

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Вдовина Вячеслава Федоровича на диссертацию Кленова Николая Викторовича **«ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛА НА ОСНОВЕ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ»**, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертация Кленова Николая Викторовича посвящена решению важнейшей **научной проблемы** – теоретическому и экспериментальному поиску путей увеличения эффективной интеграции в сверхпроводниковых комплексах приема и обработки сигнала, при этом поставлена цель разработки перспективных путей реализации когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем для приема и обработки сигналов с использованием классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов. Решение указанной проблемы в конечном итоге должно привести к:

- расширению полосы приема приемных систем для телекоммуникаций и радиолокации нового поколения (до 100 ГГц и выше) и, как следствие, увеличению количества одновременно принимаемых радиосигналов;
- увеличению динамического диапазона (до 160 дБ), что позволяет исключить из схем радиоприёмных устройств систем автоматической регулировки усиления (АРУ) и решить проблему колоссального отличия уровней сигналов мобильных сетей;

Вход. № 116/18  
«3» 10 2018 г.  
подпись

- повышению чувствительности приемо-передающих устройств (до уровня - 300 дБВт), что позволяет расширить зону охвата радиосетей;
- повышению быстродействия (до  $10^{13}$  операций в секунду), что позволит обрабатывать сигналы в широкой полосе частот в реальном времени при затратах энергии на уровне 1 Дж на  $10^{15}$  операций.

Приведенный выше список перспектив, на которые работает соискатель, однозначно свидетельствует о том, что именно здесь лежит один из магистральных путей дальнейшего развития радиотехники и электроники. Работа содержит вполне состоятельную физико-математическую компоненту, и без проблем могла бы быть защищена как физико-математическая, однако совершенно оправданно она представлена на соискание степени технических наук. Практически каждый мощный теоретико-аналитический фрагмент завершается совершенно очевидно вытекающими из него практическими выводами и даже технологическими рекомендациями. Набор патентов (к сожалению, не приведенный в Приложении к диссертации), перечисленный в диссертации, убедительно подтверждают, что автор нацелен на достижение практического инженерно-технического решения. Вообще чтение тома диссертации доставило огромное удовольствие: он написан мощным физиком-теоретиком хорошей университетской школы и бесспорно признанным в мире; в то же время и грамотным инженером, отчетливо осознающим все технические ограничения и с особой скрупулезностью анализирующий тонкие аспекты технологии и влияние разного рода возможных паразитных эффектов. Анализ же предметной области, представленный в главе 1 достоин быть изданным отдельно и массовым тиражом, поскольку всем очевидно, что тут лежит новое направление, которое в ближайшие два десятка лет изменит нашу практическую жизнь самым радикальным образом. Мне, уже около 40 лет занимающемуся созданием практических приемных систем миллиметрового диапазона длин волн, немного грустно, что обилие технических находок и выстраданных решений нашего поколения скоро уйдут в небытие, поскольку

и у меня, равно как и автора диссертации нет ни малейшего сомнения, что прямая оцифровка входного сигнала частотой в сотни гигагерц – весьма близкая перспектива. Как уже не кажется удивительной оцифровка в наших нынешних приемниках сигнала промежуточной частоты в единицы гигагерц сегодня. Для нас, кто четверть века назад создавал высокоэффективные синхронные аналоговые детекторы и копил сигналы на  $RC$  цепочках с ёмкостями, имеющими очень маленькую утечку. Пока еще светлая перспектива, представленная Н.В.Кленовым, достаточно далека, и его личный вклад (чрезвычайно четко очерченный, что важно в его случае, когда основные публикации соискателя выполнены в соавторстве) очень заметный, пока еще лишь задает направление исследований к этой перспективе.

Основные результаты работы соискателя убедительны. Среди них особо хотелось бы выделить следующие:

1. Разработана методика анализа токового транспорта в гетероструктурах со сверхпроводящими материалами для получения субмикронных воспроизводимых базовых элементов когнитивных широкополосных систем приема и обработки сигналов. Продемонстрирована возможность построения джозефсоновских контактов с непосредственной проводимостью в области слабой связи, выполненных в топологии «мостик переменной толщины», с критическим током до 1 мА и характерным напряжением до 4 мВ. Результаты модельных расчетов демонстрируют хорошее совпадение с экспериментальными данными, что подтверждает эффективность разработанной методики при исследовании компактных джозефсоновских элементов с характерным размером области слабой связи 35... 250 нм.

2. Оптимизированы базовые ячейки для нейросетевого блока когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем приема и обработки сигналов на основе одно- и двухконтактных сверхпроводящих квантовых интерферометров, шунтированных дополнительной индуктивностью; энерговыделение на одну логическую операцию в таких

ячейках (эквивалентный элемент при реализации на основе полупроводниковой элементной базы состоит примерно из 20 транзисторов) может быть уменьшено до 10 аДж. Этот показатель показывает практическую степень близости соискателя к стоящим задачам. Превосходно!

3. Выполнен анализ воздействия распространяющихся по нелинейным джозефсоновским резонаторам солитоноподобных возбуждений (флаксонов) на динамику состояния квантовой системы для доказательства возможности осуществления манипуляций с состояниями кубита за счет приложения импульсов магнитного потока длительностью 0.5...5 пс. Радикальное уменьшение крайне нежелательной диссипации энергии в процессе таких логических операций (до уровня 1 аДж и ниже, вплоть до термодинамического предела  $2\ln k_B T$ ) возможно при переходе к адиабатическим (обратимым) передающим линиям, где вместо джозефсоновских гетероструктур используются сверхпроводящие квантовые интерферометры с отрицательной индуктивной связью между частями ячейки.

Вместе с тем, **имеется ряд замечаний** к работе, впрочем, в основном это уже скорее не замечания, а желание уточнить и обсудить тонкие места с автором работы.

1. Подискутировать с автором хотелось бы, к примеру, о криогенике. Убежден, что многие из возможных оппонентов попытались бы принизить уровень превосходных результатов автора, утверждая, что все предлагаемые сверхпроводниковые технологии требуют гелиевого, а порой и более глубокого охлаждения, что делает предлагаемые технологические решения неперспективными и чрезвычайно тяжелыми и дорогими, требующими непривычного для телекоммуникационного или радарного сообщества оборудования и компетенций. По счастью, имею обширный опыт работы с криогеникой, и готов не только поддержать уверенность автора в скорой и обнадеживающей перспективе, но и добавить от себя, что

технологии криостатирования в последние годы развиваются столь стремительно, что через десяток лет пользователь, имеющий криостатируемую аппаратуру, даже не будет знать, что там еще и криорефрижератор внутри, как сейчас мало кто из пользователей мощных серверов знает, что там внутри встроена система жидкостного охлаждения процессора. Поэтому в качестве замечаний могу лишь попенять, что в работе есть и терминологические издержки: скажем, отсутствует криорефрижератор, привычный у нас, но зато есть криокулер, неоднозначно трактуемый по-русски. Не вполне корректна и ссылка что при весе порядка десяти килограмм системы охлаждения потребляют 1.2 кВт. Конечно, встречаются и такие криогенные охладители, но для иных целей. И, как далее справедливо отмечает автор, результаты со сверхпроводящими структурами получены на серийной 4 К установке Sumitomo, а тут вес уже около 100 кг и энергопотребление в 5 раз больше. И совсем неудачно на 29 стр. указано, что есть миниатюрные и экономичные установки гелиевого уровня [13]. Указанная ссылка 2009 года касается установки более высокого водородного уровня температуры ( $>10\text{K}$ ). Нужно, впрочем, отметить, что в России в 2009 г просто не было ни одной серийной установки, работающей до десятков микельвин, но с 2010 прошла революция, и даже у нас в ведущих университетах и НИИ имеются десятки таких систем. Разумеется, можно надеяться на продвижение высокотемпературной сверхпроводимости. А автор не только надеется, но и активно и успешно работает над такими разработками. Конечно, азотный уровень много доступнее гелиевого и водородного, но сегодня это отличие не так критично. А надежды на сверхпроводимость при комнатной температуре не только растаяли с 90-х годов, но и не сулят способа избавления от тепловых шумов, способных погубить все мыслимые положительные эффекты от сверхпроводимости.

2. Касаясь трех фундаментальных проблем отсутствия пока на рынке широко внедренных квантовых сверхпроводниковых технологий, на мой взгляд автор упускает как минимум еще две. Первая – как раз та самая

надежная, простая и «незаметная» для потребителя криогеника, пока таковой нет. Вторая, проблема в том, что в работе Н.В.Кленова предлагается активно и в новом качестве использовать давно и хорошо известный нам СКВИД. Нужно отметить очевидный профессионализм соискателя в этой сфере, и он много интересного и нетривиально предложил и объяснил в своей работе даже искушенным людям. И очевидно он не может не знать всех проблем, связанных с этим реально сверхчувствительным датчиком. Хотелось бы поговорить с автором и о том, как широкому пользователю бороться с разного рода наводками, паразитными сигналами (раздел про паразитные магнитные поля в томе имеется, добротнo! И модель гироскопа в свете релятивизма в голову пришла), микрофонными эффектами и т.п. Но больше смущает сверширокополосность по входу сверхпроводниковой антенной системы. Косвенно автор коснулся проблемы, упомянув про мощность блокирующих помех. Но нужно подробнее. Это реальное ограничение метода и проблема. На днях был на радиотелескопной конференции в СПб (ВРК-2018), там процентов 20 докладов были посвящены как раз этой проблеме электромагнитной совместимости. В приемники лезет всё! Конечно, полностью цифровой прием дает и почти неограниченные возможности фильтрации. Но все же... Также хотелось бы более детально обсудить ряд технологических проблем, не до конца понятных из представленных в диссертации материалов, в частности:

- проблему согласования предлагаемых сверхпроводниковых антенных структур с пространством,
- способов обеспечения в технологии производства адекватного выхода годных образцов при числе структур в  $10^5$  на чипе,
- проблем, связанных с созданием миниатюрных джозефсоновских туннельных гетероструктур, включая такие трудные технологические вопросы как осаждение тонкого слоя меди (стр. 150); алюминия, как сверхпроводника (здесь же) и нормального металла (стр.200), особенностям работы с ферромагнетиками, и в частности при создании SFS структур и т.п.

3. Соглашаясь с безусловной перспективой цифрового радио, все же отмечу, что критика автора аналоговой электроники не всегда корректна (стр 15). Уже практически нет задачи *увеличения чувствительности*. Квантовый предел аналоговыми системами уже достигнут. *Нелинейность используемых преобразований сигнала* – не всегда дефект, она априорна и необходима (кое где, не в усилении конечно). Более того, СИС известен как самая крутая нелинейность в природе, и без нелинейности нельзя преобразовать сигнал в иной частотный диапазон. *Большие вносимые потери* - про какие потери речь? Тракты, атмосфера, элементы? *Высокие требования к согласованию и волноводным линиям*. А что для цифровой антенны не будет стоять вопрос согласования? Мозг человека и кошки (21 стр) скорее аналоговый компьютер, а нейроподобные технологии в работе – все равно цифра. Поэтому не совсем верно ставить знак равенства между нейроподобными системами и мозгом.

4. Реально к категории замечаний относится лишь это малосущественное замечание, касающееся оформления труда. Отмечу некоторую перегруженность изложением теории. В представленных теоретических выкладках кое-где трудно установить связность вывода, а обращение к статьям затруднено, т.к. автор не потрудился указать doi, да и разбивка ссылок по параграфам не создает дополнительных удобств работы с текстом. Есть и некоторая небрежность в оформлении как графического материала, так и текста (соискатель слишком доверяет автопроверке редактора текста, а тот легко пропускает ошибки, если в принципе получившееся слово имеет право на жизнь). Такого рода опечатки присутствуют от начала текста (5, 29, 44, 50 стр...и до конца содержательной части 312, 326 стр..). Есть и некоторая вольность с терминологией. Например, не до конца устоявшийся термин «тихий» кубит периодически, как и положено, взят в кавычки вплоть до трёхсотых страниц текст, но иногда этот порядок оказывается нарушен. Порой нет ссылок на рисунки, а подписи не совсем информативны: к примеру, подпись под рисунком 3.2.2

обещает продемонстрировать этапы изготовления интерферометра, там де-факто не представленные. В раздел апробации не могу не добавить указание на НГТУ им. Р.Е.Алексеева – Н.В.Кленов посещал семинары Центра Криогенной Нанoeлектроники, где с блеском представлял свои результаты.

Изложенные выше замечания не снижают ценности выполненного научного исследования. Диссертация Н.В.Кленова является высококвалифицированной работой и вносит существенный вклад в исследования важнейшей области современной физики. **Актуальность** избранной темы несомненна. **Теоретическая значимость и новизна исследования** бесспорны. **Практическая значимость исследования** подтверждается тем, что результаты исследования уже использованы (подтверждено актами) и могут быть использованы в дальнейшем. Обширный ряд высококлассных публикации и автореферат полностью и адекватно отражают основное содержание диссертационной работы, содержат всю необходимую информацию, характеризующую полученные диссертантом результаты. Бесспорна **обоснованность научных положений и выводов диссертации**. Н.В. Для решения поставленных задач были использованы самые современные и в то же время надежно апробированные идеи и технологии, собранных в единый труд на основе как собственных исследований, так и анализе огромного объема источников. Использование упомянутых выше методов и принципов позволяют считать обоснованными основные положения, выносимые на защиту. **Основные положения** и результаты диссертационного исследования полностью представлены в 112 научных трудах и 5 учебных пособиях, среди которых 58 статей в журналах, индексируемых мировыми поисковыми системами Web of Science и/или Scopus. Сверх того, имеется еще 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК, цитируемых отечественной базой РИНЦ, и не имеющих на момент публикации переводной версии, учитываемой международными поисковыми системами (всего 22 публикации в российских журналах из списка ВАК). Важной особенностью работы с точки зрения ее практической значимости



является то, что материалы диссертации были использованы при создании 9 патентов РФ и 3 патентов США, соавтором которых является соискатель.

Диссертация Н.В. Кленова является завершенным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям, изложенным в п.п. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени доктора наук. Несмотря на приведенные замечания, не снижающие значимость выполненной работы, можно заключить, что автор диссертации, Кленов Николай Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Отзыв составил:

Вдовин Вячеслав Федорович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник (доцент по специальности), главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

«28» сентября 2018 г.

Подпись заверяю:

Отдел кадров Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Адрес организации  
603600, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46.  
Тел. 8(916)852-86-39, E-mail: vdovin@appl.sci-nnov.ru.



*В. В. Вдовин*  
28-09-2018