Письма в ЖЭТФ, том 121, вып. 9, с. 760 – 767 © 2025 г. 10 мая

Цифровое управление адиабатическим сверхпроводниковым сигма-нейроном

М. В. Бастракова[+*], *Д. С. Пашин*[+], *Г. И. Губочкин*[*×], *А. Е. Щёголев*[∘∇], *С. В. Бакурский*[∘], *И. И. Соловьев*[*∘], *Н. В. Клёнов*[×1)]

[+]*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет (ННГУ) имени Н. И. Лобачевского, 603022 Н. Новгород, Россия*

[*]*Российский квантовый центр, 121205 Сколково, Россия*

[×]*Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

[∘]*Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ) имени Д. В. Скобельцына, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

[∇]*Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), 111024 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 17 марта 2025 г.
После переработки 4 апреля 2025 г.
Принята к публикации 6 апреля 2025 г.

Адиабатические сверхпроводящие нейроны на основе квантовых параметронов позволяют "вычислять" аналоговым образом сигмоидальные функции активации и их производные за один такт с рекордной энергоэффективностью. Но для практического использования таких систем необходимо найти режимы работы, позволяющие провести интеграцию с джозефсоновскими цифровыми схемами, где информация представляется в виде последовательностей пикосекундных униполярных импульсов напряжения. В данной статье мы на основе теоретического рассмотрения определяем условия, при которых возможно импульсное управление адиабатическим сигма-нейроном. Полученные результаты позволили нам разработать дизайн базового блока аппаратной реализации цифро-аналоговых джозефсоновских нейронных сетей.

DOI: 10.31857/S0370274X25050084, EDN: EINFBT

1. Введение. Адиабатические сверхпроводящие нейронные сети [1–6] со сверхмалой диссипацией энергии (на уровне зептоджоулей на операцию) [7–13] представляют большой интерес для целого ряда приложений, требующих одновременно высокого быстродействия и энергоэффективности. Одним из таких приложений являются схемы для криогенных квантово-классических интерфейсов и сопроцессоров, реализующих алгоритмы коррекции ошибок в квантовых компьютерах и симуляторах. Базовой ячейкой адиабатической искусственной нейронной сети типа персептрон является сигма-нейрон на основе одноконтактного интерферометра с индуктивным шунтированием, схема которого впервые была предложена в работе [14]. Важнейшим преимуществом адиабатического сигма-нейрона является возможность аналогового "вычисления" сигмоидальной функции активации (зависимость выходного сигнала от входных) всего за один такт. Было показано, что требуемый вид функции реализуется при определенном соотношении индуктивных элементов плеч интерферометра как в классическом режиме работы схемы [14, 15], так и в случае квантового функционирования [16, 17]. Однако сделать полностью аналоговую нейронную сеть большой размерности (больше 5–10 нейронов) весьма сложно из-за большого количества настраиваемых и соединительных элементов [18] и громоздкости схем для совершения простейших логико-арифметических операций. Основной вклад этой работы в развитие направления заключается в новом способе практической реализации гибридного цифро-аналогового подхода. В рамках этого подхода часть операций, таких как однотактовое вычисление функции активации, будет выполняться аналоговым способом. Другие же операции, например, сложение и умножение, будут выполняться в цифровом формате, но с использованием аппаратных решений на основе эффекта Джозефсона.

На рисунке 1 представлена концептуальная схема цифро-аналоговой искусственной нейронной сети

1)e-mail: nvklenov@mail.ru

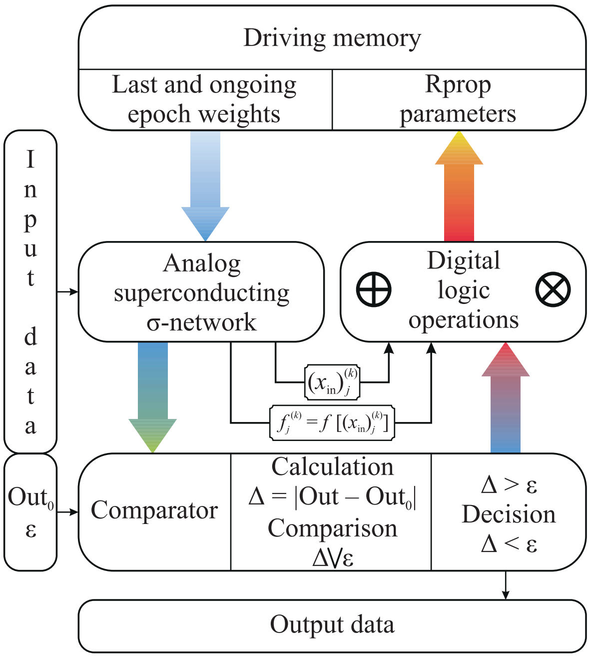

Рис. 1. (Цветной онлайн) Блок-схема цифро-аналоговой реализации сверхпроводниковой нейронной сети на сигма-нейроне (сигма-сеть) с аппаратной реализацией обучения методом обратного распространения ошибки. На схеме $(x_{\rm in})_j^{(k)}$ обозначает суммарный входной сигнал на входе j-го нейрона в k-м слое сети, а $f_j^{(k)} = f\left[(x_{\rm in})_j^{(k)}\right]$ – значение активационной функции j-го нейрона в k-м слое сети при подаче на его вход $(x_{\rm in})_j^{(k)}$

на основе сигма-нейронов (сигма-сеть) с возможностью аппаратного обучения методом обратного распространения ошибки. Выходной сигнал с нейронной сети ("OUT") сравнивается с "идеальным" значением ("OUT$_0$") в ответ на поданный признак ("input data") в блоке "Comparator" (выполненном, например, на основе хорошо известных джозефсоновских компараторов) [19–21]. Если абсолютная разность этих сигналов, Δ, превышает некоторый допустимый порог ε, то запускается процесс обучения, реализованный цифро-аналоговым образом: вычисление значения производной активационной функции производится с помощью аналоговой ячейки [22], а операции перемножения и сложения осуществляются цифровым способом (в блоке "Digital logic operations") [23, 24]. Все заранее вычисленные значения, необходимые для коррекции весовых коэффициентов, подаются в блок памяти ("Driving memory block") [25–27], где хранятся значения весовых коэффициентов как для актуальной эпохи обучения, так и для предыдущей, а также параметры алгоритма обучения (такие как момент и скорость обучения, коэффициент регуляризации). После этого происходит процедура обновления весов сети. Процесс обучения продолжается до тех пор, пока не будет достигнут порог ε.

В данной работе мы покажем, как при джозефсоновской реализации цифрового блока должны выглядеть передаточные характеристики (активационные функции) базового элемента аналоговой части сверхпроводниковой цифро-аналоговой нейронной сети, а также приведем дизайн-шаблоны нейрона с элементами управления и считывания вместе с расчетами, подтверждающими перспективность дальнейшей экспериментальной реализации.

2. Основные принципы цифрового управления сигма-нейроном. Начнем с изучения основных принципов управления базовой ячейкой адиабатической искусственной нейронной сети – сигма-нейроном [1] – посредством коротких униполярных импульсов поля.

Будем рассматривать управление на основе двух концепций: 1) при помощи джозефсоновского генератора импульсов и 2) преобразователя постоянного тока в одиночные пикосекундные импульсы напряжения, связанные с квантами магнитного потока (dc-SFQ converter, преобразователь). В первом подходе, тесно связанном с предшествующими рассмотрениями, входным сигналом де-факто является средний уровень импульсного воздействия, определяемый током питания джозефсоновского генератора. Во втором подходе входным сигналом является частота следования "одноквантовых" импульсов, создаваемых dc-SFQ преобразователем. При этом на первом ("пристрелочном") этапе рассмотрения мы не будем подробно останавливаться на устройстве интерфейсов задания и считывания магнитных сигналов.

Уравнения для описания динамических процессов в сигма-нейроне, изображенном на рис. 2, выводятся из баланса фаз для контуров нейрона и закона Кирхгофа в узлах на втекающие/вытекающие токи:

$$\begin{cases} i + i_a + i_{\rm out} = 0, \\ \varphi + li = i_a l_a + \varphi_{\rm in}(t), \\ \varphi + li - \frac{\varphi_{\rm in}(t)}{2} = i_{\rm out} l_{\rm out}, \end{cases} \tag{1}$$

здесь φ – фаза на джозефсоновском контакте в схеме, токи $i, i_a, i_{\rm out}$ нормированы на критический ток джозефсоновского перехода I_c, а индуктивности $l, l_a, l_{\rm out}$ нормированы на величину $\frac{\Phi_0}{2\pi I_c}$, где Φ_0 – квант магнитного потока. Для изучения динамического режима работы сигма-нейрона с импульсным управлением предполагается, что внешний магнитный поток $\varphi_{\rm in}(t)$ в (1) определен как последовательность из M

прямоугольных униполярных импульсов (с учетом нормировки на квант магнитного потока):

$$\varphi_{\text{in}}(t) = A_0 + A\sum_{i=1}^{M}\left(\Theta(t - iT) - \Theta(t - (iT+\tau))\right), \quad (2)$$

где общий уровень сигнала определяется постоянной составляющей A_0 и уровнем сигнала униполярных прямоугольных импульсов A с длительностью τ и периодом их следования T, что показано схематично на рис. 2. Введено обозначение Θ для функции Хэвисайда. Аппроксимация формы одноквантовых потоковых импульсов в виде прямоугольников обусловлена их короткой длительностью и близостью спектральных характеристик в долгих последовательностях модельных и реальных воздействий [28].

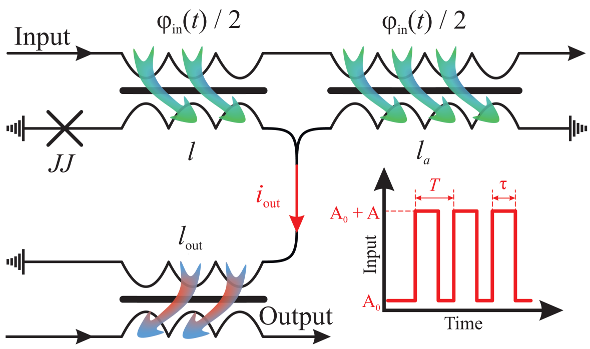

Рис. 2. (Цветной онлайн) Схема сигма-нейрона и цифровые импульсы

В рамках резистивно-емкостной модели шунтированного перехода (RCSJ-модель) уравнение для фазы джозефсоновского контакта φ в сигма-нейроне можно записать как:

$$\beta\ddot{\varphi} + \dot{\varphi} + \sin\varphi = \varphi_{\text{in}}(t)b - \varphi a, \quad (3)$$

где $\beta = \frac{2\pi I_c R_n^2 C}{\Phi_0}$ – параметр МакКамбера, определенный характерными сопротивлением, R_n, и емкостью, C, джозефсоновского контакта, а параметры a и b в (3) определены индуктивными элементами сигма-ячейки [15] как:

$$a = \frac{l_a + l_{\text{out}}}{l l_a + l_{\text{out}}(l + l_a)}, \quad b = \frac{l_a + 2l_{\text{out}}}{2(l l_a + l_{\text{out}}(l + l_a))}. \quad (4)$$

Для удобства расчетов введено безразмерное время $\tilde{t} = \omega_c t$ с учетом характерной джозефсоновской частоты контакта $\omega_c = \frac{2eI_cR_n}{\hbar}$.

Известно, что нелинейная динамика в сигма-нейроне существенно зависит от соотношения индуктивных параметров плеч интерферометра, когда в потенциальном профиле системы может быть один или два положения равновесия при изменении магнитного внешнего воздействия [15]. В связи с этим, для изучения цифрового управления сигма-нейроном следует проанализировать поведение потенциальной энергии системы, $U(\varphi, \varphi_{\text{in}})$, в зависимости от общего уровня сигнала (2). При этом поведение сигма-нейрона удобно рассматривать как движение классической частицы в потенциале вида:

$$U(\varphi, \varphi_{\text{in}}) = \frac{a\varphi^2}{2} - b\varphi\varphi_{\text{in}}(t) - \cos\varphi. \quad (5)$$

Как видно из рис. 3, для потенциальной энергии системы (5) существуют области с одним и двумя локальными минимумами, долины которых показаны

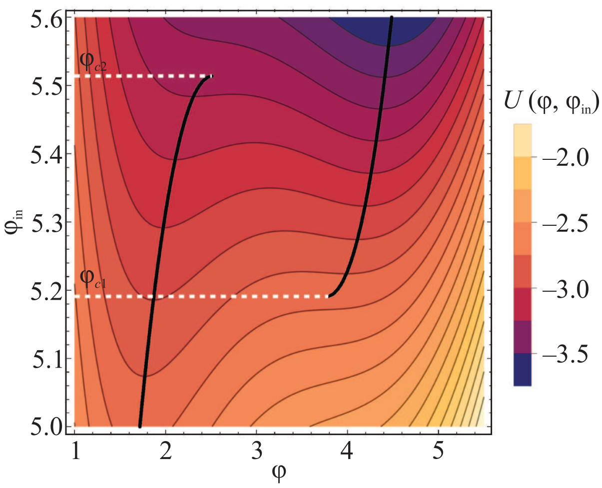

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимость потенциальной энергии U от входного потока φ_{in} и сверхпровящей фазы контакта φ. Черным цветом показаны положения устойчивого равновесия, а белыми штриховыми линиями отделены области уровня сигнала $\varphi_{\text{in}} = \varphi_{c1,2}$, когда существуют два положения равновесия. Параметры: $I_c = 50$ мкА, $C = 25$ пФ, $l = 0.9$, $l_a = l + 1$, $l_{\text{out}} = 0.4$

черными кривыми. С ростом внешнего поля φ_{in} вид потенциальной энергии заметно меняется: при значениях $\varphi_{in} < \varphi_{c_1}$ существует только левое положение равновесия, а при $\varphi_{\text{in}} > \varphi_{c_2}$ – правое положение равновесия; для промежуточных значений $\varphi_{c_1} \leq \varphi_{\text{in}} \leq$ $\leq \varphi_{c_2}$ (отмечены на рис. 3 белыми штриховыми линиями) имеются 2 локальных минимума, отвечающих разным значениям сверхпроводящей фазы φ. Подобное поведение энергетического “ландшафта” влияет на динамические процессы в сигма-нейроне. Согласно уравнению (3), динамические процессы в резистивно шунтированном джозефсоновском контакте с диссипацией включают осцилляции фазы вблизи положения равновесия, которые затухают с течением времени. В связи с этим имеет смысл провести анализ поведения интегральных величин, таких как средний по времени выходной ток на индуктивности l_{out}:

$$\langle i_{\text{out}} \rangle = \left\langle \frac{\varphi_{\text{in}}(t) - 2l_a(b\varphi_{\text{in}}(t) - a\varphi)}{2(l_a + l_{\text{out}})} \right\rangle, \qquad (6)$$

где $\langle ... \rangle$ – обозначение усреднения по времени, соответствующее установившимся колебаниям фазы.

Для первого подхода к управлению (когда входным сигналом является средний уровень импульсов от джозефсоновского генератора, а потенциальный профиль системы является одноямным) мы проанализировали формирование сигмоидальной функции активации как зависимости среднего выходного тока $\langle i_{\text{out}} \rangle$ от среднего входного потока $\langle \varphi_{\text{in}} \rangle$. На рисунке 4 сигмоидальные активационные функции при различных индуктивностях l формируются аналогично тому, как это происходит в хорошо изученном адиабатическом аналоговом управлении [15].

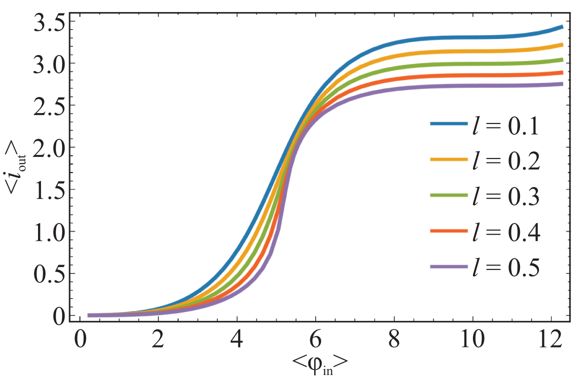

Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимость среднего выходного тока $\langle i_{\text{out}} \rangle$ от среднего входного потока $\langle \varphi_{\text{in}} \rangle$ при различных значениях индуктивности l. Параметры: $I_c = 50$ мкА, $C = 25$ пФ, $\beta = 0.5$, $l_a = l + 1$, $l_{\text{out}} = 0.4$, $\tau = 4$ пс, $T = 2\tau$, $A = 0.5$

Для управления сигма-нейроном при помощи dc-SFQ преобразователя характерными контролируемыми (хотя бы на этапе проектирования) параметрами входного цифрового воздействия служат: а) уровень сигнала униполярных импульсов A, который отвечает за тонкую настройку и переключение между режимами с одним и двумя положениями равновесия, б) частота следования импульсов в управляющей последовательности $1/T$. Влияние данных параметров цифрового сигнала на режимы формирования активационной функции представлено на рис. 5. Видно, что существует диапазон рабочих параметров постоянного уровня сигнала A_0 и частот $1/T$, когда зависимость среднего тока в выходной индуктивности нейрона от частоты импульсов $\langle i_{\text{out}} \rangle(1/T)$ близка к сигмоидальному виду (кривые *2*–*5* на рис. 5).

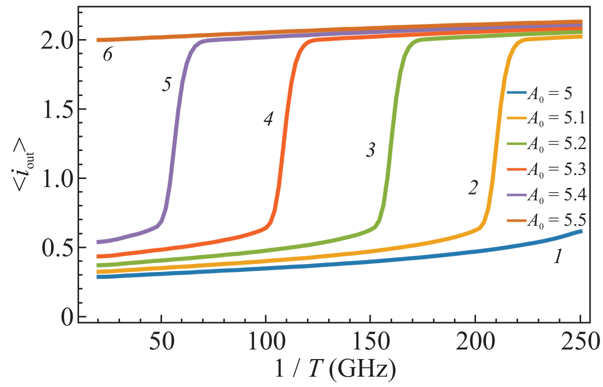

Рис. 5. (Цветной онлайн) Зависимость среднего выходного тока $\langle i_{\text{out}} \rangle$ от частоты следования имульсов $1/T$ при $l = 0.9$ для различных уровней постоянной составляющей сигнала: кривая *1* – $A_0 = 5$, кривая *2* – 5.1, кривая *3* – 5.2, кривая *4* – 5.3, кривая *5* – 5.4, кривая *6* – 5.5. Параметры аналогичны тем, что представлены на рис. 4

Данный режим соответствует характерному поведению энергетического профиля сигма-нейрона в случае, когда общий уровень сигнала $A_0 + A$ превышает φ_{c_2}. В этом случае исчезает левое положение равновесия, при этом система в потенциале ("частица") (5) довольно резко перескакивает в правое положение равновесия. Переход происходит за счет подбора уровня сигнала униполярного воздействия A, придающего частице дополнительный импульс.

На рисунке 6а продемонстрирован вид активационных функций для различных значений A. Можно заметить, что сигмоидальный характер зависимости среднего выходного тока наблюдается только для диапазона индуктивностей, когда в потенциальном профиле системы имеется два положения равновесия ($l > \sqrt{l_{\text{out}}^2 + 1} - l_{\text{out}}$) [15]. При этом для каждой кривой на рис. 6 существуют характерные значения уровней сигнала A, при которых происходит достаточно резкое переключение от малых к большим значениям выходного тока. В этом подходе мы видим качественное отличие от работ [1, 15, 29] по исследованию сигмоидальных активационных функций на основе аналогового потокового управления в сигма-нейроне.

Поскольку при конечном сопротивлении перехода R помимо сверхпроводящего тока через контакт течет нормальная компонента тока $I_n = V/R$, определяемая напряжением на переходе $V = \frac{\hbar}{2e}\frac{d\varphi}{dt}$, в системе происходит диссипация энергии. Мощность тепловыделения определяется выражением:

$$P(t) = \frac{V^2}{R} = \frac{1}{R}\left(\frac{\hbar}{2e}\frac{d\varphi}{dt}\right)^2. \qquad (7)$$

На рисунке 6b представлена зависимость интеграль-

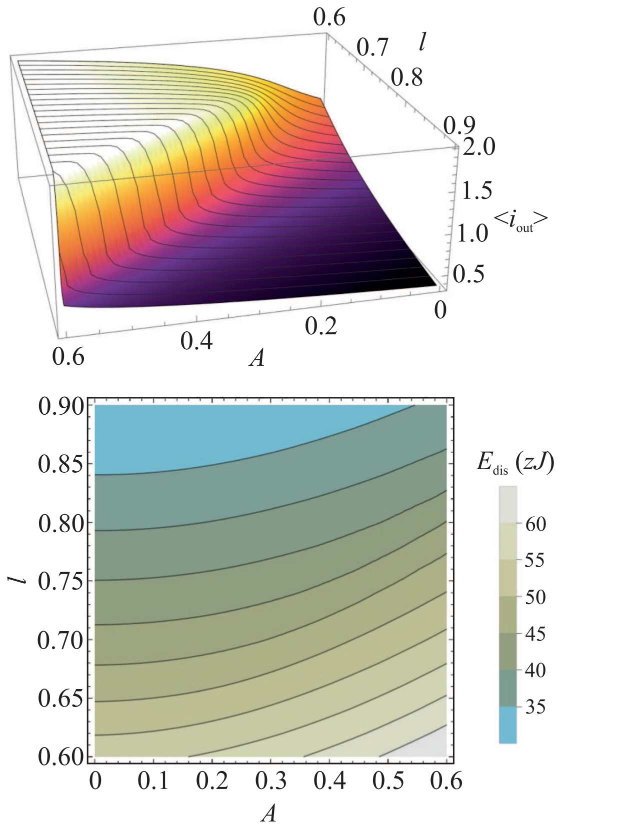

Рис. 6. (Цветной онлайн) (a) – Зависимость среднего выходного тока $\langle i_{\text{out}}\rangle$ и (b) – интегральных диссипативных потерь E_{diss} от уровня униполярных импульсов A и индуктивности l при постоянной составляющей сигнала $A_0 = 5.2$. Остальные параметры системы аналогичны тем, что приведены на рис. 4

ных тепловых потерь $E_{\text{diss}} = \int_0^{t_{\text{eq}}} P(t)dt$ от уровня униполярных импульсов A и индуктивности l при постоянной составляющей сигнала A_0, где t_{eq} – время установления динамического равновесия в системе, соответствующее завершению всех переходных процессов. Рассчитанные значения диссипации энергии порядка десятков зептоджоулей подтверждают перспективность предложенной архитектуры для создания энергоэффективных гибридных систем.

5. Проектирование и расчет характеристик экспериментальной реализации сигма-нейрона. Рассмотрим аппаратную реализацию аналогового сигма-нейрона, когда на последний будут воздействовать не модельные прямоугольные импульсы, а униполярные импульсы магнитного поля, порождаемые джозефсоновской генерацией на контакте в составе цифровой схемы входного интерфейса (рис. 7). Проведем анализ процессов в системе, имитирующей часть функционирующей гибридной нейронной сети, вводя в рассмотрение входную цепь с простейшим генератором импульсов JJ_G. В разработанной тестовой структуре контакт подключен параллельно контрольной линии с входными индуктивностями L_{CL} и резистором R, который препятствует образованию сверхпроводящей закоротки (рис. 7, блок “Input interface”).

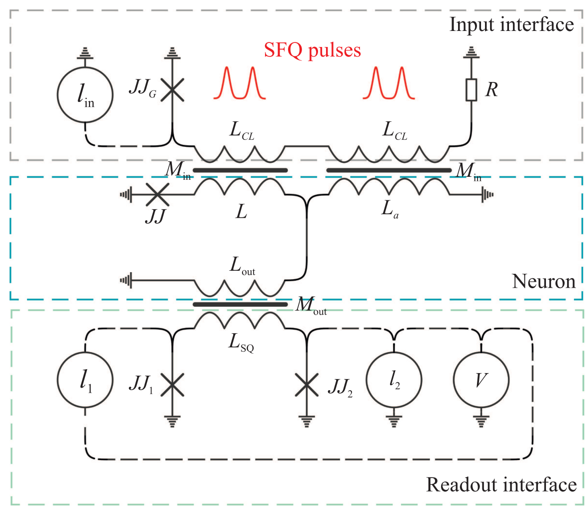

Рис. 7. (Цветной онлайн) Схема сигма-нейрона с импульсным управлением для его экспериментальной реализации. “Input interface” включает в себя контрольную линию с джозефсоновским контактом для генерации импульсов. “Neuron” представляет собой сигма-нейрон. “Readout interface” содержит считывающий интерфейс в виде двухконтактного интерферометра (DC СКВИДа)

Для оценки величины выходного тока i_{out}, в системе уравнений (1) необходимо положить $\varphi_{\text{in}}(t) = 2m_{\text{in}}i_R$ и дополнить ее следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \varphi_G = 2l_{CL}i_R + \varphi_R + m_{\text{in}}(i_a - i), \\ i_{\text{in}} = i_G + i_R, \\ i_G = \beta i_{CG}\ddot{\varphi}_G + \frac{1}{r_{nG}}\dot{\varphi}_G + i_{CG}\sin\varphi_G, \\ \dot{\varphi}_R = i_R r, \end{cases} \tag{8}$$

здесь i_{in} – входной ток питания, i_R – ток через резистор, i_G – ток через джозефсоновский контакт-генератор и i_{CG} – критический ток генератора, нормированные на критический ток I_C контакта в сигма-нейроне; r_{nG} – нормальное сопротивление контакта JJ_G и r – сопротивление резистора, нормированные на нормальное сопротивление контакта R_n в нейроне; l_{CL} – нормированная индуктивность контрольной линии и m_{in} – взаимная индуктивность между линией и нейроном. Здесь также учтено, что в распространенной технологии изготовления туннельных контактов сверхпроводник/изолятор/сверхпроводник (SIS-контакт) критические токи контактов относятся как их емкости.

На рисунке 8 представлена зависимость численно рассчитанного тока $\langle i_{\text{out}}\rangle$ через выходную индуктивность L_{out} нейрона от тока i_{in} через контрольную линию с джозефсоновским генератором импульсов. Связь между входным током и средним нормированным магнитным потоком на входе $\langle \varphi_{\text{in}}\rangle$ показана на вставке к рис. 8. Видно, что передаточная характеристика ожидаемо близка к сигмоидальной форме, что обеспечит корректное функционирование нейронной сети в целом и согласуется с расчетами предыдущего раздела, см. рис. 4. Для того чтобы исследовать вид этой зависимости в эксперименте, мы добавили считывающий двухконтактный СКВИД (рис. 7, блок "Readout interface").

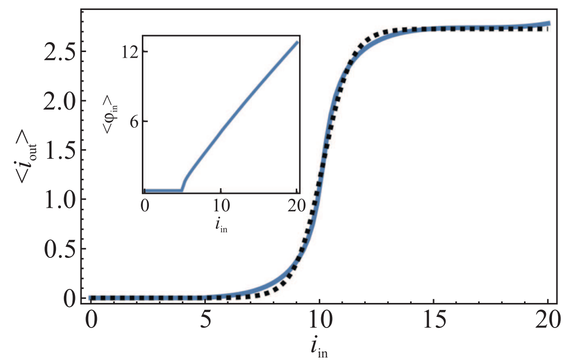

Рис. 8. (Цветной онлайн) Синей сплошной кривой показана зависимость среднего тока $\langle i_{\text{out}}\rangle$ через выходную индуктивность от тока i_{in} через контрольную линию. Черной штриховой линией нанесена сигмоидальная функция вида $\sigma(x) = \frac{2.72}{1+\exp(-1.63(x-10.16))}$, среднеквадратичное отклонение от которой сотавляет 0.042, а коэффициенты в $\sigma(x)$ найдены на основе градиентного спуска. На вставке показана зависимость среднего входного потока $\langle \varphi_{\text{in}}\rangle$ от входного тока i_{in}. Параметры системы: $l = 0.5, l_a = 1.5$, $l_{\text{out}} = 0.4$, $l_{CL} = 1.1$, $m_{\text{in}} = 0.6$, $i_{CG} = 5$, $r = 0.146$, $r_{nG} = 0.197$

Экспериментальная реализация сигма-нейрона с импульсным управлением была спроектирована под ниобиевый технологический процесс ИРЭ РАН (рис. 9a, https://nanolith.ru/unu.html). В качестве сверхпроводящего экрана и общей земли выступает слой $M0$ толщиной 200 нм. Индуктивности и электроды джозефсоновских контактов располагаются в слоях $M1$ и $M2$ (250 и 350 нм соответственно). Проводящие слои разделены слоями изоляторов $I0$ и $I1$, состоящими из $\mathrm{Nb_2O_5}$ толщиной 50 нм и $\mathrm{SiO_2}$ 200 нм (для $I0$) и $\mathrm{SiO_2}$ 370 нм (для $I1$). Слой для резисторов $R1$ выполнен из молибдена толщиной 80 нм и располагается между слоями $I1$ и $M2$.

Джозефсоновский SIS-переход (рис. 9b) формируется в области контакта слоя $M2$ со слоем $M1$ через слабую связь, выполненную в виде прослойки оксида алюминия толщиной 1 нм. При необходимости может быть добавлен резистивный шунт, выполненный в виде "мостика" между слабой связью и соединением $M1$ и $M2$, которое достигается травлением слоя $I1$. Джозефсоновские контакты в схеме с нейроном имеют общее заземление, что также достигается травлением слоя $I0$ до $M0$.

При проектировании сигма-нейрона с входным и выходным интерфейсами мы ориентировались на набор параметров структурных элементов, при которых были получены удовлетворительные результаты имитационного моделирования (рис. 8). Контрольная линия располагается в слое $M1$ (рис. 10). Поверх нее в слое $M2$ лежат входные индуктивные плечи нейрона. Такое расположение обеспечивает максимально возможную взаимную индуктивность. Заметим, что паразитная индуктивность джозефсоновского контакта также дает вклад в общую индуктивность плеча. По этой причине сток на землю расположен вдоль линии шунта. Это увеличивает площадь растекания тока и уменьшает индуктивность этого участка. Выходная индуктивность располагается в слое $M1$ под индуктивностью СКВИДа. Близкое расположение контрольной линии к считывающему СКВИДу приводит к появлению в передаточной характеристике линейной компоненты, как это наблюдалось в результатах работ [29, 30]. Для минимизации этой линейной компоненты плечи нейрона и контрольная линия расположены на одной прямой с выходной индуктивностью и индуктивностью СКВИДа. Расчет индуктивностей выполнялся в версии 3D-MLSI, учитывающей перепады высот в слоях [31–33]. Взаимные индуктивности между контрольной линией и индуктивностью СКВИДа по оценкам составляют $< 10^{-2}$ пГн. По периметру схема обрамляется отверстиями в сверхпроводящем экране, выступающими в роли ловушек для вихрей (фиолетовые квадраты и прямоугольники на рис. 10).

4. Заключение. В этой работе мы продемонстрировали, как создать сигма-нейрон с сигмоидальной передаточной характеристикой при импульсном управлении. Этот нейрон может служить основой для нейросетей, подобных персептрону. Его можно включать в схемы цифровой сверхпроводниковой логики, что позволяет реализовать концепцию цифро-аналоговой сверхпроводниковой нейронной сети.

Важно отметить, что благодаря переходу к новому способу управления, мы значительно расширили динамический диапазон адиабатического нейрона по

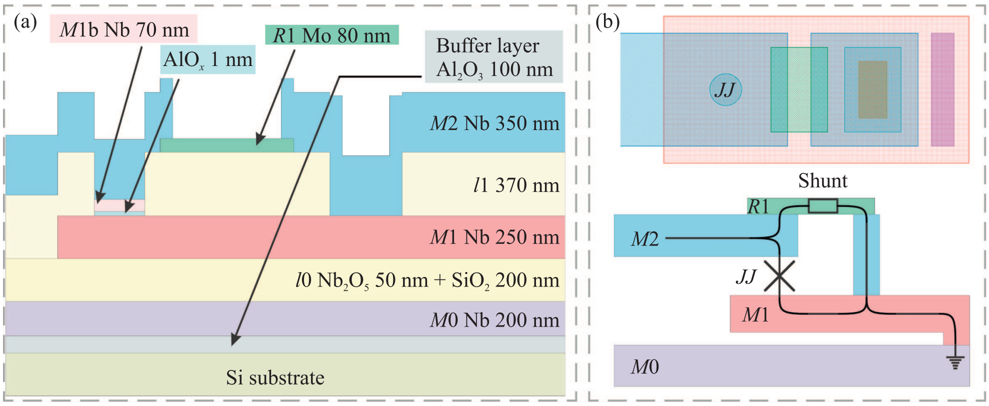

Рис. 9. (Цветной онлайн) (a) – Визуализация многослойного технологического процесса ИРЭ РАН с обозначением расположения и толщин слоев для экспериментальной реализации сигма-нейрона. (b) – Литографический шаблон джозефсоновского перехода (вид сверху) и его эквивалентная схема (вид сбоку)

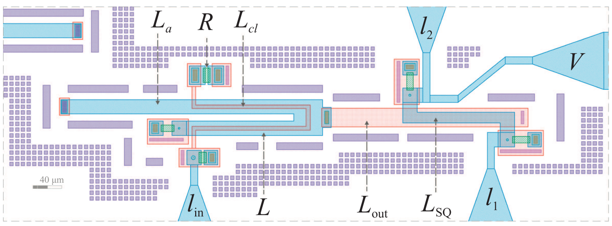

Рис. 10. (Цветной онлайн) Дизайн-шаблон спроектированного сигма-нейрона с импульсным управлением и считывающим СКВИДом. Параметры контрольной линии: $I_{CG} = 250$ мкА, $R_{nG} = 0.27$ Ом, $\beta_G = 0.1$, $L_{CL} = 6.52$ пГн, $M_{\text{in}} = 3.9$ пГн, $R = 0.2$ Ом; параметры нейрона: $I_C = 50$ мкА, $R_n = 1.37$ Ом, $\beta = 0.1$, $L = 3.27$ пГн, $L_a = 9.8$ пГн, $L_{\text{out}} = 2.67$ пГн, $M_{\text{out}} = 2.6$ пГн; параметры считывающего СКВИДа (джозефсоновские контакты идентичные): $I_{CI} = 75$ мкА, $R_{nI} = 2.04$ Ом, $\beta_I = 0.5$, $L_{SQ} = 5.52$ пГн

магнитному потоку. Это связано с тем, что, меняя частоту следования импульсов при фиксированном уровне, мы получаем возможность работы внутри одного периода передаточной характеристики ячейки, одновременно сохраняя ее функциональность. К тому же мы оказались избавлены от необходимости подключать громоздкий цифро-аналоговый преобразователь ко входу нейрона.

В перспективе мы планируем рассмотреть возможность использования "конвейерной" или итеративной сигма-сети, архитектура которой устроена таким образом, чтобы итеративно воспроизводить работу отдельных частей (блоков) программно реализованного (*референсного*) персептрона. Идея подхода заключается в том, чтобы при аппаратной реализации заменить большую референсную нейронную сеть со всеми перекрестными связями между слоями единственным слоем быстрых и энергоэффективных аналоговых сигма-нейронов. Количество таких элементов будет соответствовать размерности аппаратной нейронной сети. Работа такой аппаратной реализации будет состоять в последовательном, итеративном воспроизведении функционирования отдельных частей референсной нейросети, разбитой на блоки внутри одного слоя (размер блока – количество нейронов – будет соответствовать размерности аппаратной нейронной сети), с последующим домножением результатов вычисления каждого нейрона блока на матрицу весовых коэффициентов и вычислением суммарного сигнала от всего слоя сети. Далее результирующий сигнал снова подается на слой аналоговых сигма-нейронов, которые имитируют работу блока нейронов следующего слоя референсной нейронной сети. Процесс будет повторятся до тех пор, пока итеративная сеть не доберется до последнего, выходного слоя и не выдаст результат своей работы.

На первом шаге таких исследований мы разработали дизайн тестовой структуры, призванной продемонстрировать работоспособность концепции сигма-нейрона с импульсным управлением под многослойную ниобиевую технологию с использованием шунтированных SIS-контактов, и апробировали его при помощи имитационного моделирования.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору В. П. Кошельцу за ценные комментарии по поводу дизайна тестовых образцов и технологических процессов их изготовления.

Финансирование работы. Теоретическое рассмотрение воздействия прямоугольных импульсов на сигма-нейрон, а также формирование технического задания для проектирования образцов выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект # 22-72-10075). Концепция аналого-цифровой нейросети с сигма-ячейками разработана в рамках государственного задания Московского государдтсвенного университета имени М. В. Ломоносова. А. Е. Щеголев благодарит за поддержку Фонд развития теоретической физики и математики "Базис" (грант 22-1-3-16-1).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. 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**(15), 152113 (2018).
2. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, I. I. Soloviev, M. Yu. Kupriyanov, M. V. Tereshonok, and A. S. Sidorenko, Beilstein J. Nanotechnol. **13**(1), 444 (2022).
3. M. Schneider, E. Toomey, G. Rowlands, J. Shainline, P. Tschirhart, and K. Segall, Supercond. Sci. Technol. **35**(5), 053001 (2022).
4. T. Yamauchi, H. San, N. Yoshikawa, and O. Chen, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**(5), 1 (2023).
5. T. Yamauchi, N. Takeuchi, N. Yoshikawa, H. San, and O. Chen, Supercond. Sci. Technol. **37**(9), 095027 (2024).
6. G. Zhu, Y. Kan, R. Zhang, Y. Nakashima, W. Luo, N. Takeuchi, N. Yoshikawa, and O. Chen, Supercond. Sci. Technol. **37**(9), 095022 (2024).
7. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, Supercond. Sci. Technol. **28**, 015003 (2014).
8. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, Sci. Rep. **4**(1), 1 (2014).
9. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, Phys. Rev. Appl. **4**(3), 034007 (2015).
10. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, Sci. Rep. **7**(1), 75 (2017).
11. C. L. Ayala, T. Tanaka, R. Saito, M. Nozoe, N. Takeuchi, and N. Yoshikawa, IEEE J. Solid-State Circuits **56**(4), 1152 (2020).
12. R. Fu, M. Wang, Y. Kan, O. Chen, N. Yoshikawa, B. Yu, and T.-Yi Ho, IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst. **44**(3), 975 (2024).
13. S. K. Tolpygo, E. B. Golden, C. L. Ayala, L. Schindler, M. A. Johnston, N. Parmar, and N. Yoshikawa, IEEE Trans. Appl. Supercond. **35**(5), 1 (2025).
14. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, and M. V. Tereshonok, Beilstein J. Nanotechnol. **7**(1), 1397 (2016).
15. M. Bastrakova, A. Gorchavkina, A. Schegolev, N. Klenov, I. Soloviev, A. Satanin, and M. Tereshonok, Symmetry **13**(9), 1735 (2021).
16. M. V. Bastrakova, D. S. Pashin, D. A. Rybin, A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, A. A. Gorchavkina, and A. M. Satanin, Beilstein J. Nanotechnol. **13**, 653 (2022).
17. D. S. Pashin, P. V. Pikunov, M. V. Bastrakova, A. E. Schegolev, N. V. Klenov, and I. I. Soloviev, Beilstein J. Nanotechnol. **14**, 1116 (2023).
18. D. S. Pashin, M. V. Bastrakova, D. A. Rybin, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, and A. E. Schegolev, Nanomaterials **14**(10), 854 (2024).
19. I. N. Askerzade, Technical Physics **51**, 393 (2006).
20. Th. J. Walls, D. V. Averin, and K. K. Likharev, IEEE Trans. Appl. Supercond. **17**(2), 136 (2007).
21. T. V. Filippov, A. Sahu, M. E. Celik, D. E. Kirichenko, M. Habib, and D. Gupta, IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**(5), 1 (2021).
22. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, and M. V. Tereshonok, Supercond. Sci. Technol. **34**(1), 015006 (2020).
23. I. Nagaoka, K. Ishida, M. Tanaka, K. Sano, T. Yamashita, T. Ono, K. Inoue, and A. Fujimaki, IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**(5), 1 (2021).
24. D. Vasudevan and G. Michelogiannakis, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**(5), 1 (2023).
25. A. Ozaeta, A. S. Vasenko, F. W. J. Hekking, and F. S. Bergeret, Phys. Rev. B **86**(6), 060509 (2012).
26. T. I. Larkin, V. V. Bol'ginov, V. S. Stolyarov, V. V. Ryazanov, I. V. Vernik, S. K. Tolpygo, and O. A. Mukhanov, Appl. Phys. Lett. **100**(22), 222601 (2012).
27. L. N. Karelina, R. A. Hovhannisyan, I. A. Golovchanskiy, V. I. Chichkov, A. Ben Hamida, V. S. Stolyarov, L. S. Uspenskaya, Sh. A. Erkenov, V. V. Bolginov, and V. V. Ryazanov, J. Appl. Phys. **130**(17), 173901 (2021).
28. V. Vozhakov, M. Bastrakova, N. Klenov, A. Satanin, and I. Soloviev, Quantum Science and Technology **8**(3), 035024 (2023).
29. А. С. Ионин, Н. С. Шуравин, Л. Н. Карелина, А. Н. Россоленко, М С. Сидельников, С. В. Егоров, В. И. Чичков, М. В. Чичков, М. В. Жданова, ЖЭТФ **164**(6), 1008 (2023).
30. Н. С. Шуравин, Л. Н. Карелина, А. С. Ионин, Ф. А. Разорёнов, М. С. Сидельников, С. В. Егоров, В. В. Больгинов, Письма в ЖЭТФ **120**(11), 863 (2024).
31. M. M. Khapaev, A. Yu. Kidiyarova-Shevchenko, P. Magnelind, and M. Yu. Kupriyanov, IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**(1), 1090 (2001).
32. M. M. Khapaev, M. Yu. Kupriyanov, E. Goldobin, and M. Siegel, Supercond. Sci. Technol. **16**(1), 24 (2002).
33. M. M. Khapaev and M. Yu. Kupriyanov, Supercond. Sci. Technol. **28**(5), 055013 (2015).