

Нейрон на основе одного потокового кубита

Н.В. Кленов^{1–5}, А.В. Кузнецов¹, А.Е. Щеголев^{1–3,5}, И.И. Соловьев^{2,5}, С.В. Бакурский^{2,4},
М.Ю. Куприянов², М.В. Терешонок^{3,5}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет
Ленинские горы, д. 1, стр. 2, г. Москва, 119991, Россия
E-mail: nvklenov@gmail.com

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, г. Москва, 119991, Россия

³Московский технический университет связи и информатики
ул. Авиамоторная, 8а, г. Москва, 111024, Россия

⁴Московский физико-технический институт (государственный университет)
Институтский переулок, 9, г. Долгопрудный, 141700, Московская обл., Россия

⁵Московский технологический университет (МИРЭА)
пр. Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Россия

Статья поступила в редакцию 15 января 2019 г., после переработки 29 января 2019 г.,
опубликована онлайн 28 мая 2019 г.

Представлена концепция создания базового элемента сверхпроводящих квантовых нейронных сетей на основе всего одного потокового кубита. Выполнен анализ поведения функции активации для различных вариантов реализации «квантового нейрона» (на основе трехконтактного, двухконтактного, пятиконтактного интерферометра); определены условия, когда эта функция активации близка к сигмоидальному виду. Обсуждаются перспективы использования энергоэффективных модернизаций быстрой одноквантовой логики (БОК логики) для управления связями и активационными функциями при работе квантовой нейронной сети на основе предлагаемых элементов.

Ключевые слова: квантовые нейронные сети, потоковые кубиты, БОК логика.

1. Введение

Важным условием успешного создания высокоскоростных систем интеллектуальной обработки данных нового поколения является совершенствование элементной базы искусственных нейронных сетей (ИНС), увеличение ее производительности и энергоэффективности [1–4]. В частности, большой интерес представляет задача о реализации на аппаратном уровне базовых элементов нейронных сетей типа персептрона, входящих в том или ином виде в комплекс обработки больших объемов разнородных данных конкурентного уровня, способных решать нечетко и неполно поставленные задачи, а также распознавать изображения. Ключевой характеристикой таких базовых элементов — нейронов — является их функция активации, в качестве которой чаще всего используются обобщенные логистические (Softmax) функции [5–8].

Многообразие алгоритмов обучения, включающее и использование «имитации отжига», позволяет сегодня

выбрать оптимальный вариант под особенности решаемой задачи. Впечатляющие успехи в области ускорения вычисления градиента функции ошибки при обучении нейронных сетей, в области обработки и классификации большого объема данных, а также машинного обучения достигнуты за счет применения адиабатических квантовых вычислений группами из Lockheed Martin и NASA's Quantum Artificial Intelligence Lab. Важной составляющей частью успеха здесь стало использование радикально новой элементной базы для вычислительных систем, а именно — квантового компьютера от компании D-Wave на основе массивов связанных сверхпроводящих потоковых кубитов [9–13]. Специфические возможности квантовой обработки информации, представленной в виде комплексных векторов и матриц большой размерности, органично дополнили достоинства искусственных нейронных сетей. Однако в этой области на границе квантовых и нейросетевых вычислений до сих пор не уделялось достаточного внимания анализу активационных функций нейронов, хотя в классических

аналогах именно эта характеристика крайне важна как при обучении нейросетей, так и при работе уже обученных ИНС.

При этом также представляется разумным использовать возможности сверхпроводниковой энергоэффективной однокубитовой логики [12–14], уже продемонстрировавшей возможности при моделировании динамики отдельных классических нейронов и синапсов [15]. Борьба за уменьшение энергопотребления в таких вычислительных системах уже привела к тому, что для 8-битного сумматора был экспериментально продемонстрирован уровень энерговыделения до 80 аДж на такт [15–20].

Еще в 1992 г. была предложена концепция сверхпроводниковой нейронной ячейки для спайковых нейросетей, в которых импульсы токов и напряжений в нелинейных сверхпроводящих цепях (связанные с движением специфических квазичастиц — флаксонов, переносящих квант магнитного потока) играли роль нейроимпульсов. В этой схеме, близкой по духу к устройствам быстрой однокубитовой логики (БОК логики), нейрон состоял из двух джозефсоновских передающих линий, соединенных через резисторы, величина проводимости которых выступала в качестве синаптического веса. С помощью такого устройства удалось создать двухбитный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) по схеме сетей Хопфилда для решения отдельных задач оптимизации. Дальнейшее развитие дизайна ячейки, включавшее и использование джозефсоновского компаратора в качестве нейрона с псевдосигмоидальной активационной функцией, не устранило, однако, основной недостаток структуры такого типа: заметное падение напряжения на сопротивлении, ведущее к дополнительной диссипации энергии и снижению уровня энергоэффективности [21–23]. Даже после замены в синаптических (связующих) элементах резисторов на перестраиваемые джозефсоновские контакты [24–26] остается вопрос о минимизации энергии, выделяемой в ячейках джозефсоновской передающей линии (как распределенной, так и составленной из сосредоточенных элементов) при движении флаксона. Неизбежное возникновение/уничтожение флаксона в ходе функционирования нейросети, сопровождаемое диссипацией энергии вихря, представляет собой фундаментальное ограничение на энергоэффективность таких схем. Решением для указанной проблемы является переход к работе с информацией, представляемой не в виде наличия или отсутствия кванта, как это принято в обычной однокубитовой логике, а величиной и направлением циркулирующих в сверхпроводящих контурах токов [27–29].

В рамках настоящей работы мы предлагаем применить такой же подход к квантовым нейронным сетям, используя упомянутые выше достижения в области совершенствования вычислительных систем на основе потоковых кубитов. Главная наша цель — найти ком-

пактную схему для реализации квантового нейрона, базового нелинейного элемента для квантовых сетей типа персептрона с «потоковым» представлением информации. В перспективе новая аппаратная реализация ИНС с быстрым вычислением активационных (в частности, логистических) функций, пригодная для работы с квантовой информацией, позволит радикально повысить эффективность систем интеллектуальной обработки данных.

2. Нейроны на основе потоковых кубитов: общая идея и варианты практической реализации

2.1. Общая идея

Для начала отметим, что в качестве такого компактного элемента, пригодного для функционирования в составе квантовой нейросети, в этой работе мы предлагаем использовать нелинейный преобразователь магнитного потока на основе потокового кубита. Схематические изображения возможных физических реализаций рассматриваемой системы представлены на рис. 1.

В таких кубитах при соответствующем выборе параметров приложенный («входной», Φ_{in}) магнитный поток меняет вид зависимости потенциальной энергии от обобщенной координаты φ . Под параметрами системы мы понимаем соотношения между джозефсоновскими и кулоновскими энергиями используемых гетероструктур, E_J/E_C , а также соотношения между джозефсоновскими энергиями контактов, α_{J0S} . Примеры такого по-

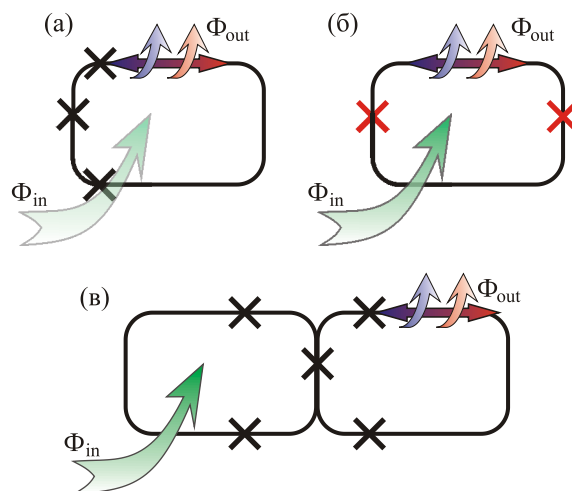


Рис. 1. (Онлайн в цвете) Схематическое изображение трех разных типов потоковых кубитов (трех-, двух- и пятиконтактные схемы) для использования в качестве нейрона. При использовании таких ячеек в нейросети в качестве входного сигнала должен использоваться магнитный поток Φ_{in} ; магнитный поток на выходе Φ_{out} определяется средним значением тока, циркулирующего в сверхпроводящем контуре. «Выходной» элемент, с которым должна быть связана система считывания, на рисунках отмечен стрелкой.

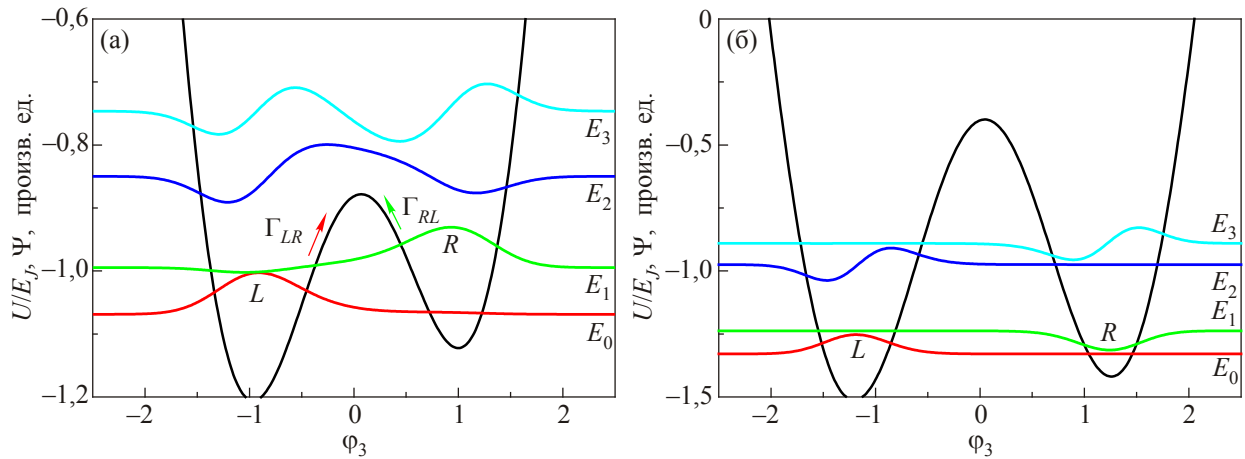


Рис. 2. (Онлайн в цвете) Зависимости потенциальной энергии и волновых функций стационарных состояний (с энергиями E_0, E_1, E_2, E_3) от обобщенной координаты φ_3 для типичного потокового кубита в присутствии приложенного магнитного потока Φ_{in} . В качестве примера выбран потоковый кубит на основе трехконтактной схемы [9]. Энергия нормирована на джозефсоновскую энергию системы E_J . Выделены состояния, локализованные преимущественно в левом или правом минимумах потенциального барьера (L и R соответственно), скорости переходов между этими состояниями определяют константы Γ_{LR} и Γ_{RL} (а). Для сравнения приведена зависимость потенциальной энергии от обобщенной координаты φ_3 для потокового кубита с большим потенциальным барьером. Рассчитанные численно собственные функции оператора Гамильтона близки к элементам спинового базиса в пространстве волновых функций для такой системы (б).

тенциала представлены на рис. 2. В результате будет меняться и вероятность обнаружить систему в выбранном локальном минимуме энергии (левом, L , или правом, R). Эта вероятность связана с наблюдаемым магнитным потоком в кубите (каковой и будет выступать в качестве выходного сигнала для нейрона, Φ_{out}), так что требуемая для создания квантовых ИНС «нелинейность» здесь вносится через выполнение специальным образом подготовленных измерений.

В нейросети типа «перцептрон» мы должны иметь, как было указано выше, активационную функцию, связывающую сигнал на входе (x) и выходе элемента (F), в виде обобщенной логистической (сигмоидальной) функции. Это означает, что на выходе квантового нейрона мы должны иметь для вероятности обнаружить систему, например, в левом локальном минимуме по-

тенциальной энергии, p_L , связь с входным сигналом следующего вида:

$$F(x) = \frac{F_0}{1 + \exp[-k(x - x_0)]}. \quad (1)$$

Здесь F_0, k, x_0 — константы, характеризующие конкретный вид обобщенной логистической функции. В качестве аргумента далее будет выступать приложенный магнитный поток Φ_{in} . В работе [30] впервые было показано, что требуемый вид преобразования «поток-вероятность» можно получить, отталкиваясь от следующих простых соотношений для динамики населенности базисных состояний в потоковом кубите:

$$\frac{dp_L}{dt} = -\Gamma_{LR}p_L + \Gamma_{RL}p_R, \quad (2)$$

$$p_L = \frac{\Gamma_{RL}}{\Gamma_{RL} + \Gamma_{LR}} = \frac{1}{1 + \Gamma_{LR}/\Gamma_{RL}} \xrightarrow{\Gamma \propto \exp[-\Delta U/k_B T]} \frac{1}{1 + \exp[-\Delta E/k_B T]}. \quad (3)$$

В последнем выражении скорости ухода из левого и правого минимумов потенциала обозначены как Γ_{LR} и Γ_{RL} соответственно. Определение величины ΔE , имеющей размерность энергии, и составляет основную проблему: потоковый кубит будет работать как нейрон, если эта величина линейно зависит от приложенного магнитного потока. Так как величины Γ_{LR} и Γ_{RL} определяются высотой одного и того же барьера, можно под величиной ΔE , входящей в отношение этих скоростей, понимать разницу между энергиями состояний,

локализованных в левом и правом минимумах рассматриваемой потенциальной энергии. Также отметим, что в рассматриваемом случае для достаточно высокого барьера вероятность покинуть локальный минимум потенциальной энергии всегда экспоненциально мала: $\Gamma_{LR} \propto \exp(-A)$. При этом в «квантовом» пределе, когда температура меньше характерного значения T_0 , показатель экспоненты A — плавная функция, выходящая на константу при нулевых температурах [31]. Эта особенность позволяет в выражение (3) подставить

упомянутую эмпирическую константу, зависящую от формы барьера, и полученную для ряда важных для нас случаев из экспериментов по определению специфики туннелирования фазы в рассматриваемых кубитных системах [32].

В классическом режиме в качестве нейрона может быть использована компактная ячейка, созданная на основе одноконтракного сверхпроводящего квантового интерферометра (параметрона), шунтированного индуктивностью [29,33]. В этой работе уже было показано, что управляя нормированными величинами выходной и шунтирующей индуктивности (в том числе и за счет управления джозефсоновской энергией ячейки), мы в классической ячейке можем получить требуемый для реализации нейросетевых алгоритмов сигмоидальный вид активационной функции с достаточно высокой точностью. Поэтому следующая наша задача — определить условия, когда аналогичный параметрон будет обладать требуемой активационной функцией уже в квантовом пределе.

2.2. Реализации на основе трехконтракного и пятиконтрактного кубита

Выбор оптимальной схемы и параметров потокового кубита должен базироваться на анализе изменений спектра системы под действием приложенного магнитного потока Φ_{in} . Мы использовали подходящее, как будет показано ниже, квазианалитическое рассмотрение, которое естественным образом берет за основу использование спинового базиса, элементы которого в пространстве волновых функций хорошо локализованы в одном из минимумов потенциальной энергии (см. рис. 2(б)) [34]. В данном случае волновая функция, локализованная в левом (правом) минимуме, соответствует определенному направлению течения тока в «выходном» контуре сверхпроводящего нейрона (эти направления противоположны для разных минимумов). Обычно волновая функция стационарного состояния с определенной энергией является суперпозицией функций спинового базиса, причем оказалось, что адекватные результаты, хорошо совпадающие с выводами из численного решения уравнения Шредингера, можно получить, представив элементы спинового базиса через собственные функции для оператора Гамильтона линейного гармонического осциллятора.

Этот подход позволил нам рассчитать спектры (а именно: энергии основного и трех первых возбужденных состояний E_0, E_1, E_2, E_3) для разных типов кубитов, включая три варианта, представленных на рис. 1. Специфика конкретной схемы учитывалась при выборе обобщенных координат (в виде линейных комбинаций из джозефсоновских фаз включенных в кубит контактов $\varphi_3, \varphi_2, \varphi_5$ соответственно) и выводе выражений для обобщенных масс и потенциальных энергий. Полученные результаты расчетов для величин E_0, E_1, E_2, E_3 и

разниц между ними (ΔE_{01} и ΔE_{23}) в графической форме представлены на рис. 3(а) и 3(в).

Отметим, что спектр обычного потокового кубита, используемого в квантовых вычислениях, не позволяет построить на его основе нелинейный элемент перцептрона. Покажем это на примере трехконтракного кубита, активно исследуемого с 1999 г. [9]. Как и следовало ожидать, величина ΔE_{01} и ΔE_{23} при стандартном для этого типа кубитов наборе параметров зависит от приложенного магнитного потока квазилинейно лишь вдали от «точки вырождения» (когда величина приложенного потока равна половине кванта Φ_0). Но есть вид потенциально интересных нейронных сетей, где «джозефсоновский атом» с таким специфическим поведением спектра мог бы найти применение. Речь о нейросетях на радиальных базисных функциях (РБФ), где мы должны иметь связь измеряемой на выходе величины с поданным на вход сигналом вида

$$F(x) = F_0 \exp \left[-(x - x_0)^2 / 2\sigma^2 \right]. \quad (4)$$

Здесь F_0, σ, x_0 — константы, характеризующие конкретный вид функции Гаусса, подобранный для решения определенного класса вычислительных задач. Пример рассчитанного по формуле (3) преобразования «поток-вероятность» для кубита с параболической зависимостью ΔE_{01} и ΔE_{23} от величины Φ_{in} представлен на рис. 3(б), и его возможная аппроксимация (с точностью до знака и константы) как раз и имеет вид функции Гаусса.

Видно, что потоковый кубит с относительно большой щелью в спектре энергий (см. рис. 3(а)) после определенной модификации может работать в качестве базового в нейронных РБФ сетях [29]. Таким же образом могут использоваться (причем без применения потока смещения для задания рабочей точки) и варианты потокового кубита со специфическим поведением собственных значений оператора Гамильтона как функции от Φ_{in} (например, тихий потоковый кубит на основе двухконтракного интерферометра с несинусоидальными ток-фазовыми зависимостями для контактов, см. рис. 1(б) [35–38]).

Подходящим для целей настоящего исследования является режим, когда потенциальный барьер, разделяющий минимумы, велик, туннелирования фазы подавлено, но квантование уровней в потенциальных ямах все еще актуально. Пример нужной зависимости потенциальной энергии от обобщенной координаты и характерного набора собственных значений и собственных функций оператора Гамильтона представлен на рис. 2(б). На практике удобным вариантом физической реализации может оказаться апробированная недавно схема на основе пятиконтракного («twin») интерферометра [36]. Такие кубиты предложены для использования в квантовых метаматериалах, так как их структура обеспечивает сильную связь с распространяющимися

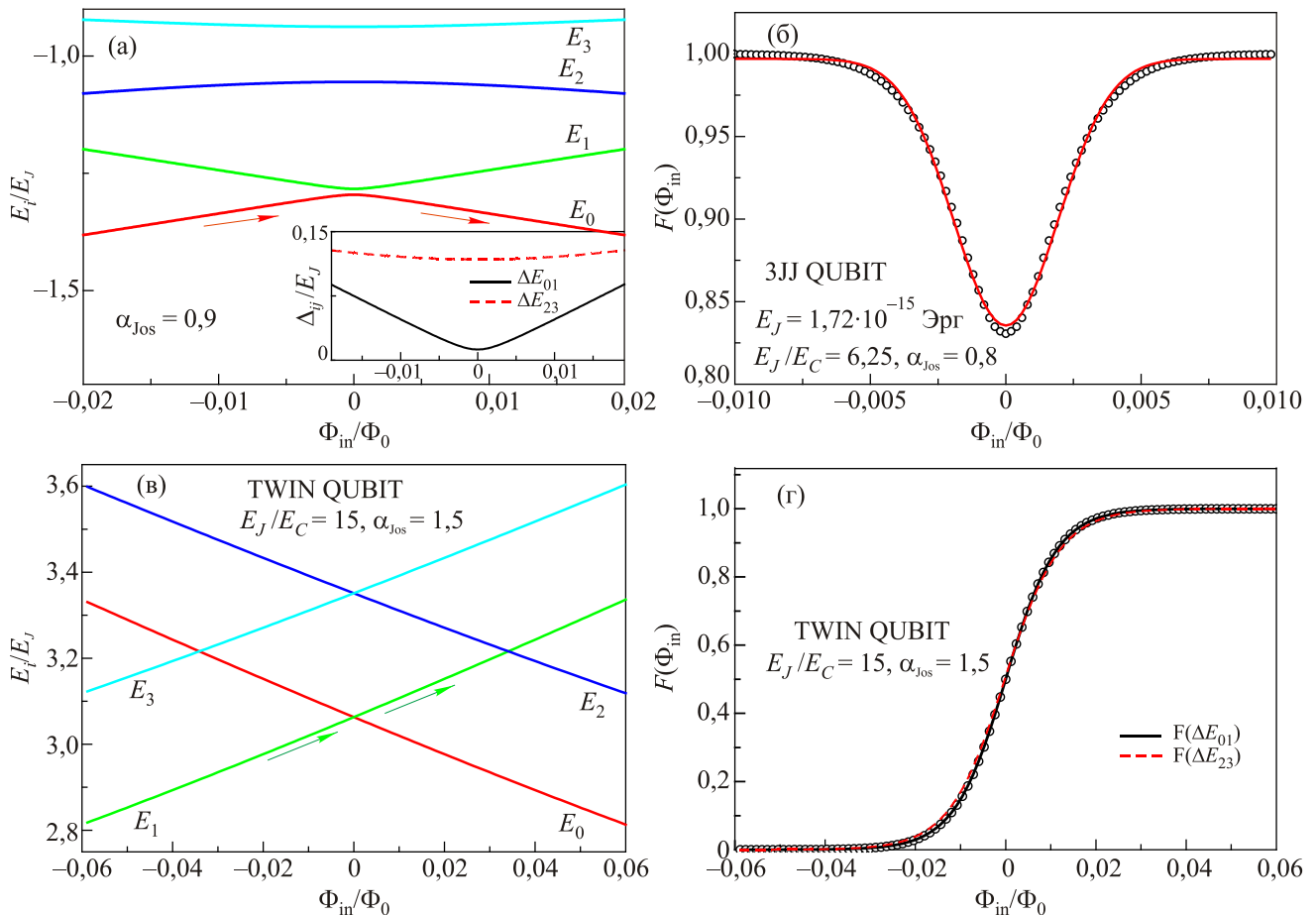


Рис. 3. (Онлайн в цвете) Типичное поведение собственных значений оператора Гамильтона, а также величин ΔE_{01} и ΔE_{23} как функций приложенного сигнала для «реперного» трехконтактного потокового кубита (а) и вытекающий из такого поведения вид преобразования «поток–вероятность» для нейрона на основе потокового кубита (б). Стрелки иллюстрируют эволюцию основного состояния системы под действием импульса магнитного поля, меняющего асимметрию двухъямного потенциала. Рассчитанный по формуле (3) вид преобразования «поток–вероятность» представлен сплошной кривой, точки — аппроксимация при помощи функции Гаусса (4). Характерный вид спектра пятиконтактного кубита для оптимального подбора параметров (в) и преобразование «поток–вероятность» для нейрона на его основе (г). Сплошная и штриховая линии на рис. 3(г) приведены для случаев, когда в качестве базисов используются основное и первое, второе и третье возбужденные состояния соответственно; точки показывают аппроксимацию по формуле (1). Типы кубитов и выбранные для моделирования параметры (соотношения между джозефсоновскими и кулоновскими энергиями используемых гетероструктур E_J/E_C , а также соотношения между джозефсоновскими энергиями контактов, α_{Jos}) указаны на рисунках. За «ноль» приложенного потока на всех рисунках принято значение, равное половине кванта Φ_0 .

электромагнитными волнами при широких возможностях по управлению спектром системы за счет приложения магнитных полей. Кроме того, пятиконтактные (“twin”) кубиты менее чувствительны к флуктуациям потока, чем обычная трехконтактная схема [39]. Если критический ток джозефсоновского контакта в такой схеме в полтора раза больше, чем у любого другого элемента, то расстояние между минимумами потенциальной энергии как функции обобщенной координаты будет достаточно велико (порядка π). В этом случае вероятность квантового туннелирования $(\tau_q)^{-1}$ через барьер будет, как и требуется, весьма малой. Когда подобный элемент используется в качестве нейрона, приложение

импульса магнитного поля ко входу делает вероятность туннелирования Ландау–Зинера между энергетическими уровнями много больше $(\tau_q)^{-1}$, что качественно изменяет поведение спектра под действием приложенного к нейрону сигнала.

Специфика поведения такого «плохого» потокового кубита с пренебрежимо малой щелью в спектре позволяет переопределить величины E_0, E_1, E_2, E_3 , а также и расстояния между уровнями, ΔE_{01} и ΔE_{23} , так, чтобы зависимость последних от нормированной величины приложенного магнитного потока являлась линейной с хорошей точностью. Это и позволяет построить базовый нелинейный элемент нейросети типа персептрона, что

подтверждается приведенными на рис. 3(г) результатами расчета активационной функции по формуле (3): преобразование «поток–вероятность» имеет вид (1) с хорошей точностью. Для выбранных разумных параметров пятиконтактного кубита ($E_J/E_C = 15$, $\alpha_{JOS} = 1,5$) получены следующие характеристические константы для сигмоидальной функции активации: $F_0 = 1$, $x_0 = 0$, $k = 175$. Отдельно отметим, что для пятиконтактного кубита можно относительно просто «развязать» входной и выходной сигналы, как это показано на рис. 1(в).

3. Обсуждение

Дискуссионным остается вопрос о востребованности предложенного принципиального решения для реализации сверхпроводниковых квантовых нейросетей. И в этой связи нужно подчеркнуть, что предложенный нейрон с магнитным представлением информации хорошо укладывается в крайне перспективную концепцию разделения процессов обработки информации по разным частям криогенного вычислительного устройства с разными рабочими температурами [40,41]. В рамках этого подхода заметную часть по предварительной и пост-обработке данных, по управлению квантовой вычислительной системой берут на себя аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, а также специализированные процессоры на основе БОК логики, работающие при относительно высоких температурах (порядка 4 К). Это позволяет, например, более эффективно

использовать охлаждаемую область в рефрижераторе и уменьшить число управляющих каналов, связывающих напрямую область, где выполняются квантовые вычисления (при температуре менее 0,1 К) с электроникой, работающей при комнатной температуре. Общая структурная схема криогенного комплекса для реализации принципов когнитивной обработки информации на основе сверхпроводниковой элементной базы представлена на рис. 4(а). Наша работа позволяет дополнить концепцию многоуровневого криогенного вычислительного комплекса за счет использования сверхпроводящих ИНС, работающих как в классическом, так и в квантовом режиме. Использование в таких ИНС магнитного представления информации облегчает интеграцию с управляющими цепями на основе быстрой одноквантовой логики, а также обработку результатов функционирования квантового блока вычислительной системы [42,43]. Опыт компании D-Wave показал, что такие устройства могут быть использованы для управления активационными функциями нейронов за счет приложения к вспомогательным интерферометрическим контурам контролируемых потоков.

Отдельно стоит обратить внимание на то, что обсуждавшиеся выше потоковые кубиты могут быть использованы для построения индуктивных элементов с памятью [43]. А именно такие элементы могут быть взяты за основу при разработке второго обязательного элемента для ИНС типа персептрона: речь о синапсах —

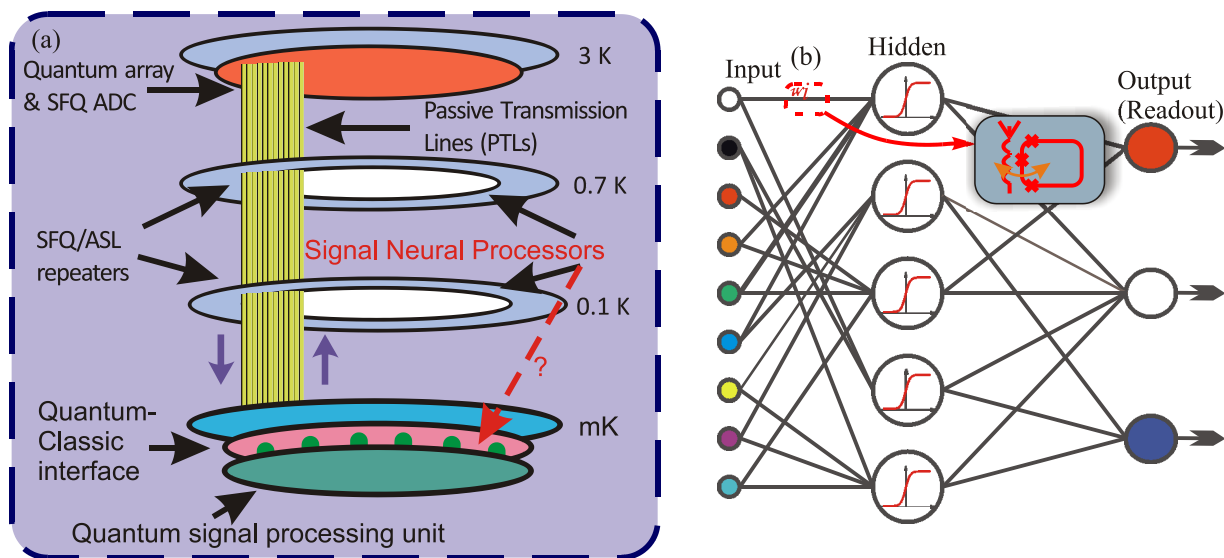


Рис. 4. (Онлайн в цвете) Схема использования классического, нейросетевого и квантового сопроцессоров в составе единого криогенного комплекса для обработки сверхширокополосных и высокочастотных сигналов в режиме реального времени. Связь между классическим, нейросетевым сопроцессорами, квантовым блоком обработки сигнала и высокотемпературным окружением осуществляется через сверхпроводящие микрополосковые гибкие линии с усилителями-преобразователями на всех промежуточных стадиях [40] (а). Схематическое изображение сверхпроводниковой ИНС, способной работать с квантовой информацией. Рассматриваемые в работе нейроны с сигмоидальной функцией активации расположены в среднем, “Hidden”, слое элементов. Цепи считывания состояния нейрона на основе потокового кубита образуют выходной слой сети. На вставке представлена предполагаемая схема «магнитного» синапса на основе квантовой индуктивности с памятью [44] (б).

линейных элементах с настраиваемыми весами w_i . В нашем случае это ячейки «поточковой» нейросети с линейным преобразованием входного сигнала в выходной и возможностью настраивать при помощи цепей БОК логики коэффициент преобразования в таком квантовом трансформаторе (готовить «квантовый» вектор весов w_j) [7]. Схематическое изображение такой поточковой квантовой нейросети представлено на рис. 4(б).

4. Заключение

Продемонстрировано, что можно всего один поточковый кубит использовать в качестве базового элемента квантовых нейронных сетей: подобрав параметры схемы особым образом, можно добиться нужного поведения энергетических уровней под действием приложенного магнитного поля. Это, в свою очередь, дает нужный для нейросетей типа персептрона сигмоидальный закон преобразования приложенного магнитного потока в ток (магнитный поток) в «выходном» контуре базового нелинейного элемента.

Объединение в одном криогенном комплексе и уникальной приемной системы (рабочая частота которой может достигать сотен ГГц), и логических цепей, обеспечивающих первичную обработку (классификацию) поступающих данных, обещает вдобавок ко всему резкое уменьшение потерь и задержек на соединениях между различными частями инфокоммуникационной системы. Предложенный элемент — нейрон на основе кубита позволяет связать в ее составе квантовый и нейросетевой блоки обработки информации.

Авторы признательны А.М. Сатанину за плодотворные обсуждения концепции статьи. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-29-09515 офи_м (раздел 1) и гранта Российского Научного Фонда 17-12-01079 (разделы 2 и 3). А.Щ. признателен Фонду развития теоретической физики и математики «БАЗИС» за предоставленную стипендию.

1. H. Tsai, S. Ambrogio, P. Narayanan, R.M. Shelby, and G.W. Burr, *J. Phys. D* **51**, 283001 (2018).
2. F.M. Bayat, M. Prezioso, B. Chakrabarti, I. Kataeva, and D. Strukov, *Nat. Commun.* **13**, 2331 (2018).
3. J. Torrejon, M. Riou, F.A. Araujo, S. Tsunegi, G. Khalsa, D. Querlioz, P. Bortolotti, V. Cros, K. Yakushiji, A. Fukushima, H. Kubota, S. Yuasa, M.D. Stiles, and J. Grollier, *Nature* **547**, 428 (2017).
4. J. Grollier, D. Querlioz, and M.D. Stiles, *Proc. IEEE* **104**, 2024 (2016).
5. L.S. Smith, *Handbook of Nature-Inspired and Innovative Computing: Integrating Classical Models with Emerging Technologies*, Springer, New York (2006).
6. M. Schuld, I. Sinayskiy, and F. Petruccione, *Quantum Information Processing* **13**, 2567 (2014).

7. F. Tacchino, C. Macchiavello, D. Gerace, and D. Bajoni, *An Artificial Neuron Implemented on an Actual Quantum Processor*, arXiv:1811.02266v1 (2018).
8. S.S. Adjemov, N.V. Klenov, M.V. Tereshonok, and D.S. Chirov, *Moscow Univers. Phys. Bull.* **71**, 174 (2016).
9. А.Н. Омелянчук, Е.В. Ильичев, С.Н. Шевченко, *Квантовые когерентные явления в джозефсоновских кубитах*, Наукова думка, Киев (2013).
10. X.-D. Cai, D. Wu, Z.-E. Su, M.-C. Chen, X.-L. Wang, L. Li, N.-L. Liu, C.-Y. Lu, and J.-W. Pan, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 110504 (2015).
11. M. Benedetti, J. Realpe-Gómez, R. Biswas, and A. Perdomo-Ortiz, *Phys. Rev. A* **94**, 022308 (2016).
12. I.I. Soloviev, N.V. Klenov, S.V. Bakurskiy, M.Yu. Kupriyanov, A.L. Gudkov, and A.S. Sidorenko, *Beilstein J. Nanotech.* **8**, 2689 (2017).
13. S.S. Adjemov, N.V. Klenov, M.V. Tereshonok, and D.S. Chirov, *Program. Comp. Software* **42**, 121 (2016).
14. S.K. Tolpygo, *Fiz. Nizk. Temp.* **42**, 463 (2016) [*Low Temp. Phys.* **42**, 361 (2016)].
15. P. Crotty, D. Schult, and K. Segall, *Phys. Rev. E* **82**, 011914 (2010).
16. O.A. Mukhanov, *IEEE Trans. Applied Supercond.* **21**, 760 (2011).
17. J. Ren and V.K. Semenov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**, 780 (2011).
18. A.Yu. Herr, Q.P. Herr, O.T. Oberg, O. Naaman, J.X. Przybysz, P. Borodulin, and S.B.J. Shauck, *Appl. Phys.* **113**, 033911 (2013).
19. N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *Supercond. Sci. Technol.* **26**, 035010 (2013).
20. A.F. Kirichenko, I.V. Vernik, J.A. Vivalda, R.T. Hunt, and D.T. Johannes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25**, 1300505 (2015).
21. Y. Mizugaki, K. Nakajima, Y. Sawada, and T. Yamashita, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 762 (1993).
22. Y. Yamanashi, K. Umeda, and N. Yoshikawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23**, 1701004 (2013).
23. T. Onomi and K. Nakajima, *J. Phys.: Conf. Ser.* **507**, 042029 (2014).
24. I.I. Soloviev, N.V. Klenov, S.V. Bakurskiy, V.V. Bol'ginov, V.V. Ryazanov, M.Y. Kupriyanov, and A.A. Golubov, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 242601 (2014).
25. A. Ozaeta, A.S. Vasenko, F.W.J. Hekking, and F.S. Bergeret, *Phys. Rev. B* **86**, 060509(R) (2012).
26. M.L. Schneider, C.A. Donnelly, S.E. Russek, B. Baek, M.R. Pufall, P.F. Hopkins, P.D. Dresselhaus, S.P. Benz, and W.H. Rippard, *Sci. Adv.* **4**, e1701329 (2018).
27. F. Chiarello, P. Carelli, M.G. Castellano, and G. Torrioli, *Supercond. Sci. Technol.* **26**, 125009 (2013).
28. N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *Supercond. Sci. Technol.* **26**, 035010 (2013).
29. A.E. Schegolev, N.V. Klenov, I.I. Soloviev, and M.V. Tereshonok, *Beilstein J. Nanotech.* **7**, 1397 (2016).
30. H. Katayama, T. Fujii, and N. Hatakenaka, *J. Appl. Phys.* **124**, 152106 (2018).

31. H. Grabert, P. Olschowski, and U. Weiss, *Phys. Rev. B* **36**, 1931 (1987).
32. A. Fedorov, P. Macha, A.K. Feofanov, C.J.P.M. Harmans, and J.E. Mooij, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 170404 (2011).
33. I.I. Soloviev, A.E. Schegolev, N.V. Klenov, S.V. Bakurskiy, M.Yu. Kupriyanov, M.V. Tereshonok, A.V. Shadrin, V.S. Stolyarov, and A.A. Golubov, *J. Appl. Phys.* **124**, 152113 (2018).
34. A.V. Kuznetsov and N.V. Klenov, *Moscow University Physics Bulletin* **72**, No. 3, 287 (2017).
35. N. Klenov, V. Kornev, and N. Pedersen, *Phys. C* **435**, 114 (2006).
36. V.I. Shnyrkov, A.A. Soroka, S.I. Melnyk, *Fiz. Nizk. Temp.* **34**, 773 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 610 (2008)].
37. N.V. Klenov, N.G. Pugach, A.V. Sharafiev, S.V. Bakurskiy, and V.K. Kornev, *Phys. Solid State* **52**, 2246 (2010).
38. I. Askerzade, *Fiz. Nizk. Temp.* **41**, 315 (2015) [*Low Temp. Phys.* **41**, 241 (2015)].
39. K.V. Shulga, E. Il'ichev, M.V. Fistul, I.S. Besedin, S. Butz, O.V. Astafiev, U. Hübner, and A.V. Ustinov, *Nature Commun.* **9**, 150 (2018).
40. R. McDermott, M.G. Vavilov, B.L.T. Plourde, F.K. Wilhelm, P.J. Liebermann, O.A. Mukhanov, and T.A. Ohki, *Quantum Science and Technology* **3**, 024004 (2018).
41. J.M. Shainline, S.M. Buckley, R.P. Mirin, and S.W. Nam, *Phys. Rev. Appl.* **7**, 034013 (2017).
42. N.V. Klenov, A.V. Kuznetsov, I.I. Soloviev, S.V. Bakurski, and O.V. Tikhonova, *Beilstein J. Nanotech.* **6**, 1946 (2015).
43. N. Kouda, N. Matsui, H. Nishimura, F. Peper, *Neural Comput. & Applic.* **14**, 114 (2005).
44. S.N. Shevchenko, Y.V. Pershin, and F. Nori, *Phys. Rev. Appl.* **6**, 014006 (2016).

Нейрон на основі одного потокового кубіта

М.В. Кльонон, О.В. Кузнецов, А.Є. Щоголев,
І.І. Солов'йов, С.В. Бакурський, М.Ю. Купріянов,
М.В. Терешонок

Представлено концепцію створення базового елементу над-провідних квантових нейронних мереж на основі тільки одного потокового кубіта. Виконано аналіз поведінки функції активації для різних варіантів реалізації «квантового нейрона» (на основі трьохконтактного, двоконтактного, п'ятиконтактного інтерферометрів); визначено умови, коли ця функція активації близька до сигмоїдального вигляду. Обговорюються перспективи використання енергоефективних модернізацій швидкої одноквантової логіки (ШОК логіки) для управління зв'язками та активаційними функціями при роботі квантової нейронної мережі на основі запропонованих елементів.

Ключові слова: квантові нейронні мережі, потокові кубіти, ШОК логіка.

Neuron based on a single flux qubit

N.V. Klenov, A.V. Kuznetsov, A.E. Schegolev,
I.I. Soloviev, S.V. Bakurskiy, M.Yu. Kupriyanov,
and M.V. Tereshonok

The paper presents the concept of a basic element for superconducting quantum neural networks based on using just single flux qubit. A comparative analysis of various implementation variants for “quantum neurons” with different activation functions (based on three-contact, five-contact, two-contact interferometers) was performed. We have explored the prospects for the use of energy-efficient upgrades of fast single-quantum logic (RSFQ logic) to control transfer and activation functions when operating a quantum neural network based on the proposed “flux” elements.

Keywords: quantum neural networks, streaming qubits, RSFQ logic.