

Экспериментальное исследование передаточной функции прототипа сверхпроводящего гаусс-нейрона

А. С. Ионин^{ID+*}, Л. Н. Карелина^{ID+}, Н. С. Шуравин^{ID+}, М. С. Сидельников^{ID+}, Ф. А. Разоренов^{ID+*},
С. В. Егоров^{ID+}, В. В. Больгинов^{ID+1)}

⁺Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия

^{*}Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный, Россия

Поступила в редакцию 3 октября 2023 г.

После переработки 19 октября 2023 г.

Принята к публикации 20 октября 2023 г.

В работе представлено первое измерение передаточной функции шунтированного двухконтактного интерферометра, ранее предложенного в качестве базового элемента сверхпроводящих нейронных сетей на основе радиальных базисных функций. Образец был реализован в виде многослойной тонкопленочной структуры над толстым сверхпроводящим экраном с индуктивной подачей входного сигнала и считыванием выходного. Обнаружено, что передаточная функция является суммой двух компонент: линейной и периодической куполообразной. Линейная компонента вызвана, по-видимому, непосредственной передачей входного магнитного потока в измерительную цепь. Форма нелинейной компоненты, являющейся выходным сигналом гаусс-нейрона, может быть приближенно описана функцией распределения Гаусса, либо, более точно, параметрической зависимостью, выведенной теоретически в предыдущих работах. Показано, что форма передаточной функции гаусс-нейрона может зависеть от выбора рабочей точки измерительной схемы, что благоприятствует разработке интегрированных нейронных сетей на основе реализованных элементов.

DOI: 10.31857/S123456782322010X, EDN: pifztk

1. Введение. Искусственные нейронные сети (ANN²⁾) являются мощным инструментом для оперативной обработки больших объемов неоднородных данных. Перспективным направлением развития нейронных сетей является переход к сверхпроводниковым технологиям, обладающим преимуществами высокой энергоэффективности и быстродействия. Недавно докладывалось о разработке нейроморфных вычислительных устройств (см., например, [1–5]) в рамках концепции быстрой одноквантовой логики (БОК или RSFQ [6]). Эта концепция предполагает кодирование информации в виде пикосекундных импульсов напряжения с частотой в десятки ГГц, что обеспечивает высокое быстродействие RSFQ-устройств [7, 8]. За прошедшие годы было разработано несколько подходов, позволяющих еще сильнее снизить энергопотребление RSFQ-устройств (см. обзор в [9]). В настоящее время различные группы разрабатывают RSFQ-элементы, способные эмулировать поведение биологических нейронов в различных жизненных ситуациях (см., например, [10–13]).

Начиная с 2013 г. разрабатывается семейство адиабатических логических элементов [14–16], в которых энерговыделение может быть уменьшено вплоть до фундаментального предела $kT \ln 2$ в пределе бесконечной длительности логической операции [17]. В цикле работ [18–27] было предложено несколько вариантов адиабатических базовых ячеек для создания сверхпроводниковых ANN. Разработанные ячейки представляют собой сверхпроводящие интерферометры, способные принимать и выдавать управляющий сигнал в виде магнитного потока, а также обладающие специальным видом передаточной функции. Например, на основе сверхпроводящего интерферометра, часть контура которого шунтирована дополнительной индуктивностью, может быть построена ячейка, реализующая сигмоидальную³⁾ передаточную функцию [18]. Такая ячейка (сигма-нейрон) необходима для создания сверхпроводящего персептрона, который является

¹⁾ e-mail: bolg@issp.ac.ru

²⁾ От англ. Artificial Neural Networks.

³⁾ Под сигмоидальной понимается класс гладких, монотонно возрастающих нелинейных функций, вид которых может описываться логистической функцией (вида $1/(1 - \exp(-kx))$), функцией гиперболического тангенса, функцией ошибок и др.

наиболее распространенным и разработанным типом нейронных сетей [28].

Для другого типа нейронных сетей (так называемых сетей радиальных базисных функций) передаточная функция нейрона должна быть близка к производной некоторой сигмоидальной зависимости. Таким свойством обладает, например, функция распределения Гаусса $\exp(-(x - x_c)^2/2\sigma^2)$, являющаяся производной функции ошибок. Гауссова передаточная функция может быть реализована для двухконтактного интерферометра, шунтированного дополнительной индуктивностью (см. рис. 1), который

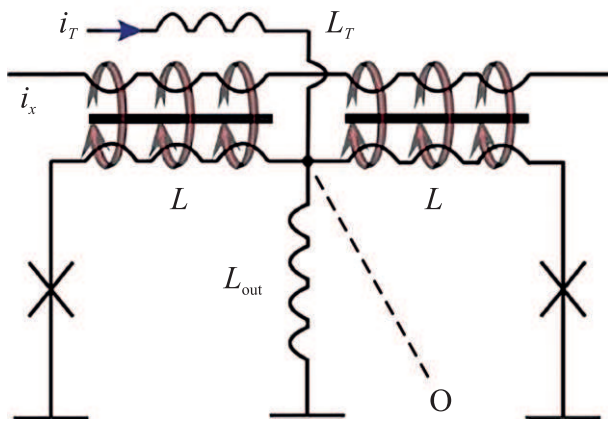


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схематическое изображение гаусс-нейрона, предложенного в статьях [18, 19]. Крестами обозначены контакты Джозефсона, волнистыми линиями – индуктивные элементы схемы. Обозначения индуктивностей нейрона приведены в соответствии с более поздними теоретическими работами (см., например, [26, 24])

далее будет называться гаусс-нейрон или G-нейрон [18, 19, 23, 24, 26]. В данной работе мы представляем первую практическую реализацию сверхпроводящего гаусс-нейрона и анализируем форму экспериментально измеренной передаточной функции.

2. Изготовление и устройство образца.

Сверхпроводящий гаусс-нейрон, схематически изображенный на рис. 1, может быть описан как совокупность трех “плеч”, имеющих общую точку соединения “О”, а другим концом подключенных к общему сверхпроводящему электроду (“земля”, “Gnd”). Правое и левое плечи могут быть названы “джозефсоновскими” или “приемными”, поскольку каждое из них содержит контакт Джозефсона (КД), а также индуктивный элемент L , принимающий входной сигнал (магнитный поток). Третье плечо (“выходное”) образуется элементом L_{out} , создающим выходной сигнал (магнитный поток) при проте-

кании тока I_{out} , величина которого определяется уравнениями состояния гаусс-нейрона. Совокупность приемных плеч образует двухконтактный интерферометр с индуктивностью контура $2L$ (“приемный контур”), а выходная индуктивность может рассматриваться как шунтирующая для любого джозефсоновского плеча. Совокупности выходного и одного из джозефсоновских плеч образуют частичные контуры гаусс-нейрона. В каждом из контуров должно выполняться условие баланса фаз, однако только два из них являются линейно независимыми.

Входной сигнал на рис. 1 задается током i_x , протекающим по контрольной линии (CL), индуктивно связанной с приемными элементами L . Еще одна сигнальная линия предназначена для пропускания тока i_T через индуктивность L_{out} с целью изменения начального потока через частичные контуры гаусс-нейрона. Заметим, что начальный поток, обозначаемый далее Φ_b ⁴⁾, имеет разный знак для частичных контуров нейрона и поэтому не влияет на полный поток через приемный контур. Отметим также, что задание и считывание входного и выходного сигналов через специально выделенные индуктивности определяет проектирование образца в виде тонкопленочной структуры, расположенной над толстым сверхпроводящим экраном. В этом случае магнитное поле каждого полоска с током локализуется в зазоре между полоском и экраном, не влияя, практически, на остальные индуктивные элементы [29].

Для изготовления образца был использован 8-стадийный технологический процесс, состоящий из следующих этапов: осаждение 3-слойной заготовки Nb – AlO_x – Nb; формирование геометрии контактов Джозефсона (мезы) в виде квадратов с размером стороны 14 мкм; формирование геометрии сверхпроводящего экрана в виде прямоугольника размером 220×290 мкм; формирование первого слоя изоляции SiO толщиной 330 нм; формирование “индуктивного” слоя ниобия толщиной 100 нм; формирование второго слоя изоляции толщиной 330 нм; формирование шунтирующих резисторов из сплава Cu_2Al толщиной 50 нм; формирование сверхпроводящего замыкания (“wiring”) толщиной 450 нм. Толщина сверхпроводящего экрана составляла 300 нм, что соответствует примерно 4 лондоновским длинам в сверхпроводящем ниобии [30]. Экран одновременно являлся нижним электродом туннельных КД схемы. Толщина верхнего электрода КД составляла 150 нм. На пятом этапе осаждался “промежуточный” слой ниобия (“индуктивный

⁴⁾ От англ. “bias flux” (поток смещения).

слой”), в котором формировались индуктивные элементы нейрона при помощи фотолитографии и последующего плазмохимического травления. Второй слой SiO (этап 6) использовался для изоляции индуктивного слоя в местах наложения со сверхпроводящими линиями, изготовленными на последнем этапе. Изоляция края сверхпроводящего экрана производилась одновременно обоими слоями изоляции. Замыкание индуктивных и резистивных элементов на верхний электрод КД и/или сверхпроводящий экран производились на последнем этапе технологического процесса. В этом случае большая толщина слоя ниобия позволяла сверхпроводящим линиям без разрыва пересекать края окон в слое изоляции большой толщины. Более подробное описание процедуры изготовления образца можно найти в статье [31].

На рисунке 2 приведена микрофотография изготовленного образца, а на рис. 3 – схема проведенного эксперимента

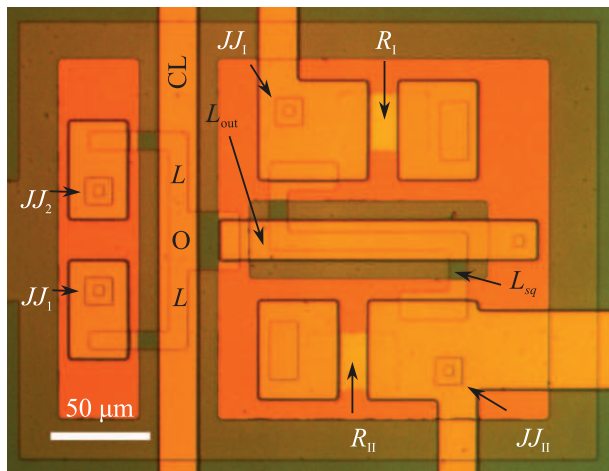


Рис. 2. (Цветной онлайн) Микрофотография изготовленного образца. Обозначения соответствуют рис. 3 (см. также определения в тексте)

эксперимента. Рассмотрение удобно начинать от обшей точки гаусс-нейрона “О”, которая расширяется на рис. 2 в общую зону размером 10×30 мкм. Приемные плечи образца ответвляются в верхнем и нижнем направлениях и замыкаются на экран через контакты Джозефсона $JJ_{1,2}$ слева от контрольной линии CL. Выходная индуктивность L_{out} имеет прямоугольную форму, ответвляется вправо и замыкается на экран через окно размером 6×6 мкм в первом слое изоляции (этап 4). Начальные участки индуктивных элементов (включая зону О) были сформированы на пятом этапе и покрыты дополнительным слоем изоляции (этап 6). Однако полностью сформировать индуктивные элементы на 5-м этапе было невозможно

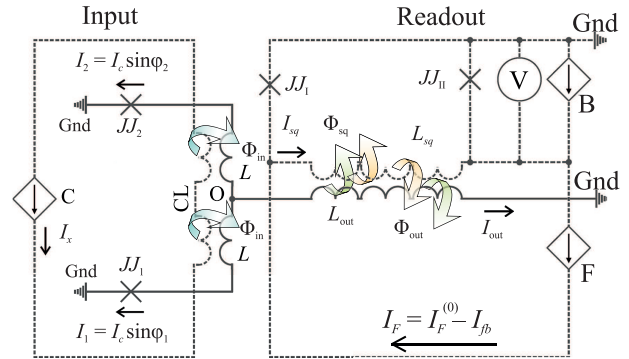


Рис. 3. (Цветной онлайн) Принципиальная схема проведенного эксперимента

из-за малой толщины слоя ниобия (100 нм) по сравнению с толщиной первого слоя изоляции (330 нм). Поэтому каждый индуктивный элемент содержит замыкающий участок шириной 30 мкм, изготовленный на 8 этапе технологического процесса, который способен пересекать края слоев изоляции за счет большой толщины (450 нм). Приемные плечи содержат участки наложения с контрольной линией (CL), одинаковые по размеру. Поэтому задание входного сигнала (магнитного потока) происходит одинаковым образом в каждый частичный контур образца. Сама контрольная линия (этап 8) имеет ширину 20 мкм и отделена от индуктивных элементов (этап 5) нейрона вторым слоем изоляции (этап 6).

Важным элементом схемы (см. рис. 3) является двухконтактный интерферометр (СКВИД⁵⁾), предназначенный для измерения выходного магнитного потока. Наличие такого элемента (отсутствует на рис. 1) подразумевалось, но не учитывалось в теоретических работах [18, 19, 23, 24, 26]. На рисунках 2, 3 этот интерферометр состоит из контактов Джозефсона JJ_I и JJ_{II} , а также индуктивного элемента L_{sq} . Последний элемент частично расположен под промежуточным участком выходной индуктивности нейрона, обеспечивая индуктивную связь между L_{sq} и L_{out} . Элемент L_{sq} формируется на пятом этапе с последующей изоляцией на этапе 6. Каждый контакт измерительного СКВИДа был шунтирован сопротивлением из слоя Cu_2Al толщиной 50 нм номиналом около 2 Ом для однозначности их вольт-амперных характеристик [32, 33].

Индуктивности элементов нейрона, входящие в качестве параметров в уравнения его состояния, могут быть оценены из простых соображений. Напри-

⁵⁾ Сверхпроводящий Квантовый Интерференционный Датчик.

мер, каждое из джозефсоновских плеч состоит из 9 квадратов, изготовленных на 5 и 8 этапах технологического процесса, 6 из которых являются прямыми и 3 поворотными. Используя формулу для индуктивности квадрата сверхпроводящей полосы над толстым сверхпроводящим экраном (см. [29], § 10), получаем $L_{\square}^{(5)} = \mu_0 d_m^{(5)} = 0.6$ пГн. Здесь $d_m^{(5)}$ – магнитная длина “индуктивного” слоя (в основном, изготовленного на пятом этапе), состоящая из двух лондоновских длин $\lambda_L = 80$ нм для ниобия (см., например, [30]) и толщины первого слоя изоляции (4-й этап) $d_{\text{SiO}} = 330$ нм. В работе [31] хорошее согласие с экспериментом было получено при значении индуктивности поворотного квадрата $L_{\square}/2^{(6)}$. Таким образом, индуктивность джозефсоновского плеча составляет $L = 4.3$ пГн.

Выходная индуктивность L_{out} состоит из трех участков: начального, замыкающего и промежуточного, обеспечивающего индуктивную связь с измерительным СКВИДом. Начальный и замыкающий участки содержат в сумме 2 квадрата с индуктивностью $L_{\square}^{(5)}$, а промежуточный – шесть квадратов с индуктивностью $L_{\square}^{(8)} \approx 1$ пГн, изготовленных на 8 этапе технологического процесса. Промежуточный участок L_{out} отделен от сверхпроводящего экрана двойным слоем изоляции, что обеспечивает увеличенную оценку индуктивности на квадрат. Суммирование дает $L_{\text{out}} = 7.2$ пГн.

Коэффициент связи между L_{out} и L_{sq} на квадрат поверхности элемента L_{sq} можно оценить как $M_{\square}^{(58)} = L_{\square}^{(5)} w^{(5)}/w^{(8)}$, где $w^{(5,8)}$ – ширины полосковых линий, изготовленных на 5-м и 8-м этапах технологического процесса. Подстановка дает $M_{\square} = 0.3$ пГн, а взаимную индуктивность L_{out} к поворотному квадрату L_{sq} можно принять за половину от прямого (так же, как в работе [31]). Учитывая количество квадратов элемента L_{sq} в зоне индуктивной связи (8 прямых и 2 поворотных) получаем $M_{\text{out}} = 2.7$ пГн. Применяя данные рассуждения к зонам индуктивной связи контрольной линии и приемных контуров нейрона, содержащим по 3 прямым и 2 поворотных квадрата в индуктивном слое каждая, имеем оценку $M_{\text{in}} = 2.4$ пГн.

3. Эксперимент. Принципиальная схема проведенного эксперимента представлена на рис. 3. Она состоит из трех блоков: гаусс-нейрона (показан сплошными линиями), а также задающей (“Input”) и счи-

тывающей (“Readout”) схем (показаны штриховыми линиями). Предполагается наличие общего сверхпроводящего электрода “Gnd” (“Ground”), замыкающего контуры как гаусс-нейрона, так и измерительного СКВИДа. Ток I_x , создаваемый источником “С”, протекает по контрольной линии (“CL”) и создает входной сигнал (магнитный поток Φ_{in}) в каждый приемный контур нейрона. Это приводит к появлению тока I_{out} , магнитный поток которого Φ_{out} измеряется при помощи вспомогательного двухконтактного СКВИДа, состоящего из джозефсоновских переходов JJ_I и JJ_{II} , соединенных индуктивностью L_{sq} . Измерительный СКВИД находится в резистивном режиме, поскольку ток смещения, задаваемый источником “В”, слегка превышает максимальное критическое значение. Поэтому стабилизация напряжения U на СКВИДе позволяет поддерживать постоянным его критический ток, а значит и магнитный поток Φ_{sq} через него. Это осуществляется при помощи тока источника “F”, подключенного непосредственно к элементу L_{sq} для управления протекающим через него током I_{sq} . Выходным сигналом является разность I_{fb} начального $I_F^{(0)}$ и текущего I_F значения тока источника “F” (далее – “компенсирующий ток” или “ток обратной связи”). При стабилизированном напряжении U изменение I_{sq} происходит только за счет изменения тока $I_F^{(7)}$:

$$I_{sq}^{(0)} - I_{sq} = I_{fb}, \quad (1)$$

и линейно зависит от выходного потока Φ_{out} (как показано ниже). Стабилизация напряжения осуществлялась при помощи специальной программы с точностью лучше 1 мкВ при шаге дискретизации I_{fb} в 0.1 мкА.

Типичная экспериментальная кривая, показанная на рис. 4, представляет собой набор положительных куполообразных пиков с амплитудой около 10 мкА по компенсирующему току и периодом $T_x = 1.4$ мА по входному сигналу на фоне линейной зависимости с наклоном в 0.8 % тока I_x . Нелинейная компонента качественно соответствует ожидаемой передаточной функции образца согласно результатам теоретических исследований (см., например, [18, 19]). Линейная компонента, по-видимому, вызвана с непосредственной передачей входного магнитного потока в измерительную цепь. Этот эффект наблюдался ранее в работе [31] при экспериментальном исследовании передаточ-

⁶⁾ Дополнительная проверка данного наблюдения будет проведена в наших следующих работах с помощью методов численного моделирования, использованных в [34, 35] для моделирования конструкции сигма-нейрона.

⁷⁾ Через элемент L_{sq} протекает ток источника F, а также доля тока питания (источник В), определяемая величиной Φ_{sq} [32, 33].

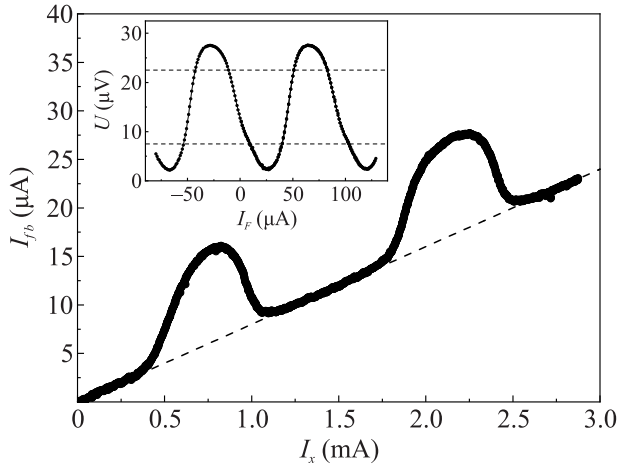


Рис. 4. Экспериментальная передаточная функция исследованного образца. Штриховой линией проиллюстрирована линейная компонента полученной зависимости. На вставке приведена вольт-потокová характеристика измерительного СКВИДа. Пунктирные линии иллюстрируют допустимый диапазон стабилизируемого напряжения при измерении передаточной функции гаусс-нейрона (см. обсуждение в тексте)

ной функции сигма-нейрона. Причина связана с протеканием в экране кольцевых токов в качестве отклика на магнитное поле контрольной линии. Устранение линейной компоненты является предметом работ по совершенствованию конструкции гаусс-нейрона.

Форма нелинейной компоненты (полезный сигнал) близка к гауссовой, однако не совсем ей соответствует (см. рис. 5а). Нормированный полезный сигнал⁸⁾ имеет промежуточную форму между двумя гауссовыми зависимостями вида $\exp(-(x - x_d)^2/2\sigma^2)$ с разным значением σ^2 , аппроксимируемыми либо “купол” (верхняя (синяя) штриховая кривая на рис. 5а), либо “крылья” (нижняя (красная) штриховая кривая на рис. 5а) экспериментальной кривой. Здесь x — значение управляющего тока, нормированное на T_X , x_d — положение вершины купола в единицах T_X , а выходной сигнал нормирован на амплитуду купола. Дисперсия σ^2 равна 0.025 и 0.01 для “верхней” (синей) и “нижней” (красной) гауссовых кривых соответственно. Наилучшая аппроксимация всей кривой достигается при промежуточном значении дисперсии $\sigma^2 = 0.015$: среднеквадратичное отклонение в этом случае составляет около 5%.

⁸⁾ Для сравнения формы экспериментальной и расчетных кривых далее нелинейная компонента передаточной функции нормируется на свое максимальное значение, а управляющий ток — на период T_X .

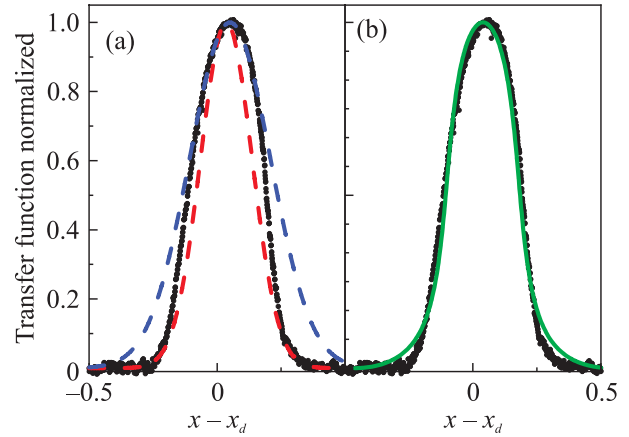


Рис. 5. (Цветной онлайн) Нелинейная компонента передаточной функции гаусс-нейрона (черные точки), аппроксимированная распределениями Гаусса с разным значением дисперсии (см. штриховые линии на панели (а)) и параметрической зависимостью (2)–(4) (см. зеленую линию на панели (б)). Координата $x = I_x/T_X$ представляет собой управляющий ток, нормированный на период передаточной функции, а x_d — положение купола передаточной функции. Вертикальная ось нормирована на амплитуду изменения нелинейной компоненты

Более правильным является описание формы передаточной функции гаусс-нейрона с помощью двух-параметрической зависимости вида [26]:

$$\dot{\theta} = \frac{\phi_b - \theta}{l + 2l_{\text{out}}} - \sin \theta \cos \psi \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = -\frac{\phi_{\text{in}} + \psi}{l} - \sin \psi \cos \theta \quad (3)$$

$$\phi_{\text{out}} = \frac{2l_{\text{out}}}{l + 2l_{\text{out}}}(\theta - \phi_b). \quad (4)$$

Здесь ϕ_{in} и ϕ_{out} — нормированные входной и выходной магнитные потоки соответственно; l и l_{out} — нормированные индуктивности плеч интерферометра; $\theta = (\varphi_2 + \varphi_1)/2$ и $\psi = (\varphi_2 - \varphi_1)/2$ — полусумма и полуразность фаз на контактах Джозефсона $JJ_{1,2}$; ϕ_b — нормированный “поток смещения”. В уравнениях (2)–(4) используется естественная система единиц измерения индуктивностей и магнитного потока: индуктивности, обозначаемые строчными буквами, нормированы на джозефсоновскую индуктивность $L_J = \Phi_0/2\pi I_c$ (I_c — критический ток контактов Джозефсона); токи измеряются в единицах I_c ; а магнитные потоки — в единицах $\Phi_0/2\pi$. При численном решении ур. (2)–(4) производные по времени величин θ и ψ полагались равными нулю в силу квазистационарного изменения входного сигнала. Действительно, при измерении передаточной функции

мы изменяли ток I_x (управляющий ток) от источника “С” скачкообразным образом на величину около 0.2 % периода с интервалом времени более 1 с, что на много порядков меньше характерных скоростей джозефсоновских процессов⁹⁾. На рисунке 5b видно, что теоретическая кривая хорошо описывает экспериментальные результаты. Среднеквадратичное отклонение расчетной и экспериментальной кривых составляет около 3 %.

Система ур. (2)–(4) содержит, фактически, всего два свободных параметра: джозефсоновскую индуктивность $L_J = 15$ пГн и поток смещения $\phi_b = 0.15\pi$. Первый параметр использовался для нормировки геометрических индуктивностей, оцененных в разделе 2, а ненулевое значение второго параметра, на первый взгляд, должно вызывать удивление. Действительно, в первых работах [18, 19] этот поток рассматривался как инструмент управления начальным состоянием гаусс-нейрона, а для создания ϕ_b предполагалось подавать в точку соединения О дополнительный ток i_T , который протекает до общего электрода (экрана) через выходную индуктивность (см. рис. 1). В работе [26] было показано, что величина ϕ_b влияет и на форму передаточной функции. При больших ϕ_b купол передаточной функции уширяется и теряет идеальную форму, соответствующую распределению Гаусса. Именно этот эффект наблюдается на рис. 5, подтверждая наличие заметного потока смещения, хотя никакие дополнительные источники тока (см. схему рис. 1) к нейрону не подключались (см. схему рис. 3) и специальные контрольные линии [26] не использовались.

Появление потока смещения в нашем эксперименте, по-видимому, связано с влиянием процесса измерения на состояние образца (нейрона), поскольку датчик СКВИДа является единственным элементом, связанным непосредственно с выходной индуктивностью. Действительно, в силу индуктивной связи между L_{sq} и L_{out} магнитный поток в выходной индуктивности равен:

$$\phi_{out} = l_{out}i_{out} + m_{out}i_{sq}, \quad (5)$$

где i_{sq} – нормированный ток, протекающий по петле измерительного СКВИДа. При этом токи i_{out} и i_{sq} связаны условием постоянства магнитного потока ϕ_{sq} через измерительную систему:

$$\phi_{sq} = m_{out}i_{out} + l_{sq}i_{sq} = \text{const.} \quad (6)$$

Для максимальной точности измерений рабочую

⁹⁾ Теория нестационарного состояния гаусс-нейрона рассматривалась в работах [25, 27]).

точку СКВИДа (т.е. стабилизируемый магнитный поток Φ_{sq}) необходимо выбирать отличным от нуля, точнее, в области большой производной $dU/d\Phi_{sq}$ вольт-потокковой характеристики¹⁰⁾ (см. вставку на рис. 4). Условие $\phi_{sq} \neq 0$ может быть обеспечено за счет несимметричной конструкции измерительного СКВИДа (см. рис. 3), приводящей к несимметричному протеканию тока питания I_b , а также за счет постоянной компоненты тока I_F , приводящей к смещению вольт-потокковой характеристики. Исключая ток i_{sq} из ур. (5) с помощью ур. (6), имеем:

$$\phi_{out} = l_{out} \left(1 - \frac{m_{out}^2}{l_{sq}l_{out}} \right) i_{out} + \frac{m_{out}}{l_{sq}} \phi_{sq}. \quad (7)$$

Первое слагаемое определяет линейную связь между выходным сигналом нейрона и током i_{out} , а второе представляет собой эффективный поток смещения. Исключая из ур. (5) ток i_{out} , можно продемонстрировать линейную связь выходного потока с током i_{fb} (с учетом ур. (1)):

$$\phi_{out} = \frac{l_{out}}{m_{out}} \phi_{sq} - \frac{l_{out}l_{sq}}{m_{out}} \left(1 - \frac{m_{out}^2}{l_{sq}l_{out}} \right) i_{sq}. \quad (8)$$

Возможность создания потока смещения путем выбора рабочей точки измерительной схемы является благоприятным обстоятельством для разработчиков сверхпроводниковых ANN на основе радиальных базисных функций. Действительно, измерительный СКВИД является неотъемлемой частью нейрона как логического элемента. Поэтому задание потока смещения через индуктивность L_{sq} не требует дополнительных усилий. Отсутствие необходимости в дополнительном токовом сигнале позволяет уменьшить количество подводящих линий, энергопотребление и общие размеры нейрона. Как упоминалось в работе [31], миниатюризация индуктивных элементов по отношению к размерам экрана способна также подавить паразитную передачу входного сигнала в измерительную цепь. Совершенствование конструкции практического гаусс-нейрона и анализ его свойств будут предметом наших дальнейших работ на эту тему.

4. Заключение. Таким образом, в данной работе была опробована простейшая конструкция сверхпроводящего гаусс-нейрона, представляющего собой шунтированный двухконтактный интерферометр, изготовленный в виде тонкопленочной

¹⁰⁾ Вольт-потокковая характеристика представляет собой зависимость напряжения на СКВИДе от тока источника “F” при постоянном токе смещения (источник “B”), превышающем максимальное критическое значение.

интерферометрической структуры над толстым сверхпроводящим экраном. Была измерена передаточная функция, представляющая собой сумму линейной и куполообразной компонент. Форма нелинейной компоненты может быть описана при помощи ранее полученных уравнений с учетом постоянного “потока смещения”, возникающего из-за воздействия процесса измерения выходного магнитного потока на состояние гаусс-нейрона. Последнее наблюдение благоприятно для разработки интегрированных нейронных сетей на основе реализованного интерферометрического элемента.

Экспериментальное исследование и анализ передаточной функции гаусс-нейрона (см. раздел 3) производились в ИФТТ РАН при поддержке гранта РНФ #23-72-00053. Проектирование и изготовление образца (см. раздел 2) было выполнено в рамках производственной практики аспиранта МФТИ А.С.Ионина (МФТИ) и студента МФТИ Ф.А.Разоренова.

Авторы благодарны сотруднику ИФТТ РАН В.Н.Шилову за помощь в изготовлении образцов.

1. K. Ishida, I. Byun, I. Nagaoka, K. Fukumitsu, M. Tanaka, S. Kawakami, T. Tanimoto, T. Ono, J. Kim, and K. Inoue, *IEEE Micro* **41**(3), 19 (2021).
2. P. Crotty, D. Schult, and K. Segall, *Phys. Rev. E* **82**(1), 011914 (2010).
3. 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**(1), e1701329 (2018).
4. M. L. Schneider and K. Segall, *J. Appl. Phys.* **128**, 214903 (2020).
5. M. L. Schneider, C. A. Donnelly, and S. E. Russek, *J. Appl. Phys.* **124**, 161102 (2018).
6. K. K. Likharev and V. K. Semenov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1**(1), 3 (1991).
7. O. A. Mukhanov, V. K. Semenov, and K. K. Likharev, *IEEE Trans. Magn.* **23**, 759 (1987).
8. P. Bunyk, K. K. Likharev, and D. Zinoviev, *Int. J. High Speed Electron. Syst.* **11**, 257 (2001).
9. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, M. Yu. Kupriyanov, A. L. Gudkov, and A. S. Sidorenko, *Beilstein J. Nanotechnol.* **8**, 2689 (2017).
10. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, G. I. Gubochkin, M. Yu. Kupriyanov, and I. I. Soloviev, *Nanomaterials* **13**, 2101 (2023).
11. O. V. Skryabina, A. E. Schegolev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, A. G. Shishkin, S. V. Sotnichuk, K. S. Napolskii, I. A. Nazhestkin, I. I. Soloviev, M. Yu. Kupriyanov, and V. S. Stolyarov, *Nanomaterials* **12**, 1671 (2022).
12. V. Semenov, E. Golden, and S. Tolpygo, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **32**, 1-5 (2021).
13. V. Semenov, E. Golden, and S. Tolpygo, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33**, 1 (2023).
14. N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *Supercond. Sci. Technol.* **26**(3), 035010 (2013).
15. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *J. Appl. Phys.* **117**(17), 173912 (2015).
16. Q. Xu, Y. Yamanashi, C. L. Ayala, N. Takeuchi, T. Ortlepp, and N. Yoshikawa, *Design of an extremely energy-efficient hardware algorithm using adiabatic superconductor logic 2015, 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC)*, Nagoya, Japan (2015), p.1 (2015).
17. A. S. Sidorenko, S. V. Bakurskiy, Yu. Savva et al. (Collaboration), *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing* **17**, 177 (2023).
18. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, and M. V. Tereshonok, *Beilstein J. Nanotechnol.* **7**, 1397 (2016).
19. N. V. Klenov, A. E. Schegolev, I. I. Soloviev, S. V. Bakurskiy, and M. V. Tereshonok, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28**(7), 1301006 (2018).
20. 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).
21. N. V. Klenov, A. V. Kuznetsov, A. E. Schegolev, I. I. Soloviev, S. V. Bakurskiy, M. Yu. Kupriyanov, and M. V. Tereshonok, *Low Temp. Phys.* **45**(7), 769 (2019).
22. S. Bakurskiy, M. Kupriyanov, N. V. Klenov, I. Soloviev, A. Schegolev, R. Morari, Yu. Khaydukov, and A. S. Sidorenko, *Beilstein J. Nanotechnol.* **11**, 1336 (2020).
23. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, A. L. Gudkov, and M. V. Tereshonok, *Nanobiotechnology Reports* **16**(6), 811 (2021).
24. A. Schegolev, N. Klenov, I. Soloviev, and M. Tereshonok, *Supercond. Sci. Technol.* **34**(1), 015006 (2021).
25. M. Bastrakova, A. Gorchavkina, A. Schegolev, N. Klenov, I. Soloviev, A. Satanin, and M. Tereshonok, *Symmetry* **13**(9), 1735 (2021).
26. 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**, 444 (2022).
27. 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).
28. L. N. Kanal, *Encyclopedia of Computer Science*, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK (2003), p. 1383.

29. В. В. Шмидт, *Введение в физику сверхпроводников*, 2-е изд., МЦНМО, М. (2000).
30. A. I. Gubin, K. S. Il'in, S. A. Vitusevich, M. Siegel, and N. Klein, *Phys. Rev. B* **72**, 064503 (2005).
31. 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, А. Е. Щеголев, В. В. Больгинов, *ЖЭТФ* **164**(6(12)), 1 (2023).
32. А. Бароне, Дж. Паттерно, *Эффект Джозефсона*, Мир, М. (1984).
33. К. К. Лихарев, *Введение в динамику джозефсоновских переходов*, Наука, М. (1985).
34. С. В. Бакурский, Н. В. Кленов, М. Ю. Куприянов, И. И. Соловьев, М. М. Хапаев, *Журнал вычислительной математики и математической физики* **61**(5), 885 (2021).
35. М. М. Хапаев, М. Ю. Куприянов, *Дифференциальные уравнения* **58**(8), 1148 (2022).