зависимостей критического тока от магнитного потока и, что особенно важно для поставленной задачи, поток-поточковых передаточных функций. Экспериментально показано, что в требуемых режимах характеристики исследованных структур могут быть аппроксимированы сигмоидальной и гауссоподобной функциями, то есть реализуют нелинейности, востребованные в различных классах нейроморфных архитектур.

Особого внимания заслуживает анализ причин расхождения между исходными теоретическими моделями и экспериментом. В работе выявлено влияние паразитной взаимной индуктивности между управляющей линией и измерительным СКВИДом, а также начального тока и магнитного потока в измерительном контуре. Показано, что эти эффекты могут давать вклад, соизмеримый с полезным выходным сигналом, и поэтому должны учитываться уже на этапе проектирования. Для их описания развиты аналитические и численные модели, учитывающие полную матрицу взаимных индуктивностей элементов схемы. Сопоставление расчётных и экспериментальных передаточных функций демонстрирует хорошее количественное согласие, а верификация расчёта индуктивностей на тестовых структурах подтверждает применимость используемых методов.

Полученные результаты имеют как научное, так и практическое значение. С научной точки зрения работа уточняет физическую картину формирования передаточных характеристик искусственных нейронов на базе сверхпроводящих интерферометров и показывает роль связей, которые в упрощённых моделях обычно не учитываются. Практическая ценность определяется тем, что разработанные модели и экспериментально проверенные методики позволяют более надёжно прогнозировать характеристики нейронных ячеек, выбирать режимы безгистерезисной работы и учитывать влияние топологии, параметров джозефсоновских переходов и начальных состояний измерительных контуров. Это создаёт необходимую основу для последующего перехода от отдельных прототипов к более сложным интегральным нейроморфным схемам.

К автореферату имеются следующие замечания.

1. В автореферате основное внимание уделено стационарным передаточным характеристикам нейронов и влиянию параметров схемы на их форму. При этом для оценки перспектив

применения предложенных элементов в реальных нейроморфных системах было бы полезно более подробно обсудить их динамические характеристики: предельную рабочую частоту и ожидаемое энергопотребление в рабочем цикле. Особенно интересным представляется сопоставление этих характеристик с декларируемыми преимуществами адиабатической сверхпроводниковой логики.

2. Практическое применение нейронных ячеек предполагает их объединение с синаптическими связями и другими нейронами. В связи с выявленной в работе заметной ролью паразитных взаимных индуктивностей представляется интересным обсудить, насколько эти эффекты будут ограничивать масштабирование и плотную интеграцию многокомпонентной нейроморфной схемы и какие топологические или схемотехнические меры автор считает наиболее перспективными для их подавления.

Высказанные замечания носят частный характер и не снижают общей высокой оценки работы. По материалам автореферата можно заключить, что диссертационная работа А. С. Ионина является завершённым научно-квалификационным исследованием, содержит новые экспериментальные и теоретические результаты, а сформулированные выводы обоснованы представленными данными. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Ионин Александр Сергеевич, заслуживает присуждения искомой учёной степени по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.15 «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика», ведущий научный сотрудник отдела микроэлектроники лаборатории физики наноструктур НИИЯФ МГУ

 И. И. Соловьев

«13» октября 2026 г.

Даю согласие на обработку моих персональных данных любым законодательно разрешенным способом.

Адрес: 119991, ГСП-1, Москва,

Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

МГУ имени М.В. Ломоносова

Телефон: 8 495 939-2588

Электронная почта: i.i.soloviev@pn.sinp.msu.ru

Подпись И.И. Соловьева заверяю.

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ



 Е. А. Сигаева

«19» октября 2026 г.