

**ОТЗЫВ официального оппонента Мухина Сергея Ивановича
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Щеголева Андрея Евгеньевича
на тему: «Разработка элементной базы для сверхпроводниковых
искусственных нейронных сетей на основе макроскопических
квантовых эффектов»
по специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур,
атомная и молекулярная физика»**

Диссертационная работа А.Е. Щеголева посвящена разработке элементной базы сверхпроводниковых искусственных нейронных сетей. В области искусственного интеллекта и искусственных нейронных сетей ведутся обширные исследования в различных областях современной науки, что и определяет высокую актуальность проводимых исследований.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору литературы с подробным освещением ключевых моментов, отражающих современное состояние исследований методов совершенствования нейроморфных вычислительных систем в мире. Представленный анализ дает общее представление о предмете и методах исследования. Из первой главы логично вытекают решаемые в диссертационном исследовании задачи и преследуемые цели.

Во второй главе изложены результаты по разработке и анализу решений для реализации нейронов для искусственных нейронных сетей, построенных как на архитектуре персептрона, так и на архитектуре сетей на радиально-базисных функциях. Автор нашел оптимальные параметры функционирования данных нейронов, позволяющие обеспечить их наиболее энергоэффективную работу. Более того, была рассмотрена возможность

технологического разброса характеристик джозефсоновских контактов в разработанных схемах и приведены способы их нейтрализации. Для нейрона, реализующего сигмоидную функцию активации, был разработан шаблон для литографии. В этой же главе представлена идея реализации потокового кубита в качестве нейрона. Наиболее актуальным в работе, с моей точки зрения, является разработанная концепция потокового кубита, который при определенных условиях способен обеспечить сигмоидальную функцию преобразования приложенного сигнала при измерении состояния. Так как оперирование в квантовом режиме подразумевает работу при низких температурах, сверхпроводниковый кубит как нельзя лучше подходит для этих целей и, при этом, позволяет реализовать связь с «классической» сверхпроводниковой электроникой. Использование процессоров на основе потоковых кубитов, например, для предварительной обработки данных, требующих больших вычислительных мощностей и логических операций в сверточных нейронных сетях, позволит значительно увеличить эффективность вычислений.

Третья глава посвящена разработке сверхпроводникового синапса, задачей которого является линейное преобразование входного сигнала. При этом важно, чтобы коэффициент передачи – вес синапса – мог изменяться в широких пределах, принимать как положительные, так и отрицательные и нулевые значения. Автор разработал два варианта синапса: один основан на использовании эффекта Джозефсона, а другой – использует особенности кинетической индуктивности тонких сверхпроводящих слоев. Подробно проанализированы передаточные характеристики, дана оценка линейности и динамического диапазона.

В четвертой главе работы обсуждаются проблемы объединения разработанных базовых элементов в функционирующие нейронные сети. Так, поднимается вопрос об обучении нейронной сети аппаратным методом для

максимального использования преимуществ сверхпроводниковой технологии. С использованием архитектуры представленной во второй главе нейрона для РБФ-сетей, реализована обучающая ячейка, которая настроена так, чтобы ее передаточная функция имела вид производной сигмоидной функции активации нейрона. Разработан шаблон для такой обучающей ячейки, причем его размер не превышает 10×10 мкм². Проведенный анализ динамических процессов дает оценку энерговыделения порядка нескольких зДж при адиабатическом режиме работы. Более того, для разработанного ранее нейрона, реализующего сигмоидную функцию активации, и представленной обучающей ячейки была проведена симуляция работы нейронной сети персептрон, использующей для работы и обучения передаточные характеристики данных ячеек. Результатом такой симуляции стала высокая степень совпадения результатов распознавания при использовании «сверхпроводниковых функций» и их математических аналогов (при том, что сверхпроводниковая сеть должна иметь серьезный выигрыш по быстрдействию и энергоэффективности). Кроме того, в данной главе уделено внимание сверточным нейронным сетям, а именно – элементу leaky ReLU, играющему роль фильтра отрицательных значений.

Пятая глава диссертации содержит обсуждение проблем реализации гибридных опто-сверхпроводниковых нейронных сетей. Приводится анализ уже существующего интерфейса между оптической и сверхпроводниковой частями общей гибридной системы, предлагается схема увеличения эффективности приема сигнала болометрического детектора, рассматриваемого в рамках оптико-механической аналогии.

Основные положения, вынесенные автором диссертации на защиту, являются обоснованными. Выводы и результаты, представленные в заключении диссертации, являются новыми и оригинальными, а достоверность их не вызывает сомнений. Эти результаты могут быть

использованы для проектирования устройств обработки сверхслабых сигналов, регистрируемых криогенными детекторами (например, при астрономических исследованиях).

Научные результаты, полученные по теме диссертации, были представлены в 11 статьях, опубликованных в рецензируемых высокорейтинговых международных журналах. Кроме того, материалы диссертации нашли свое отражение в двух учебных пособиях, используемых в образовательном процессе на Физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова, и двух сборниках трудов международных конференций. Результаты диссертации были использованы при создании патента РФ. В совокупности, это является впечатляющим итогом для кандидатской диссертации.

В качестве критических замечаний или предложений хочу отметить:

1. В Гл. 2 при рассмотрении сверхпроводящего потокового нейрона на основе сверхпроводящего кольца с джозефсоновским контактом, при выводе соотношений (3)-(5) для связи разности сверхпроводящих фаз с внешним магнитным потоком не учтен квазичастичный (нормальный) ток через контакт при наличии на нем напряжения, пропорциональный первой производной от разности фаз по времени и обратно пропорциональный сопротивлению контакта (работа Асламазова-Ларкина (Письма в ЖЭТФ т.9, 150 (1969) Учет этой добавки приводит к появлению негармонической добавки к зависимости напряжения на джозефсоновском контакте как функции от времени. Хотя этот вклад косвенно упоминается далее при описании сигма-нейрона: на стр. 59 написано, что наличие диссипации в системе связано с ненулевой скоростью изменения фазы джозефсоновского контакта под действием внешнего сигнала. (кстати, в приведенной на этой странице формуле для

критического времени нарастания сигнала t_c не дано определение величины обозначенной R_N).

2. При рассмотрении сигма-нейрона на основе слоистой тонкоплёночной структуры для джозефсоновского контакта было бы интересно учесть возможность образования джозефсоновских вихрей в контакте при наложении внешнего магнитного поля, что может приводить к различным дополнительным эффектам в вольт-амперной характеристике контакта.
3. В связи с работами о фазовых переходах в модели Дике (Emary, Brandes Phys.Rev. E 67, 06623 (2003), Mukhin, Gnezdilov Phys.Rev. A, 053809 (2018) и др.) представляет интерес исследовать возможность коллективных явлений в квантовых нейронных сетях с учетом взаимодействия между отдельными нейронами.

Вместе с тем, приведенные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация полностью отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Щеголев Андрей Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по

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

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
Профессор, зав. кафедрой теоретической физики и квантовых технологий
ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский технологический
университет "МИСиС"

Мухин Сергей Иванович



15.10.2020

Контактные данные:

тел.: e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

119049, г. Москва, Ленинский пр-кт, 4,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Национальный исследовательский технологический
университет "МИСиС", кафедра теоретической физики и квантовых
технологий

Тел.: ; e-mail:

Подпись сотрудника С.И. Мухина удостоверяю

15.10.2020

Проректор



И.М. ИСАЕВ