

Отзыв

официального оппонента на диссертацию 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

Для аппаратной реализации нейронных сетей необходимы физические элементы, выполняющие нелинейное преобразование входного сигнала. В сверхпроводящих схемах такое преобразование можно получить с помощью джозефсоновских интерферометров. Однако переход от принципиальной схемы к изготовленному устройству требует отдельного исследования: реальные элементы взаимодействуют между собой, а подключение управляющих и измерительных цепей изменяет наблюдаемую характеристику. Поэтому экспериментальная проверка сверхпроводящих нейронных ячеек и выяснение причин их отличия от идеализированных моделей представляют актуальную научную задачу.

Диссертация А. С. Ионина посвящена решению этой задачи для двух типов ячеек — сигма- и гаусс-нейронов, предназначенных для получения сигмоидальной и колоколообразной функций активации.

В первой главе изложены физические принципы работы исследуемых устройств. **Во второй** описаны технология изготовления образцов, методы расчета индуктивностей и экспериментальная установка. Основные результаты представлены в третьей и четвертой главах, связывающих измерение передаточных характеристик с их физической интерпретацией.

В третьей главе исследуются изготовленные многослойные структуры на основе переходов $\text{Nb}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$. Их выходной магнитный поток измеряется с помощью сверхпроводящего квантового интерферометра – СКВИДа. Для сигма-нейрона получен отклик, содержащий сигмоидальную составляющую, а для гаусс-нейрона – последовательность колоколообразных участков. Тем самым экспериментально подтверждена возможность получения требуемых типов нелинейного преобразования в реализованных структурах. При этом измеренные зависимости обнаруживают особенности, отсутствующие в исходных моделях изолированных ячеек. В частности, оба типа отклика содержат дополнительную линейную составляющую. Анализ этих расхождений составляет существенную часть исследования.

В четвертой главе показано, что сверхпроводящий экран не обеспечивает полной независимости элементов структуры. Возникающие в нем экранирующие токи создают связь между управляющей линией и считывающим контуром, приводящую к прямой передаче части входного сигнала. Для учета этого эффекта и других взаимных связей используются рассчитанные матрицы индуктивностей. Расширенные модели позволяют описать ряд особенностей экспериментальных кривых и исследовать влияние начального потока в измерительном СКВИДе на передаточную характеристику нейрона.

Научная новизна работы связана с экспериментальной реализацией исследованных прототипов, установлением роли паразитной индуктивной связи и развитием описания взаимодействующих элементов нейронной ячейки. Существенным результатом считаю выяснение того, что управляющая и считывающая части схемы должны учитываться при интерпретации измерений и проектировании устройства. Это придает работе практическую значимость, поскольку полученные результаты могут использоваться при выборе геометрии ячеек и организации передачи сигнала между ними.

Достоверность основных результатов диссертации подтверждается сопоставлением экспериментальных данных с аналитическими и численными расчётами, а также проверкой расчётов индуктивностей на тестовых структурах. Представленный анализ позволяет считать основные выводы о свойствах исследованных нейронных ячеек и влиянии взаимных индуктивных связей на их передаточные характеристики обоснованными.

Существенным достоинством диссертации является тесная связь экспериментального исследования с развитием теоретического описания нейронных ячеек. Анализ расхождений между измеренными и рассчитанными характеристиками позволил выявить физические эффекты, не учитывавшиеся в исходных моделях, и уточнить эти модели. Выполненная работа свидетельствует о высокой квалификации автора в области экспериментальной физики сверхпроводящих устройств и интерпретации полученных результатов.

По диссертационной работе имеются следующие замечания и вопросы.

1. В диссертации экспериментально исследованы отдельные сверхпроводящие нейронные ячейки, однако условия их объединения в многослойную сеть раскрыты недостаточно подробно. Полученные результаты показывают существенное влияние подключённых контуров на передаточные характеристики, что делает особенно важным согласование взаимодействующих нейронов. Как при соединении ячеек предполагается учитывать нагрузку и обратное влияние последующих каскадов, сохраняя форму функций активации и обеспечивая достаточную амплитуду сигнала для работы следующего слоя?
2. Выбор σ - и G-нейронов в работе связан с их применением в персептроне и сети радиальных базисных функций. Вместе с тем недостаточно подробно обсуждаются преимущества и ограничения выбранного подхода по сравнению с другими реализациями сверхпроводящих нейронов. Чем, помимо требуемой формы функции активации, обусловлен выбор именно этих интерферометрических ячеек и для каких задач их использование представляется наиболее перспективным?
3. Одним из мотивов исследования заявлена возможность снижения энергопотребления сверхпроводящих нейроморфных систем. Однако для разработанных σ - и G-нейронов не приведена количественная оценка энергии, рассеиваемой за один цикл преобразования входного сигнала в выходной. Проводилась ли такая оценка расчётным или экспериментальным путём для заданной длительности цикла и как её результаты соотносятся с указанной во введении энергией порядка 1 аДж на переключение RSFQ-ячейки и заявленными преимуществами адиабатического подхода?
4. При анализе температурной зависимости G-нейрона отмечается уменьшение амплитуды передаточной характеристики при практически неизменной ширине её куполообразного участка. Одновременно делается вывод о возможности температурного управления дисперсией аппроксимирующей гауссовой функции. Какими количественными результатами подтверждается данный вывод и как он согласуется с отмеченным постоянством ширины?

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не ставят под сомнение экспериментальное получение нелинейного отклика исследованных ячеек, установленную роль их взаимодействия с управляющей и считывающей схемами. Считаю, что совокупность представленных результатов соответствует уровню кандидатской диссертации.

Результаты диссертации представлены в четырех основных статьях, опубликованных в ЖЭТФ, Письмах в ЖЭТФ и журнале «Физика твердого тела», и докладывались на ряде российских и международных научных конференций.

Считаю, что диссертация Ионина Александра Сергеевича «Практическая реализация и экспериментальное исследование прототипов сверхпроводящих нейронов» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную для современной физики конденсированного состояния тему. Работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а сам Ионин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния, научный сотрудник Лаборатории теории наноструктур Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского

Пашин Дмитрий Сергеевич

Согласен на обработку персональных данных

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
ННГУ ИМ. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО

14.09.2026

Пашин Д.С.

СУББОТИНА

Контактная информация:

Почтовый адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

Телефон: +7 (950) 615-07-73

e-mail: pashindmi@unn.ru

