В современной науке все более активно развивается область физики, которая посвящена применению феномена сверхпроводимости, т.е. перехода некоторых материалов в состояние с отсутствием электрического сопротивления. Направлений развития по этой тематике много, но мы сделаем акцент лишь на резистивной одноквантовой логике, положившей начало индустриальным сверхпроводниковым вычислительным системам и сверхпроводниковой адиабатической логике, в перспективе обеспечивающей нейросетевые сверхпроводниковые вычисления. В связи с активным развитием и использованием компьютерной техники для решения сложных математических задач, требующих значительных вычислительных мощностей, резко встал вопрос об эффективности и возможностях больших вычислительных машин, таких как суперкомпьютеры. Для примера рассмотрим суперкомпьютер «Ломоносов», который располагается на территории Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова. На момент создания (2011 год), этот компьютер обладал более чем 94000 процессорных ядер, общей производительностью в 674 Тфлоп/с (~10^{13} операций в секунду), что позволило ему занять в июне 2011 года 13-ое место в списке Топ500 самых мощных компьютеров мира. Энергопотребление суперкомпьютера «Ломоносов» составляет примерно 2,64 МВт электроэнергии. Для сравнения, процессор для ПК Intel Core i7-4930K (Ivy Bridge), который обладает рабочей частотой 3,4 ГГц с возможностью буста до 3,9 ГГц, и имеет 6 ядер (модель 2013 года), способен производить 120 Гфлоп/с (т.е. ~10^{11} операций в секунду) с потребляемой мощностью 130 Вт.

В июне 2016 года был опубликован новый рейтинг суперкомпьютеров Топ500[1], который возглавил китайский суперкомпьютер Sunway TaihuLight с тестовой производительностью в 93 Пфлоп/с (~ 10^{17} операций в секунду). В Sunway TaihuLight используется 10,6 миллионов ядер. Среднее энергопотребление этой машины во время тестов составило 15,3 МВт. Современная тенденция развития полупроводниковых процессоров на базе КМОП (CMOS – complementary metal-oxide-semiconductor) связана с уменьшением размеров логических устройств. Современные КМОП схемы при переключении одного логического устройства затрачивают энергию порядка 10^6 k_BT (k_B – постоянная Больцмана, а T - температура). По оценкам при приближении линейных размеров КМОП элементов к суб-5-нм масштабам, выделяемая энергия уменьшится лишь на порядок. Кроме того, на практике, статическое энергопотребление вызвано токами утечки и динамической энергии при перезарядке катушек индуктивности, что только повышает среднее значение выделяемой энергии одной логической ячейки. Переключения подобного элемента между двумя логическими состояниями связаны с преодолением потенциального барьера, величина которого должна быть заметно больше k_BT. Это условие отвечает за различимость двух логических состояний. Таким образом, уменьшение физических размеров не сможет бесконечно увеличивать энергоэффективность компьютеров следующих поколений. Приведенные выше цифры говорят о том, что проблема энергоэффективности с сохранением или даже увеличением производительности компьютера, а точнее *суперкомпьютера*, крайне актуальна и ее решение – важное научное и технологическое достижение.

Привлечение к решению обозначенной проблемы исследований в области сверхпроводимости, а именно исследований адиабатической сверхпроводниковой логики, позволит достигнуть необычайно высоких показателей энергоэффективности при выполнении логических операций. Важной особенностью в адиабатической сверхпроводниковой логике является возможность обратимости логических операций.

Использование эффектов сверхпроводимости, а точнее сверхпроводниковых структур, также тесно связано с коммуникациями. Будущее развитие систем сотовой и спутниковой связи, радарных систем, зондирования морей, океанов и глубокого космоса связано с обработкой и анализом большого количества данных. Для решения этих задач все чаще используют искусственные нейронные сети (ИНС), возможности которых позволяют эффективно распознавать и классифицировать сигналы и изображения. Совмещение преимуществ ИНС и сверхпроводниковой техники выглядит крайне многообещающим.

Физической основой для создания сверхпроводниковых цифровых устройств является существование при изменении внешних условий в сверхпроводниковых материалах термодинамического фазового перехода между двумя сильно отличающимися состояниями: нормальным и сверхпроводящим. Разрушение сверхпроводящего состояния, то есть разрыв куперовских пар, может происходить кинетически (существует критическое значение тока j_C, выше которой сверхпроводник теряет сверхпроводящие свойства), термически (выше критической температуры T_C появляются возбуждения – нормальные электроны) и магнитным образом (в поле H_{Cm} происходит переориентированные спинов электронов, в результате чего по БКШ они теряют возможность взаимодействовать). Последнее ведет к квантованию магнитного потока, что является исключительной особенностью сверхпроводников. Давайте воздействуем на металлическое кольцо магнитным полем, после чего переведем его в сверхпроводящее состояние и выключим магнитное поле. Опытным путем, а также теоретически было установлено, что величина потока внутри кольца не может быть произвольной, а пропорциональна константе: $\Phi = n\Phi_0$, где $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \cdot 10^{-15}$ Вб — квант магнитного потока. Таким образом, наблюдается квантование макроскопической величины – потока магнитного поля **B**.

Следующее важное явление для создания сверхпроводниковых цифровых устройств — эффект Джозефсона. Пусть имеется два сверхпроводника. Коллектив носителей тока в каждом сверхпроводнике - куперовских пар - описывается волновой функцией $\phi_{L,R} = A_{L,R}e^{ix}L,R$. Соединим сверхпроводники слабой связью, например, туннельным переходом, слабым касанием сверхпроводников, тонким слоем диэлектрика и т.п. Главное требование к связи — слабое изменение волновых функций носителей тока в каждом сверхпроводнике. Если пропустить достаточно слабый ток через эту связь, то на ее границах не возникнет разности потенциалов, то есть наблюдается нулевое сопротивление, поскольку малые значения тока будут переноситься сверхпроводящей компонентой: не одиночными электронами, а конденсатом куперовских пар. Это так называемый стационарный эффект Джозефсона — протекание через туннельный переход малого постоянного сверхтока, не создающего напряжения и представимого в виде:

$$I_S = I_C \sin \varphi,$$

где $\varphi = \chi_2 - \chi_1$ — разность фаз волновых функций куперовских пар в двух сверхпроводниках, называемая джозефсоновской фазой, I_C — критическое значение пропускаемого тока (максимально возможный для этой системы

Если через джозефсоновский переход пропускается ток, больший критического, в его переносе, помимо сверхпроводящих электронов, начинают участвовать электроны проводимости, на переходе появляется напряжение и начинает происходить нестационарный эффект Джозефсона, состоящий в следующем. Ток через переход, будет складываться из двух компонент:

$$I = I_S + I_n.$$

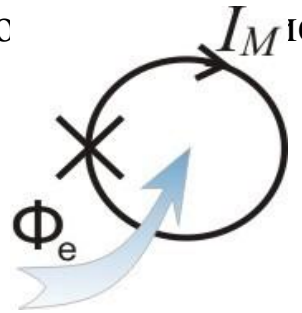
При протекании нормального тока возникающее напряжение заставляет неограниченно меняться джозефсоновскую фазу φ, что, в свою очередь, меняет величину протекающего сверхтока . Таким образом, при приложенном токе, большем критического, этот ток будет переноситься двумя осциллирующими в противофазе компонентами I_S и I_n. Напряжение на границах перехода будет иметь, помимо постоянной составляющей, также переменную составляющую, осциллирующую с частотой, пропорциональной значению постоянной составляющей напряжения на переходе:

$$d\varphi/dt=2eV/\hbar$$

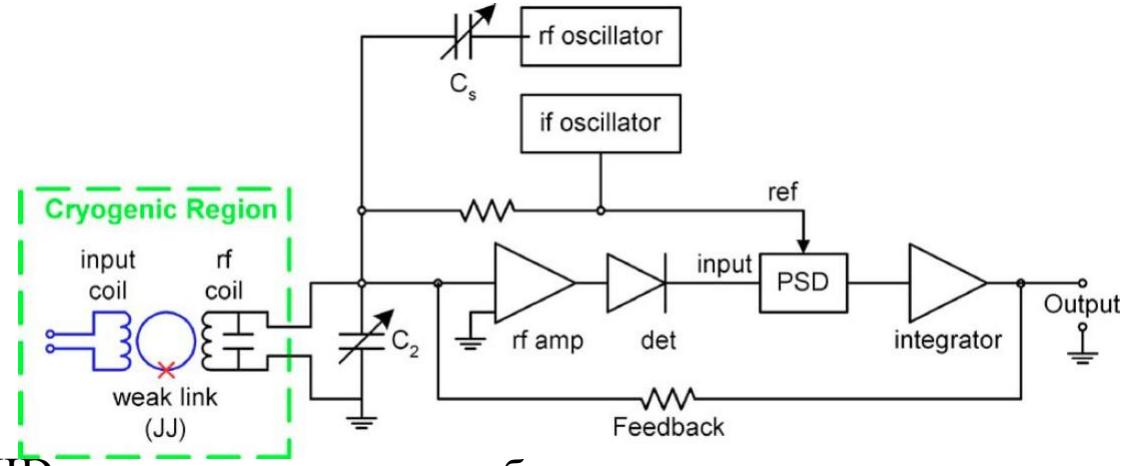
Это второе (основное) фундаментальное соотношение Джозефсона связывает величину падения напряжения на переходе со скоростью изменения джозефсоновской фазы.

Сверхпроводящий квантовый интерферометр

Сверхпроводящие квантовые интерферометры являются одними из ключевых устройств на основе явления сверхпроводимости. Конструктивно они представляют собой сверхпроводящее кольцо, прерванное одним или двумя джозефсоновскими переходами, в которых происхо ие/интерференция волновых функций сверхпроводников, создающих переход.



Рассмотрим принцип работы таких систем на примере сверхпроводящего кольца, прерванного одним джозефсоновским переходом. Для использования одноконтактного интерферометра в качестве датчика необходимо использовать дополнительное устройство, в роли которого выступает внешний колебательный контур, индуктивно связанный с интерферометром.

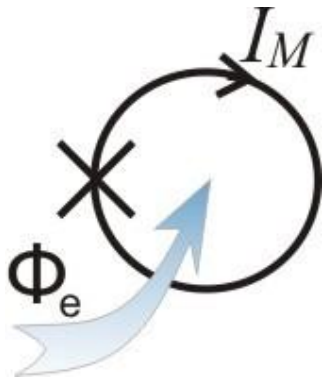


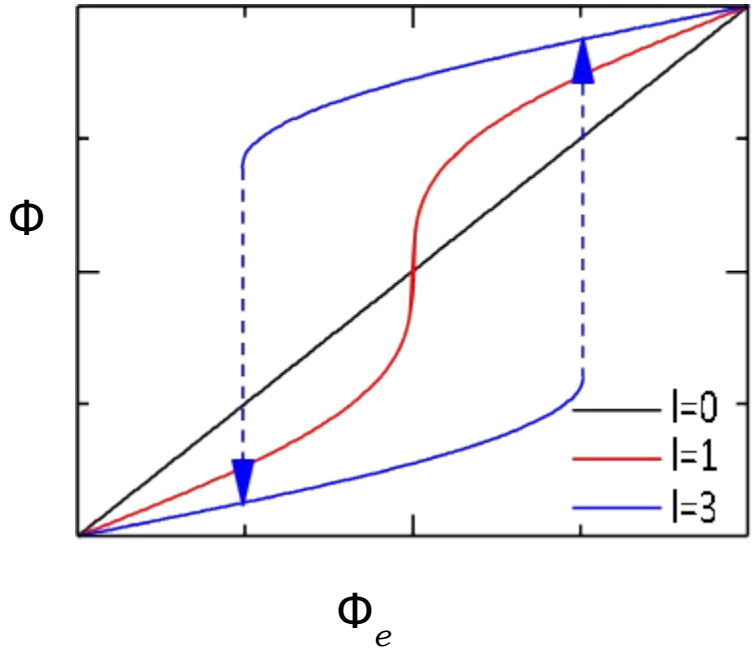
Блок-схема RF SQUID и электроники для работы с ним

Поскольку разность потенциалов между любыми точками сверхпроводящего кольца с одним джозефсоновским переходом равна нулю из простых соображений, подключаться напрямую не имеет смысла. Меняющийся магнитный поток влечет за собой изменение значения джозефсоновской фазы на переходе. В свою очередь, это вызывает изменение величины эффективной индуктивности контакта, и, следовательно, полной индуктивности кольца.

В этом случае можно использовать устройство «усилитель модулятор - демодулятор». В данном устройстве изменение параметра системы (эффективной индуктивности) вызывает изменение импеданса системы для подающихся колебаний на частоте накачки, что «сдвигает» резонансную кривую системы с соответствующим изменением амплитуды колебаний в ней. Изменения амплитуды сигнала накачки детектируются, что дает на выходе усиленную

Одноконтактный интерферометр, работающий с колебательным контуром и усилителем называется rf сквидом (rf — radio frequency, поскольку сигнал накачки подается на радиочастотах) и в этом случае выходной характеристикой будет изменение амплитуды напряжения на внешнем контуре, которое будет представлять собой периодическую функцию от потока Φ_e

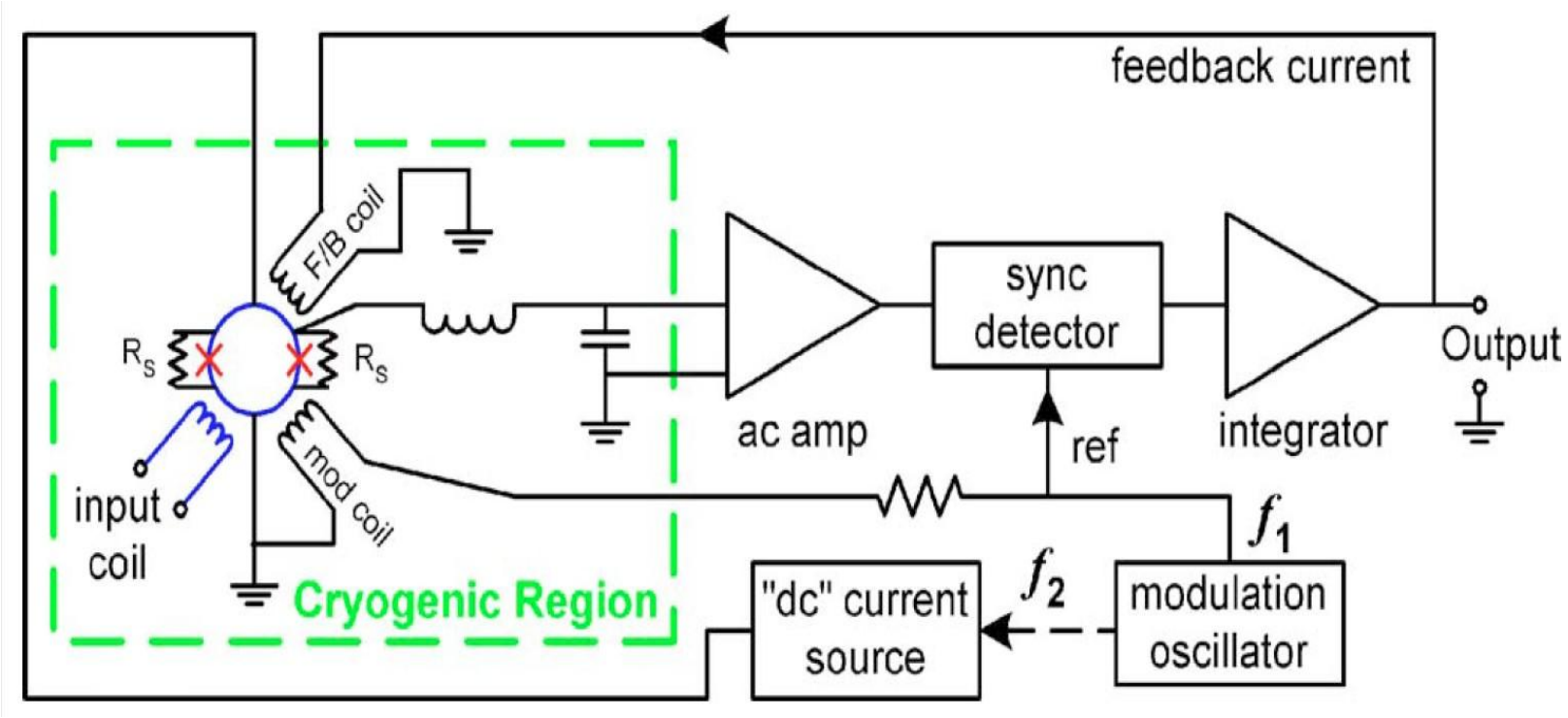




Эквивалентная схема одноконтактного интерферометра и семейство кривых, показывающее зависимость полного магнитного потока $\Phi = (\Phi_0/2\pi)\varphi$ от внешнего магнитного потока $\Phi_e = (\Phi_0/2\pi)\varphi_e$ при различных значениях безразмерной индуктивности контура.

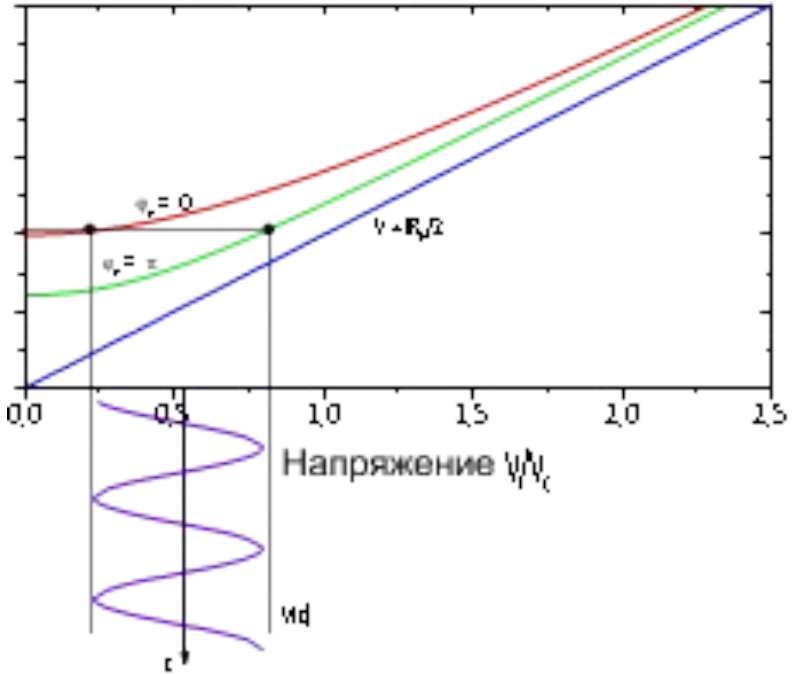
Таким образом, принцип работы радиочастотного сквида заключается в следующем: собственная частота колебательного контура Ω_K близка к частоте Ω прилагаемого тока накачки с амплитудой I_a. Измеряемый магнитный поток Φ_e, как написано выше, изменяет импеданс одноконтактного интерферометра, что приводит к смещению резонансной кривой и, соответственно, изменению амплитуды напряжения на контуре. Данные изменения демодулируются и дают выходной сигнал, пропорциональный величине Φ_e

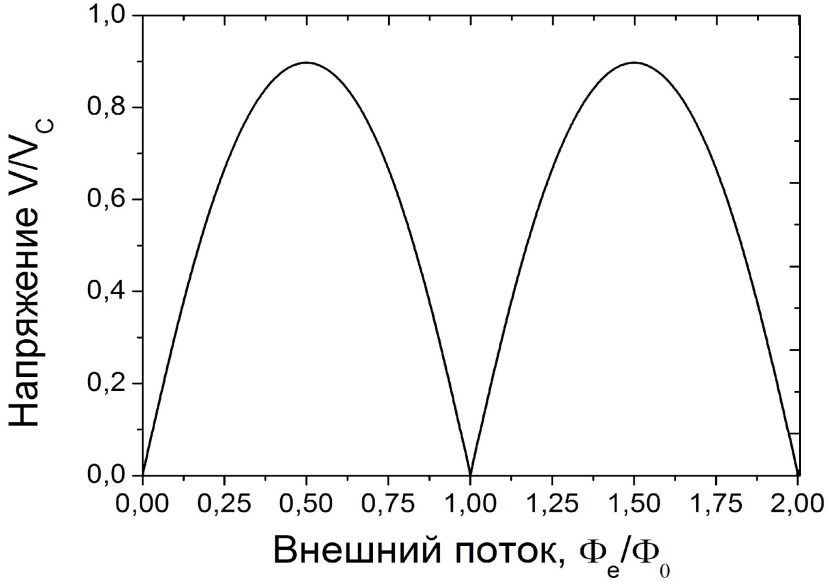
Двухконтактный интерферометр, в отличие от одноконтактного, может непосредственно использоваться как датчик магнитного потока, который называют DC SQUID (DC — direct current) — сквид прямого тока. Для его работы необходимо прикладывать к нему постоянный ток смещения, который должен быть незначительно больше суммы критических токов переходов для того, чтобы задать рабочую точку на ВАХ между резистивным и сверхпроводящим состояниями. Для предотвращения гистерезисного поведения используются шунтирующие резисторы.



Пример датчика на основе сквида прямого тока.

Принцип работы сквида изображен на рисунке.





Изменяющийся магнитный поток, который является внешним сигналом, периодическим образом модулирует полный сверхпроводящий ток, в результате чего среднее напряжение V в интерферометре будет меняться.

Зависимость $V(\Phi_e)$ называется сигнальной характеристикой (откликом). В отличие от радиочастотного сквида, данная зависимость является синусоидальной по своей природе, и обладает низкой линейностью. В связи с этим необходимо введение следящей обратной связи, которая позволяет оставаться в одной рабочей точке с наибольшей крутизной преобразования. Принцип работы заключается в том, что напряжение, которое является периодической функцией фазы с периодом Φ_0, используется для создания тока в цепи обратной связи, который через катушку путем создания потока Φ_{FB} держит суммарный поток, проникающий в контур сквида, на постоянном уровне ($\Phi_{FB} + \Phi_e = const$). Сигнал обратной цепи является прямой мерой изменений потока, приложенного к сквиду.

Кроме того, для уменьшения шумов типа $1/f$ используется модуляционная схема. В ней производится модулирование либо тока I, либо потока Φ_e с частотой Ω_M, много большей частоты сигнала, после чего происходит снятие сигнала и шума с частоты Ω_M. Применение модуляции позволяет снизить уровень шума, уйти от нестабильностей, а также согласовать низкоомный интерферометр с высокоомным входом усилителя.

Сквиды прямого тока обладают большей чувствительностью, чем радиочастотные. По этой причине, а также вследствие более низких шумов, сквиды прямого тока производятся в коммерческих целях в более крупных масштабах, нежели rf сквиды, но зато радиочастотные сквиды дешевле в производстве.