

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Центр квантовых технологий

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

**Изучение принципов работы сверхпроводящего квантового магнитометра
(СКВИДа)**

А.В. Ржевский, Н.В. Колотинский, О.В. Снигирев, Ю.В. Масленников, М.И. Фалей

МГУ, Физический факультет

Москва, 2021

Цели работы:

- Изучение влияния параметров джозефсоновского контакта на выходные характеристики СКВИДа;
- Ознакомление с устройством и основными характеристиками СКВИДов, в частности, СКВИДа постоянного тока на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), особенностями их использования в практике;
- Получение базовых навыков управления ВТСП СКВИДом и его электронными блоками;

1. Теоретическое введение.

1.1. Сверхпроводники, квантование магнитного потока и эффект Джозефсона

Работа СКВИДа постоянного тока основана на трех основных квантовых физических феноменах: явлении сверхпроводимости, явлении квантования магнитного потока и явлении слабой сверхпроводимости (эффекте Джозефсона). Напомним кратко на качественном уровне основные черты этих явлений, нужные для выполнения данной работы.

Явление сверхпроводимости в металлах, было открыто в 1911 году [1] и наиболее полно объяснено в 1956 году в рамках теории Бардина-Купера и Шриффера (БКШ) [2], вскрывшей физические причины как, собственно, сверхпроводимости, так и выталкивания магнитного поля из сверхпроводника вне зависимости от предыстории охлаждения (в поле Рис. 1) или без поля, показавшей зависимость характерных длин изменения плотности сверхпроводящего конденсата ξ , и глубины проникновения магнитного поля λ , от микроскопических параметров сверхпроводника.

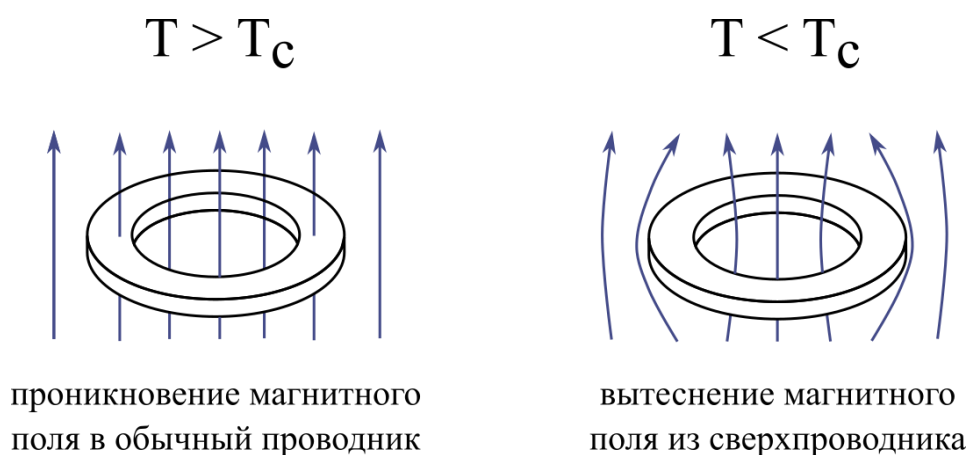


Рисунок 1. Эффект Мейсснера в сверхпроводящем кольце, охлажденном в магнитном поле

Явление квантования магнитного потока внутри цилиндрического отверстия в сверхпроводнике, открытое экспериментально в 1961 году [3,4], подтвердило квантовую природу сверхпроводимости и прямо доказало, что сверхток переносится парами электронов. Величина кванта, Φ_0 , оказалась равной

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}, \quad (1)$$

где h - постоянная Планка, равная $6,62 \times 10^{-34}$ Дж·с, e – заряд электрона.

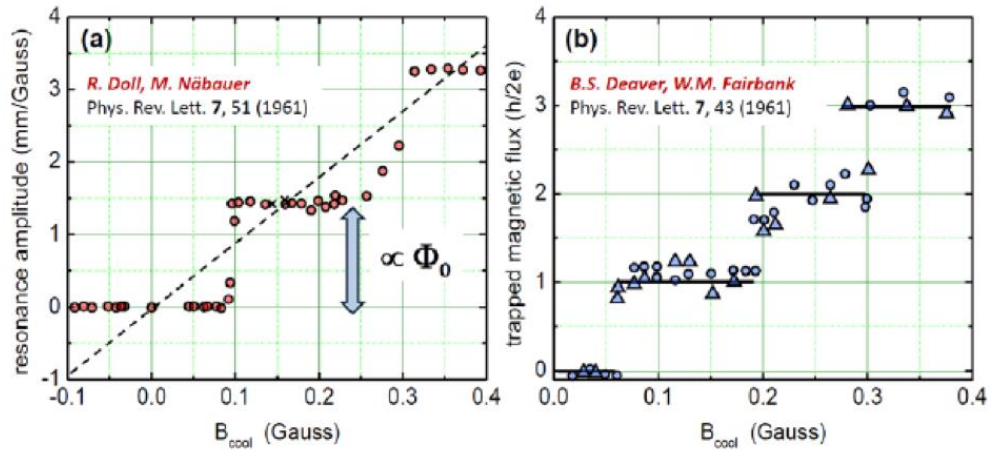


Рисунок 2. Квантование магнитного потока в сверхпроводящем кольце.

Эффекты слабой сверхпроводимости, или эффекты Джозефсона, были предсказаны в 1962 году [5] и вскоре экспериментально подтверждены. Суть стационарного эффекта Джозефсона заключается в явлении протекания сверхпроводящего тока не вызывающего падения напряжения через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. Такой ток называют джозефсоновским током, а структуру «сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник» — туннельным джозефсоновским переходом. Мы уже отмечали, что в сверхпроводящем состоянии материалов перенос тока осуществляется не единичными электронами, а так называемыми «куперовскими» парами, состоящими из двух электронов.

Одним из физических свойств проявления волнового характера «электронного» газа из «куперовских» пар в сверхпроводнике является тот факт, что он имеет единую фазу χ во всем массиве сверхпроводника. Соответственно, на границах джозефсоновского перехода, слабо связывающего два относительно массивных сверхпроводника будет существовать разность фаз $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ носителей тока, задаваемая протекающим током I (здесь φ_1 и φ_2 — фазы в каждом из сверхпроводящих электродов). Мерой слабости можно считать отношение плотности джозефсоновского тока к максимальной плотности сверхтока в массивном сверхпроводнике. Эта величина для туннельных джозефсоновских переходов имеет порядок от 10^{-5} до 10^{-2} [6, 7].

Если слой изолятора между электродами, с одной стороны, достаточно толстый, чтобы проходящий через него сверхток не сильно возмущал сверхпроводящий конденсат в электродах, а, с другой стороны, достаточно тонкий, чтобы туннелирующие куперовские пары создавали заметный протекающий сверхток при наличии термических флуктуаций, связь между током I и разностью фаз φ в первом приближении может быть записана как

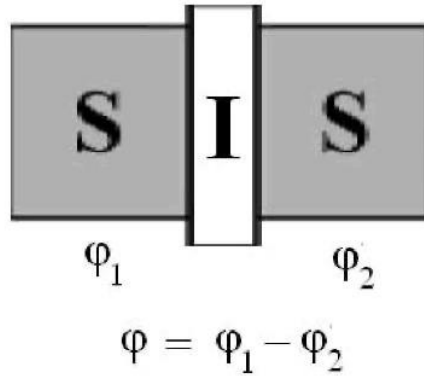


Рисунок 3. Схема туннельного джозефсоновского перехода.

$$I = I_C \sin \varphi, \quad (2)$$

где I_C — так называемый критический ток перехода — максимальный ток, не вызывающий появления напряжения на границах диэлектрика.

Уравнение (2) описывает стационарный эффект Джозефсона, поскольку при $I < I_C$ значение разности фаз постоянно. Если задаваемый ток превышает значение I_C , возникает так называемый нестационарный эффект Джозефсона, при котором разность фаз начинает изменяться со скоростью

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2e}{\hbar} V, \quad (3)$$

где V — мгновенное значение напряжения между электродами джозефсоновского перехода, e — заряд электрона, а \hbar — постоянная Планка, равная $\frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34}$ Дж·с. Джозефсоновский ток при этом начинает осциллировать с частотой

$$\omega = \frac{2e}{\hbar} \bar{V},$$

где \bar{V} — среднее значение напряжения между электродами джозефсоновского перехода.

При этом к сверхпроводящей компоненте тока добавляется и ток нормальных электронов I_N , туннелирующих через диэлектрик:

$$I_N(V) = \frac{V}{R(V)}, \quad (4)$$

где $R(V)$ – сопротивление туннельного барьера.

Если площадь соприкосновения электродов значительна, то значительна и емкость, C , образованного ими конденсатора и напряжение на емкости не может содержать переменной составляющей, т.е. близко к постоянному, разность фаз изменяется во времени с постоянной скоростью и усреднение по времени сверхтока (2), осциллирующего с частотой

$$f_J = \frac{2e}{2\pi\hbar} V = \frac{2e}{h} V \quad (5)$$

обнуляет его вклад в вольт-амперную характеристику (ВАХ) перехода $\bar{V}(\bar{I})$. В результате, ВАХ оказывается гистерезисной (см. рисунок 4), что неудобно для создания СКВИДов.

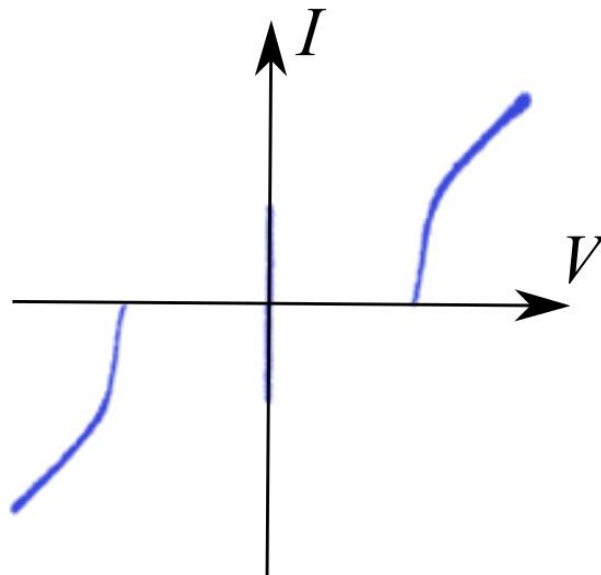


Рисунок 4. Вольт-амперная характеристика туннельного джозефсоновского перехода, полученная экспериментальным путём (обработанное изображение экрана осциллографа)

В 1968 году W.C. Stewart и D.E. McCumber, заменив зависящее от напряжения сопротивление $R(V)$ обычным сопротивлением R , теоретически показали, что при значениях параметра

$$\beta_C = \frac{2\pi I_C R^2 C}{\frac{h}{2e}} \quad (6)$$

меньших единицы, ВАХ джозефсоновского перехода становится безгистерезисной [8,9].

В 1971 году G.I. Rohlin, P.K. Hansma and N. Sweet продемонстрировали первый тонкопленочный туннельный джозефсоновский переход, шунтированный обычным

сопротивлением для получения безгистерезисной вольт-амперной характеристики (см. рисунок 5). Именно шунтированные переходы используются в современных СКВИДах [10].

Включение джозефсоновского перехода в сверхпроводящее кольцо с индуктивностью L (структура получила название одноконтakтного интерферометра) связывает разность фаз φ на переходе с потоком внутри кольца Φ , и приложенным внешним магнитным потоком, Φ_e .

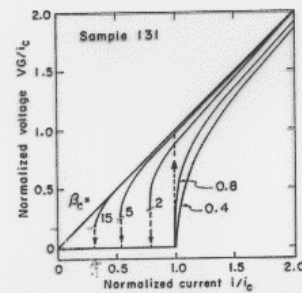
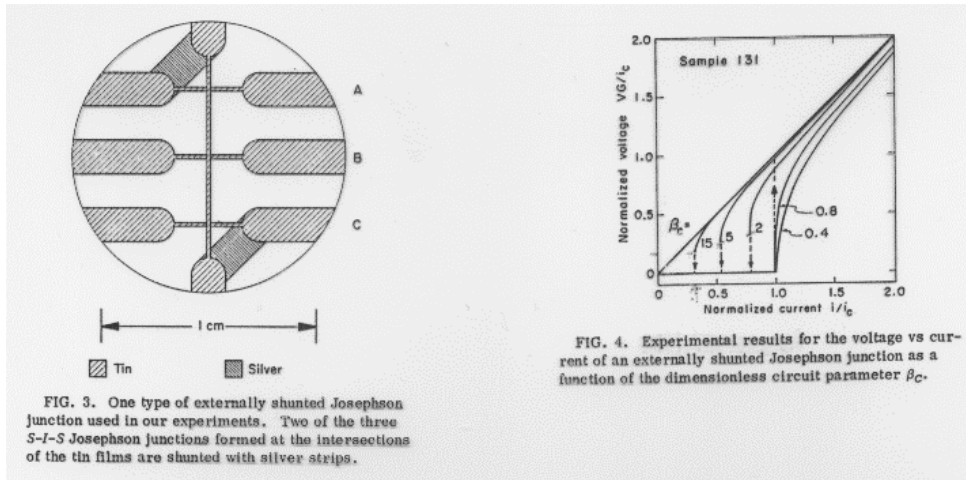


FIG. 4. Experimental results for the voltage vs current of an externally shunted Josephson junction as a function of the dimensionless circuit parameter β_c .

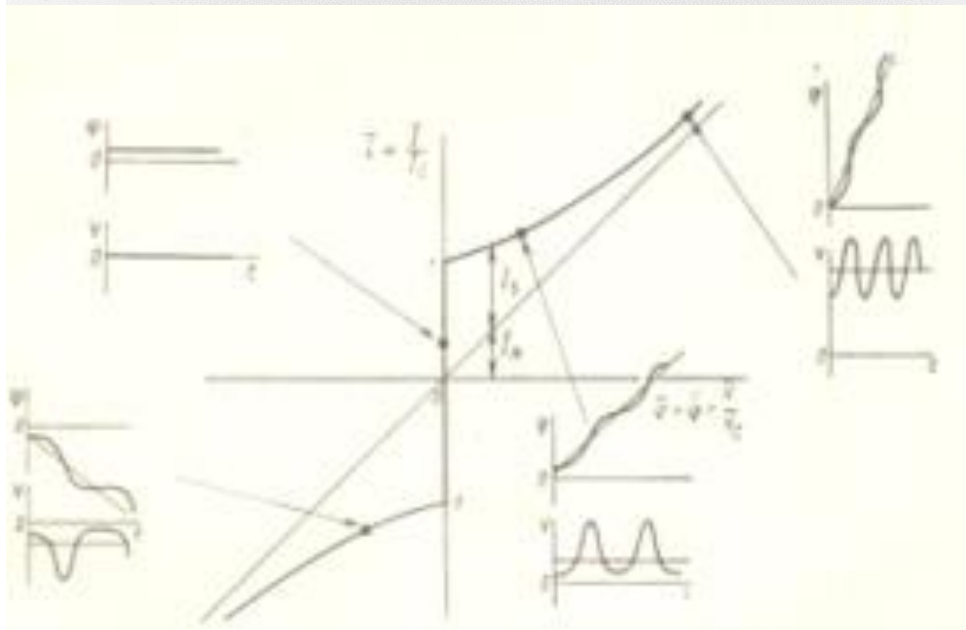


Рисунок 5. Туннельный джозефсоновский переход, шунтированный внешним сопротивлением, и его ВАХ и процессы джозефсоновской генерации.

Действительно, изменение потока внутри кольца по закону Фарадея связано с падением мгновенного напряжения на резистивном элементе:

$$V = \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

Интегрирование (7) показывает, что разность фаз на джозефсоновском контакте жестко связана с магнитным потоком внутри кольца:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\Phi_0} \Phi + 2\pi k, \quad (8)$$

где k без ограничения общности можно считать равным нулю.

Кроме того, из закона Ленца следует

$$\Phi = \Phi_e - LI_C \sin \varphi \quad (9)$$

Зависимость $\Phi(\Phi_e)$, следующая из (8) и (9) показана на рисунке 6, и при больших значениях L , близка к показанной на рисунке 2, то есть поток внутри одноконтактного интерферометра будет близок к целому числу квантов.

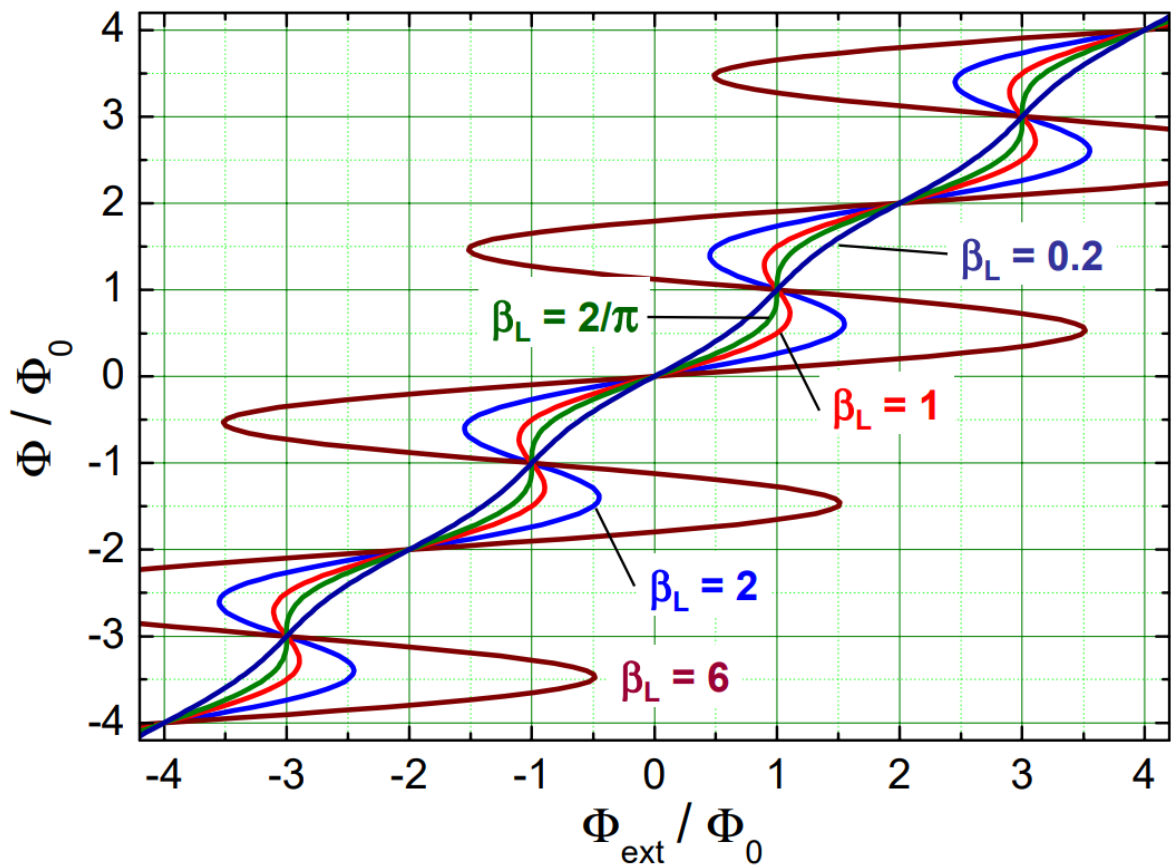


Рисунок 6. Зависимость потока внутри сверхпроводящего кольца от внешнего магнитного потока при различных значениях параметра $\beta_L = 2LI_c/\Phi_0$;

(изображение Applied Superconductivity).

1.2. СКВИД постоянного тока

Структура с двумя джозефсоновскими переходами в сверхпроводящем кольце (Рисунок 7) получила название двухконтактный интерферометр или СКВИД постоянного тока. При малых значениях индуктивности кольца L по сравнению с характеристическими индуктивностями джозефсоновских переходов $\frac{\Phi_0}{2\pi I_{C1,2}}$, где $I_{C1,2}$ – критические токи переходов ($\ell_{1,2} \equiv \frac{2\pi L I_{C1,2}}{\Phi_0} \ll 1$), его можно рассматривать как одиночный джозефсоновский переход, критический ток которого, $I_{C\Sigma}$, зависит от приложенного внешнего потока:

$$I_{C\Sigma}(\Phi_e) = I_{C1}^2 + I_{C2}^2 + 2I_{C1}I_{C2} \cos\left(\frac{2\pi\Phi_e}{\Phi_0}\right). \quad (10)$$

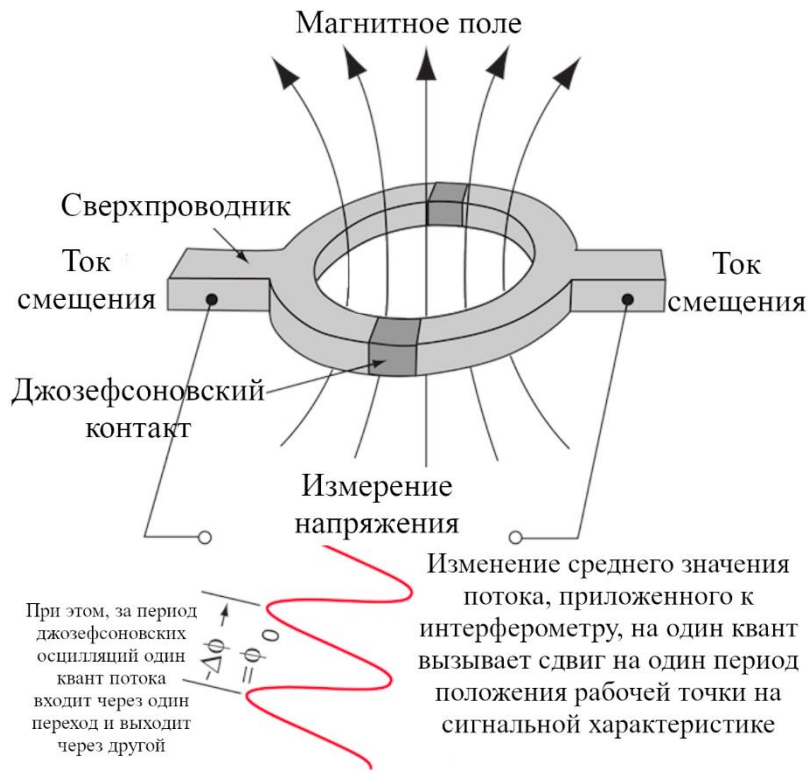


Рис. 7. Общая схема двухконтактного интерферометра.

На двухконтактном интерферометре возможно появление среднего напряжения, \bar{V} , если ток смещения I_{bias} больше критического $I_{C\Sigma}$.

$$\bar{V} = (I_{bias}^2 - I_{C\Sigma}^2(\Phi_e))^{1/2} \quad (11)$$

Вместо уравнения (9) связь между величинами Φ , Φ_e , φ_1 , φ_2 в стационарном случае при I_{bias} меньше критического тока $I_{C\Sigma}$ принимает вид:

$$\Phi = \Phi_e - L_1 I_{C1} \sin \varphi_1 + L_2 I_{C2} \sin \varphi_2, \quad (12)$$

где L_1 и L_2 - индуктивности частей кольца, а разность разностей фаз на переходах определяется потоком внутри интерферометра:

$$\frac{2\pi}{\Phi_0} \Phi = \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_e - L_1 I_{C1} \sin \varphi_1 + L_2 I_{C2} \sin \varphi_2 \quad (13)$$

Как уже было отмечено, двухконтактный интерферометр или СКВИД постоянного тока представляет собой сверхпроводящий контур (кольцо) с двумя джозефсоновскими переходами. Процесс протекания тока в контуре интерферометра в стационарном случае можно сравнить в определенном смысле с оптическим эффектом интерференции от двух щелей, только в данном случае интерферируют не две световые волны, а два джозефсоновских сверхтока. Наличие волновых свойств у «куперовских» пар электронов является существенным для понимания работы СКВИДа. Если через кольцо СКВИДа пропустить постоянный ток I_{bias} величиной меньше $I_{C\Sigma}$, в СКВИДе волна «куперовских» пар электронов разделяется на две, каждая из которых проходит свой туннельный переход, а затем обе волны сводятся вместе.

В случае отсутствия внешнего поля и при его значениях, дающих внешний поток кратным целому числу квантов, обе ветви будут эквивалентны, обе волны придут без разности фаз и суммарный сверхток, как следует из (10), будет максимальным, равным сумме критических токов контактов. Но при отличии внешнего магнитного поля от этих значений в контуре будет наводиться циркулирующий сверхпроводящий ток. Этот ток в одном из контактов будет вычитаться из постоянного внешнего тока, а во втором — складываться с ним. Теперь две ветви будут иметь разные токи, и между туннельными переходами возникнет разность фаз. Волны «куперовских» пар электронов, пройдя через переходы и соединившись, будут интерферировать. Интерференция проявится, как зависимость критического тока СКВИДа $I_{C\Sigma}$ от приложенного внешнего магнитного потока Φ_e . Периодический характер зависимости $I_{C\Sigma}(\Phi_e)$ позволяет чувствовать отдельные кванты магнитного потока от внешнего поля и даже их малые доли, как мы увидим далее.

Если через СКВИД пропустить постоянный ток I_{bias} , несколько превышающий по величине критический ток СКВИДа $I_{C\Sigma}(\Phi_e)$, то на выходных контактах СКВИДа появится напряжение \bar{V} , (11) также являющееся периодической функцией приложенного внешнего магнитного потока Φ_e , с периодом, равным кванту магнитного потока $\Phi_0 = h/2e$. Амплитуда выходного напряжения может составлять 20-50 мкВ. При этом коэффициент преобразования входного магнитного потока Φ_e в выходное напряжение V_{out} (так называемая крутизна «сигнальной» характеристики $\frac{dV_{out}}{d\Phi_e}$) составляет, обычно, от 50 до 200

мкВ/ Φ_0 . Таким образом, регистрируя выходное напряжение СКВИДа с использованием малошумящих усилителей с уровнями собственных шумов $S_{VN}(f)$ порядка $0,5 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$, можно достичь уровней разрешения $S_{\Phi N}$ по магнитному потоку в миллионные доли Φ_0 в единичной полосе частот:

$$S_{\Phi N} = S_{VN} / \left(\frac{dV_{out}}{d\Phi_e} \right) \quad (14)$$

Вольт-амперная характеристика $V_{out}(I)$ и вольт-полевая (или «сигнальная») характеристика $V_{out}(\Phi_e)$ СКВИДа постоянного тока приведены на рисунке 8.

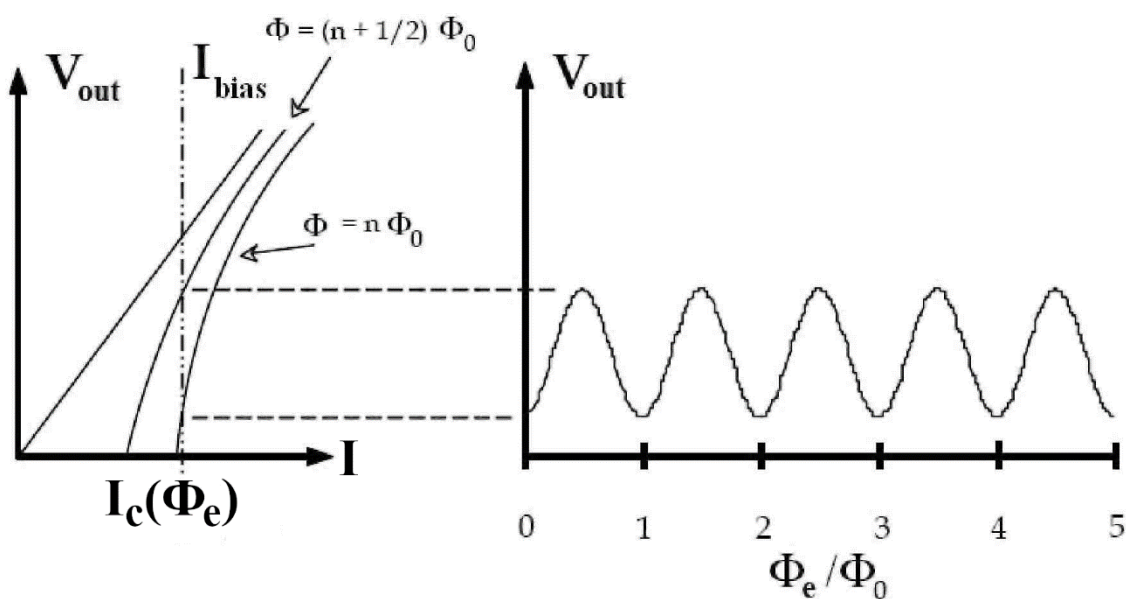


Рисунок 8. Вид вольт-амперной и «сигнальной» характеристик СКВИДа постоянного тока.

1.2. Трансформаторы магнитного потока для СКВИД-магнитометров.

Квантовый характер явлений в СКВИДах может наблюдаться в случае, когда типичная энергия, связанная с изменением числа квантов в интерферометре на единицу, $\frac{\Phi_0^2}{2L}$, существенно больше (примерно на 2 порядка), чем термическая энергия $k_B T$ при рабочих температурах. Подставив цифры, мы увидим, что индуктивность интерферометра должна быть не больше, чем $0,3 \text{ нГн}$. Такому условию соответствуют отверстия в сверхпроводящих пленках, образующих интерферометр, диаметром порядка $0,2 \text{ мм}$. Оценки показывают, что при индуктивности интерферометра на уровне $0,3 \text{ нГн}$, его чувствительность по потоку:

$$S_{\Phi}^2 = 18 \frac{k_B T L^2}{R_1}, \quad (14)$$

где R_1 – нормальное сопротивление одного джозефсоновского перехода, не может быть лучше $5 \times 10^{-6} \Phi_0 / \Gamma \text{ц}^{1/2}$, что соответствует чувствительности по полю для интерферометра с диаметром порядка 0,2 мм на уровне 0,5 пТл. Но такая чувствительность достигается феррозондовыми магнитометрами, работающими при комнатной температуре! Для улучшения чувствительности СКВИДа к магнитному полю и превращению его в уникальный прибор используются трансформаторы магнитного потока (см, например, [11]).

Общая схема трансформатора магнитного потока показана в левой части рисунка 9, он представляет собой замкнутый сверхпроводящий контур, приемная часть которого с индуктивностью L_p , выполняется из ниобиевой сверхпроводящей проволоки толщиной 50 - 100 мкм, которая посредством винтовых соединений (1 и 1') соединяется с отрезками сверхпроводящей ниобиевой фольги или проволоки толщиной порядка 20 мкм, а последние посредством ультразвуковой сварки соединяются в точках (2 и 2') с тонкопленочной сигнальной катушкой L_i , на чипе со СКВИДом.

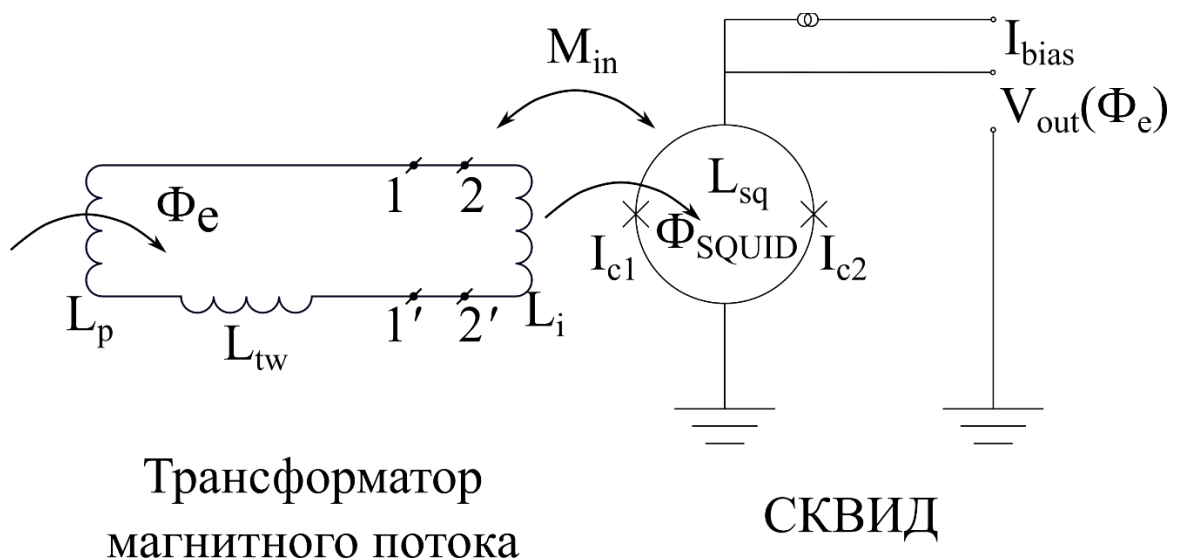


Рисунок 9. Общая схема трансформатора магнитного потока.

Выбор геометрии входной катушки трансформаторов магнитного потока СКВИД-магнитометра определяется тем, какой сигнал предполагается зарегистрировать. Если задачей является измерение однородного магнитного поля, то входную катушку делают одновитковой достаточно большого радиуса R_p (рисунок 10, б). В этом случае эффективная площадь СКВИД-магнитометра увеличивается до значений [6]:

$$S_M = \left(\frac{k}{2}\right) R_p^{3/2} R^{1/2} \quad (15)$$

где k – коэффициент индуктивной связи между катушкой L_i и контуром интерферометра СКВИДа с геометрической индуктивностью L_{SQ} , R – радиус отверстия интерферометра. Сравнивая величину S_M с площадью петли интерферометра πR^2 , при обычных для тонкопленочной технологии значениях k порядка 0.9, $R_p \approx 25$ мм, $R = 0.1$ мм, из этих приблизительных оценок получаем величину выигрыша в чувствительности примерно в два с половиной порядка, то есть до уровня фТл в единичной полосе частот.

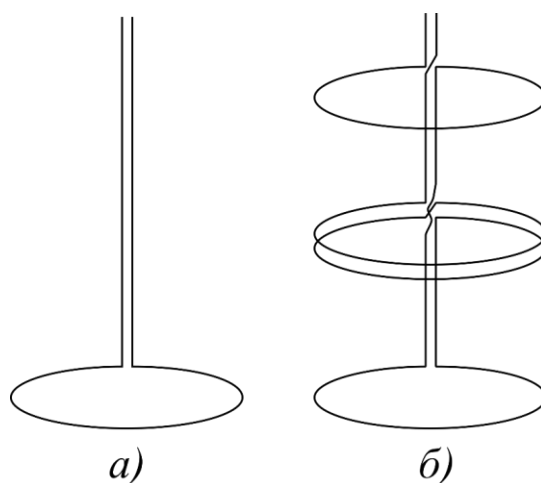


Рисунок 10. Схемы входных петель трансформатора потока для магнитометра –(а), симметричного аксиального градиометра 2-го порядка – (б).

При измерениях неоднородного поля от локальных объектов, например, сердца человека в условиях неэкранированного помещения клиники наиболее часто применяются градиометры второго порядка (рисунок 10, б). Именно такая конструкция приемных петель трансформатора позволяет исключить сигнал однородной помехи и ее градиента первого порядка, и, таким образом, обеспечить необходимый уровень отношения «сигнал-шум» для исследуемых источников.

1.3. Общая схема СКВИД-магнитометра.

Существуют четыре обстоятельства, определяющих общую структуру аналоговой части электронной схемы СКВИД-магнитометра. Во-первых, типичный уровень шумового напряжения на интерферометре составляет 0,1 нВ/Гц^{1/2} и менее, что существенно ниже уровня шумов современных полевых транзисторов. Во-вторых, СКВИД-магнитометры высоко конкурентны при приеме сигналов в низкочастотном диапазоне, где у полевых транзисторов преобладают шумы типа 1/f. В-третьих, сопротивление интерферометра обычно не превышает 10 Ом, в то время как полевые транзисторы дают минимальный шумовой вклад в выходной сигнал при сопротивлениях источника, как минимум в единицы

кОм. И, наконец, периодичность сигнальной характеристики интерферометра позволяет получать выходной сигнал, линейно зависящий от входного в очень узком амплитудном

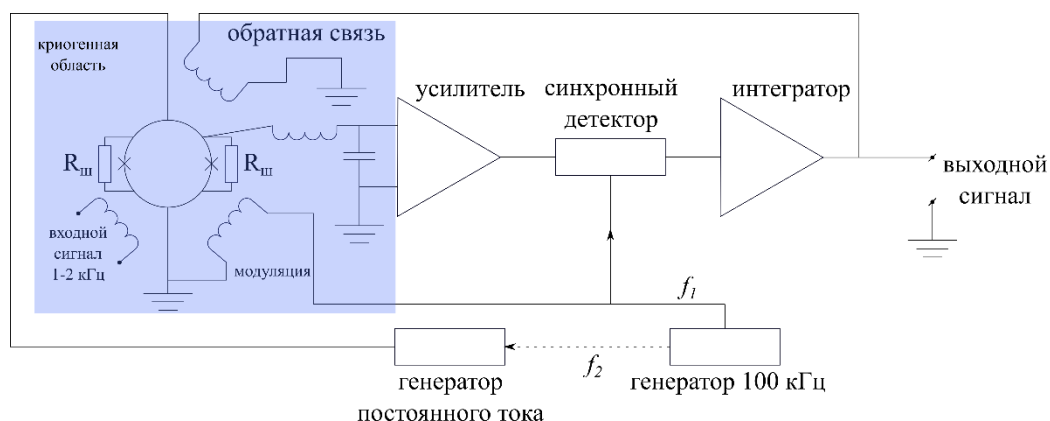


Рисунок 11. Общая схема аналоговой части электроники СКВИД-магнитометра.

диапазоне последнего.

Все эти проблемы решаются в разработанной еще в 70 годах прошлого века общей схеме электроники СКВИД-магнитометра, показанной на рисунке 11.

Основной чертой этой схемы является использование модуляционно-демодуляционной схемы, обычно модулирующей входной сигнал на частотах порядка 20 – 100 кГц для измеряемых сигналов в полосе 1-2 кГц. В схеме, изображенной на рисунке 11, выходной сигнал интерферометра и его шум на частоте модуляции усиливаются в Q раз колебательным контуром, а импеданс интерферометра трансформируется в Q^2 раз. Нетрудно видеть, что при значениях Q порядка 20 шум на входе усилителя будет определяться шумом интерферометра, полоса пропускания контура будет достаточной для измеряемых сигналов, а входной полевой транзистор будет работать практически в оптимальном режиме.

Проблема линеаризации выходного сигнала магнитометра при амплитуде входного сигнала, превышающей доли кванта решается использованием потокозапирающей схемы обратной связи по частоте сигнала (схемы отрицательной обратной связи) после демодуляции, в которой интерферометр работает как нуль-детектор. Общая структура потокозапирающей схемы показана на Рис. 12.

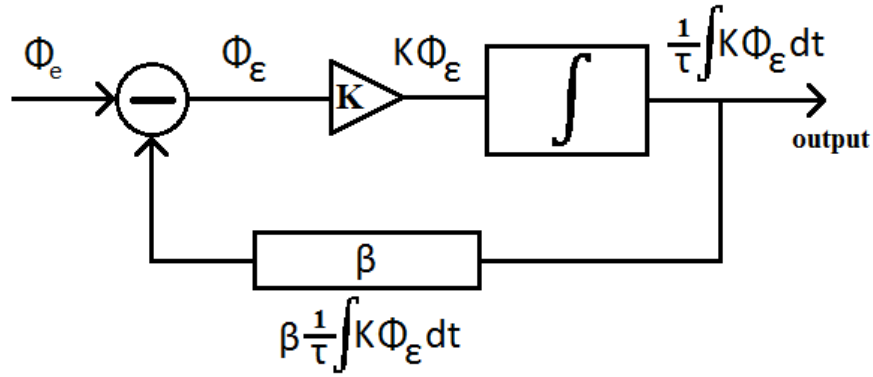


Рис. 12. Общая структура потокозапирающей схемы обратной связи СКВИДа.

В первом приближении, без учета запаздывания, работу этой схемы можно описать следующим образом. Для сигнала ошибки Φ_ε , возникающей на интерферометре при входном сигнале Φ_e , запишем уравнение

$$\Phi_\varepsilon = \Phi_e - \frac{K\beta}{\tau} \int \Phi_\varepsilon dt, \quad (16)$$

где K – коэффициент преобразования магнитного потока, приложенного к интерферометру, в вольты на входе интегратора, β – коэффициент преобразования выходного напряжения интегратора в поток обратной связи, τ – постоянная интегратора.

Дифференцируя получим

$$\frac{d\Phi_\varepsilon}{dt} + \omega_0 \Phi_\varepsilon = \frac{d\Phi_e}{dt} \quad (17)$$

Для простейшего гармонического сигнала с амплитудой Φ_{e0} имеем

$$j\omega\Phi_{\varepsilon0} + \omega_0\Phi_{\varepsilon0} = j\omega\Phi_{e0}, \quad (18)$$

где $\omega_0 = K\beta/\tau$; что дает

$$|\Phi_{\varepsilon0}| = \frac{\omega/\omega_0}{(1+(\frac{\omega}{\omega_0})^2)^{1/2}} \Phi_{e0} \quad (19)$$

Как видно из выражения (19), амплитуда сигнала ошибки на интерферометре при малых значениях ω/ω_0 много меньше амплитуды действующего сигнала Φ_{e0} . При захвате рабочей точки на середине наклонного участка вольт-полевой характеристики максимальное значение сигнала ошибки не может превышать $\pm\Phi_0/4$, иначе произойдет срыв отслеживания сигнала из-за изменения знака $\frac{dV_{out}}{d\Phi_e}$. Поэтому потокозапирающая схема магнитометра имеет предельные значения изменения амплитуды входного сигнала,

измеряемые числом квантов в секунду. Эта характеристика СКВИД-магнитометра получила название “SlewRate” и может быть оценена из выражения (19):

$$\frac{\Phi_{e0}}{\Phi_0} \approx \frac{1}{4} \frac{\omega_0}{\omega} \quad (20).$$

Однако, есть еще одно обстоятельство: напряжение на выходе интегратора ограничено (V_{out} обычно ± 15 В) и максимальный поток обратной связи не превышает $\Phi_{fb} = V_{out}\beta$, и, следовательно, на низких частотах $\omega/\omega_0 \ll 1$ максимальный входной сигнал ограничен величиной Φ_{fmax} , (см. рис. 13) поскольку

$$\Phi_{\varepsilon 0} = (\Phi_{e0} - \Phi_{fb}) \rightarrow 0 \quad (21)$$

В результате, в этом диапазоне, “SlewRate” растет пропорционально частоте, а затем после плато, начинает следовать выражению (20). Естественно, при этом падает и максимально измеряемый сигнал. Отношение амплитуды максимального сигнала, измеряемого на конкретной частоте, к уровню шумов магнитометра в единичной полосе, называется его динамическим диапазоном. Что касается коэффициента передачи в режиме замкнутой обратной связи (отношения выходного сигнала к входному), то при малом сигнале он определяется соотношением (21) и равен 1 как и показано на рисунке 13, суммирующем характеристики СКВИД-магнитометра как прибора.

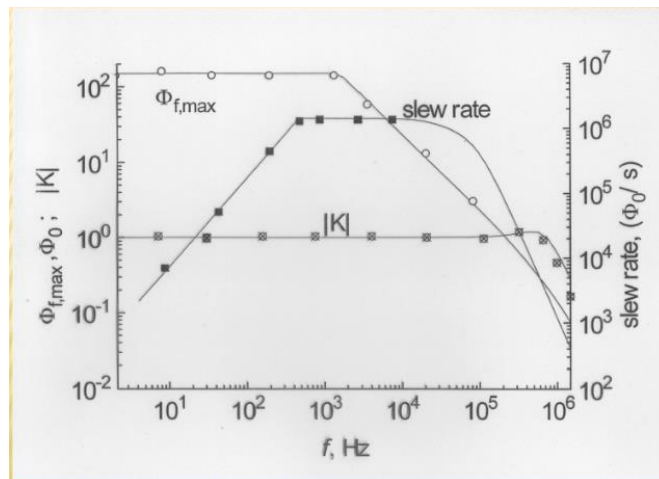


Рисунок 13. Характеристики СКВИД-магнитометра в режиме замкнутой обратной связи.

Безусловно, мы рассмотрели сильно упрощенную модель обратной связи в СКВИД-магнитометре, отбросив влияние запаздывания сигнала τ_d в цепи обратной связи и соответствующее появление фазовых сдвигов. Появление последних учтено в эквивалентной схеме [12], приведенной на Рис. 14.

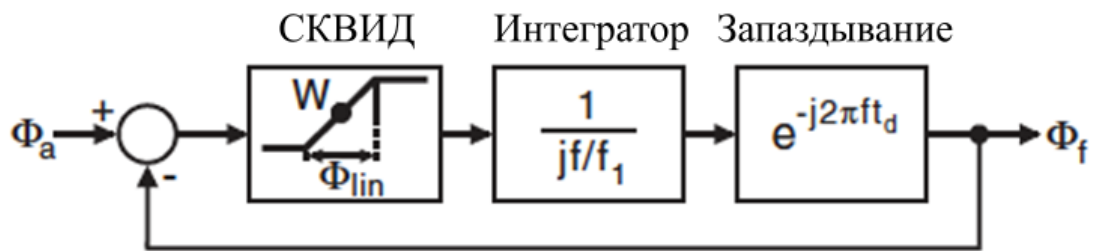


Рис. 14. Схема обратной связи СКВИД-магнитометра, учитывающая фазовые сдвиги.

Частотное поведение коэффициента передачи приведено на Рис. 15.

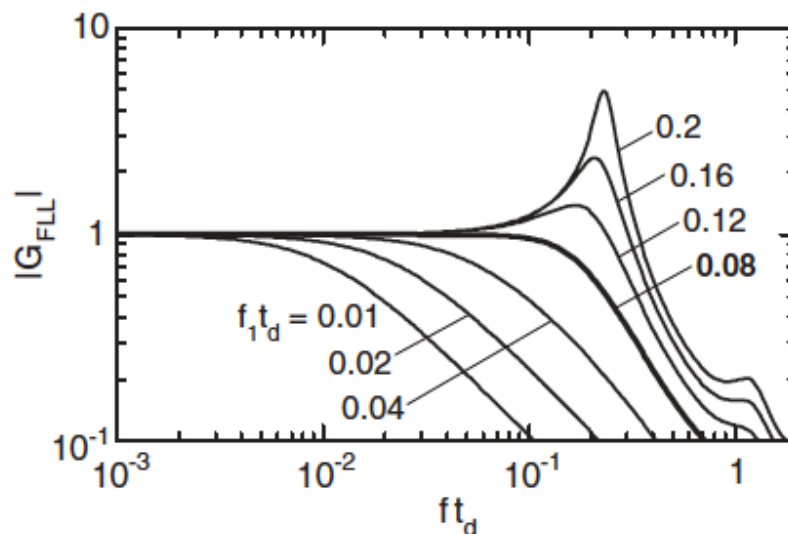


Рис. 15. Зависимость коэффициента передачи сигнала от частоты и величины запаздывания. Частота f_1 - частота, на которой коэффициент передачи разомкнутой цепи равен 1.

Как видно из рисунка 15, наличие запаздывания сигнала в проводах от теплой комнатной электроники до гелиевого или азотного уровня в криостате приводит к выбросам на частоте среза. Жирной линией выделен оптимальный вариант настройки системы (усиление и константы интегратора) при $f_1 \tau_d = 0.08$.

1.4. Список литературы:

- [1]. Kamerlingh Onnes, H., "The Superconductivity of Mercury." Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden; Nos. 122 and 124, 1911.
- [2]. J. Bardeen, L.N. Cooper, and J.R. Schrieffer, "Microscopic Theory of Superconductivity" Phys. Rev. 106; 162 (1957).
- [3]. B.S. Deaver, W.M. Fairbank. "Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders", Phys. Rev. Lett., 7, p. 43, 1961.

- [4]. R. Doll, M. Nebauer. "Experimental Proof of Magnetic Flux Quantization in a Superconducting Ring", *Phys. Rev. Lett.*, 7, p. 51, 1961.
- [5]. D. Josephson. "Possible new effects in superconducting tunneling", - *Phys. Lett*, v. 1, No. 7, p. 251 (1962)
- [6]. К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих. "Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории". М., Изд. Моск. ун-та, 1978.
- [7]. К.К. Лихарев. "Введение в динамику джозефсоновских переходов". М., Наука, 1985.
- [8]. W.C. Stewart. "Current-voltage characteristics of Josephson junctions"- *Appl. Phys. Lett.*, vol. 12, no. 8, 15 April 1968.
- [9]. D.E. McCumber. "Effect of ac impedance on dc voltage-to-current characteristics of superconductor weak-link junction", - *J. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 7, p. 3113, June 1968.
- [10]. G.I. Rohlin, P.K. Hansma and N. Sweet. "Externally shunted Josephson junctions: Generalized weak links",- *J. Phys. Rev. B*4, 3003, 1971.
- [11]. R.L. Fagaly. "Superconducting quantum interference device instruments and applications" *Rev. Sci. Instrum.*, 77, 101101, 2006.
- [12]. D. Drung. "High-Tc and low-Tc dc SQUID electronics". *Supercond. Sci. and Technol.* vol. 16, 1320, 2003.

2. Экспериментальная работа.

Упражнение 1: ВАХ одиночного джозефсоновского контакта.

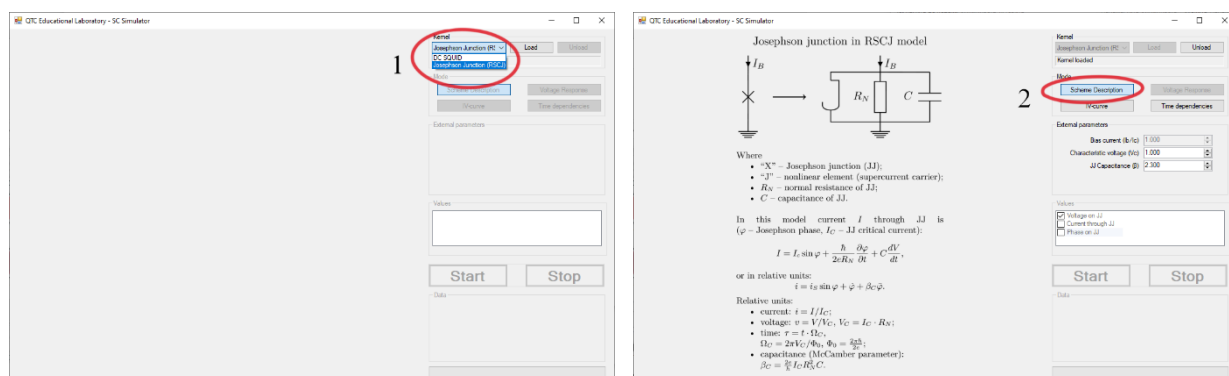
Для выполнения упражнения потребуется знание пункта 1.1 раздела «Теоретическое введение».

1. Освоение интерфейса программы QTC SC Simulator;
2. Изучение влияния параметров моделирования на ВАХ одиночного джозефсоновского контакта;
3. Освоение моделирования ВАХ в консольном режиме с сохранением данных в файл и построение графиков для отчёта.

На рабочем столе компьютера находятся папка «code» и ярлык программы «QTCLabSCSim». В браузере Google Chrome в «Google документах» можно найти шаблон отчёта.

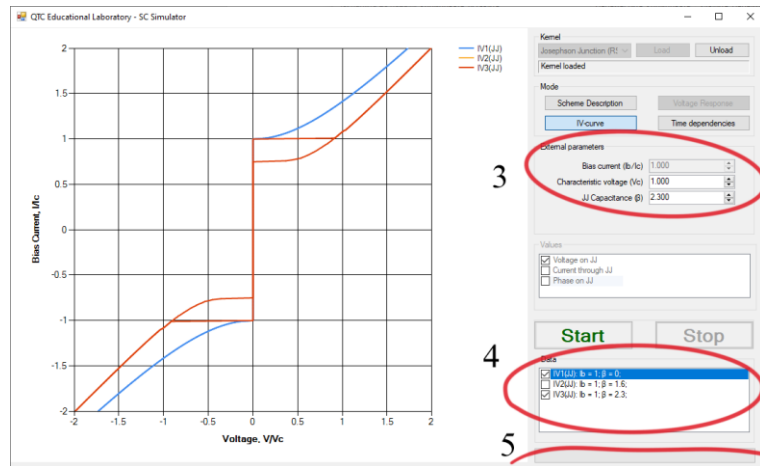
1.1. Интерфейс программы QTC SC Simulator

Для начала работы с программой после запуска необходимо выбрать «ядро» -- для упражнения 1 это «Josephson Junction (RSCJ)» и нажать кнопку «Load».



После этого в левой части окна программы отобразятся схема, эквивалентная схема и краткое описание математической модели. Вернуться к описанию схемы можно по нажатию кнопки «Scheme description».

При нажатии на кнопку «IV-curve» появляется интерфейс моделирования джозефсоновского контакта. После настройки параметров моделирования (3) и нажатия кнопки «Start» прогресс моделирования можно увидеть на полоске в правом нижнем углу экрана (5), по окончании процесса можно скрыть лишние графики в окне (4), нажав на галочку.



N.B.: если при начале симуляции программа завершает работу с ошибкой, следует изменить в «Региональных стандартах» операционной системы десятичный разделитель с запятой на точку.

Контрольные вопросы:

- В каких случаях (при каких параметрах моделирования) на ВАХ наблюдается гистерезис?
- На что влияет параметр V_c ?

1.2. Консольный режим

В папке «code» в подпапке «Release» находится набор скриптов, позволяющих провести моделирование поведения джозефсоновского перехода без графического интерфейса, а также сохранить результаты моделирования в виде значений в текстовом файле. Скрипт «IVCurvLauncher» строит зависимость одной величины от другой и сохраняет результаты в текстовый файл; скрипт «CnfGenerator» позволяет запускать предыдущий скрипт множество раз, незначительно меняя внешние параметры.

При запуске «IVCurvLauncher» откроется диалоговое окно, в котором будет предложено открыть файл «ядра» симуляции. Если «ядро» одиночного джозефсоновского контакта «JJ.cbe» отсутствует в папке «code», его можно найти в папке `C:\ProgramData\QTC\LabSCSim\Kernels`.

После считывания ядра скрипт укажет, какие переменные входят в симуляцию (1) (V , I , P – напряжение на контакте V , ток через контакт I и разность фаз P соответственно). Также, будут указаны внешние параметры симуляции (2) – ток смещения I_b (I_B), «критическое напряжение» V_c (V_C), параметр Маккамбера β (B). Например, для изменения

параметра β симуляции следует по запросу «Select external to change» нажать 3 и Enter, после чего ввести новое значение β .

```
(98%) C:\ProgramData\QTCLabSCSim\Kernels\JJ.cbe
Selected CBE: C:\ProgramData\QTCLabSCSim\Kernels\JJ.cbe
Temporary name:
CBE initialization success.

VALUES:
V
I
P

EXTERNAL:
1 IB=1.000000
2 VC=1.000000
3 B=0.000000

Select external to change (0 - continue): 3
> Value:1
> EXTERNAL B will be set as 1.000000

Select external to change (0 - continue): 0

Select variable EXTERNAL: 1
>Variable EXTERNAL: IB
>Range start:-3
>Range end:3
>Step:0.1
>offset (0-to inf):0

Output file:
CBE initialization success.
Set EXTERNAL: B=1.000000;
0%      -3.000000E+000  -2.983017E+000
1%      -2.900000E+000  -2.881348E+000
3%      -2.800000E+000  -2.779498E+000
5%      -2.700000E+000  -2.677602E+000
6%      -2.600000E+000  -2.574962E+000
8%      -2.500000E+000  -2.472234E+000
10%     -2.400000E+000  -2.368883E+000
11%     -2.300000E+000  -2.265201E+000
13%     -2.200000E+000  -2.160627E+000
15%     -2.100000E+000  -2.055247E+000
16%     -2.000000E+000  -1.948731E+000
18%     -1.900000E+000  -1.841004E+000
20%     -1.800000E+000  -1.731727E+000
21%     -1.700000E+000  -1.620415E+000
23%     -1.600000E+000  -1.499070E+000
25%     -1.500000E+000  -1.383073E+000
```

При вводе «0» предлагается выбрать внешний параметр, который будет являться переменной (для построения ВАХ мы меняем ток смещения I_B), а также пределы его изменения и шаг. Параметр «offset» не является частью симуляции; достаточно ввести 0 или 1.

После ввода всех параметров появится диалоговое окно, в котором предлагается выбрать расположение и имя сохраняемого текстового файла со значениями. Сами значения также будут продублированы в окне консоли.

Значения из полученного текстового файла возможно импортировать в предпочитаемую программную среду и обработать; в рамках упражнения 1 требуется только построить на их основе график. В папке «code\plot» лежат скрипты на языке Python

для импорта значений и построения графиков, для их запуска на компьютере установлена и настроена Visual Studio Code.

Н.В. Обратите внимание, что при консольном запуске скрипта переменная «проходится только в одном направлении» – в указанном примере от -3 до 3, но не наоборот. Это означает, что для корректного отображения гистерезиса построенный график нужно будет продублировать, а затем отразить по горизонтали и по вертикали (скрипт «IVCurvLauncher» не поддерживает отрицательные шаги).

1.3. Выполнение упражнения

- В качестве отчёта предоставьте таблицу из двух столбцов: графики ВАХ и параметры, при которых они были получены.
- Из таблицы должно быть видно, как изменение параметров симуляции влияет на вид графика ВАХ.

Упражнение 2: Вольт-амперная и вольт-полевая характеристики СКВИДа постоянного тока.

Для выполнения упражнения потребуются знание пункта 1.2 раздела «Теоретическое введение».

2.1. Изменения в интерфейсе программы QTC SC Simulator и консоли.

После запуска программы следует выбрать «ядро» «DC SQUID» и нажать кнопку «Load».

Where

- J1 and J2 – Josephson junctions (identical);
- I_B – bias current;
- L – inductance of the loop;
- Φ_e – external magnetic flux;
- V – output voltage.

Josephson junctions are considered in RSCJ model:

- I_C – critical current;
- R_N – normal resistance;
- $V_C = I_C R_N$;
- C – capacitance.

All set and simulated values are given in relative units:

- currents: $i = I/I_C$;
- voltages: $v = V/V_C$;
- fluxes: $\varphi = \Phi/\Phi_0$, $\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar}{2e}$;
- capacitance of JJ (McCumber parameter): $\beta_C = \frac{2e}{\hbar} I_C R_N^2 C$;
- inductance: $l = L/L_C = \frac{2\pi L I_C}{\Phi_0}$.

В качестве параметров моделирования доступны индуктивность, внешний поток, ток смещения (в относительных единицах) и параметр Маккамбера. При этом возможно построение двух характеристик – зависимости напряжения на СКВИДе от тока смещения и от внешнего магнитного потока.

```
(98%) C:\ProgramData\QTCLabSCSim\Kernels\DCSQUID.cbe
Selected CBE: C:\ProgramData\QTCLabSCSim\Kernels\DCSQUID.cbe
Temporary name:
CBE initialization success.

VALUES:
V1
V2
I1
I2
P1
P2

EXTERNAL:
1 L=0.001000
2 PHIEX=0.500000
3 IB=2.000000
4 B=0.000000

Select external to change (0 - continue): 0

Select variable EXTERNAL: 2
>Variable EXTERNAL: PHIEX
>Range start:-3
>Range end:3
>Step:0.1
>Offset (0-to inf):0

Output file:
CBE initialization success.
Set EXTERNAL:
0%      -3.000000E+000  -1.296947E-004
1%      -2.900000E+000  3.103789E-001
3%      -2.800000E+000  5.884980E-001
5%      -2.700000E+000  8.090815E-001
6%      -2.600000E+000  9.506050E-001
8%      -2.500000E+000  9.999999E-001
10%     -2.400000E+000  9.506102E-001
11%     -2.300000E+000  8.090904E-001
13%     -2.200000E+000  5.885106E-001
15%     -2.100000E+000  3.103782E-001
16%     -2.000000E+000  3.006649E-005
18%     -1.900000E+000  3.103792E-001
20%     -1.800000E+000  5.885000E-001
21%     -1.700000E+000  8.090799E-001
23%     -1.600000E+000  9.506051E-001
25%     -1.500000E+000  9.999999E-001
26%     -1.400000E+000  9.506067E-001
28%     -1.300000E+000  8.090738E-001
```

При запуске «IVCurvLauncher» также следует выбрать ядро «DC SQUID». При выборе параметра «PHIEX» в качестве переменной будет построена вольт-полевая характеристика, а при выборе «IB» будет построена вольт-амперная.

2.2. Выполнение упражнения

- В шаблоне для упражнения 2 заполните все пустые ячейки таблицы.
- С помощью данных моделирования, полученных через консоль, постройте сдвоенный график вольт-амперной и вольт-полевой характеристик (рис. 8 раздела «Теоретическое введение»)

Упражнение 3: Основные принципы работы с ВТСП-магнитометром

Для выполнения упражнения потребуется знание пунктов 1.3 и 1.4 раздела «Теоретическое введение».

Перед началом работы:

1. Убедитесь, что все используемые приборы выключены
2. Соблюдайте технику безопасности работы с жидким азотом – не допускайте попадания жидкого азота ни на кожу, ни на закрытые одеждой участки тела
3. Заливку криостата жидким азотом следует производить медленно и с перерывами – это позволит охладить внутренние стенки криостата за счёт паров азота. Заливку следует проводить до уровня 2/3 от максимального объёма.
4. Погружать измерительный зонд с СКВИД-датчиком также следует очень медленно. Учитывайте, что пермалловый магнитный экран имеет большую массу, а потому высокую тепловую инертность.
5. Закручивать винты для закрепления зонда в криостате следует крест-накрест.
6. Только после выполнения всех предыдущих пунктов следует подключать аппаратуру, причём в выключенном состоянии!

3.1. Настройка датчика и измерение его характеристик.

1. Включите аппаратуру – генератор сигналов, осциллограф, блок управления датчиком.
2. Запустите программу измерения 1ch.exe
3. Произведите выбор порта для коммуникации с блоком электроники, как правило он имеет название ADC ch1, нажмите кнопку «Просмотр» для отображения сигнала с АЦП.
4. Программа содержит меню для настройки измерительного канала.

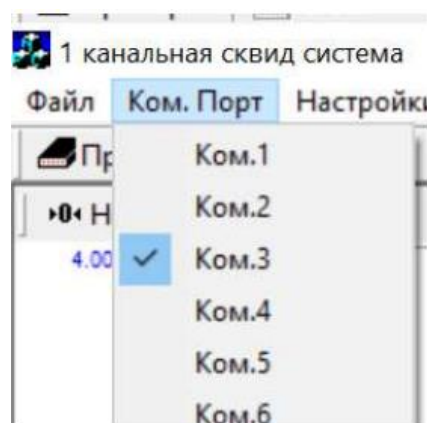


Рис. 13. Общий вид окна выбора номера порта для управления магнитометром.

Кнопки имеют следующие назначения:

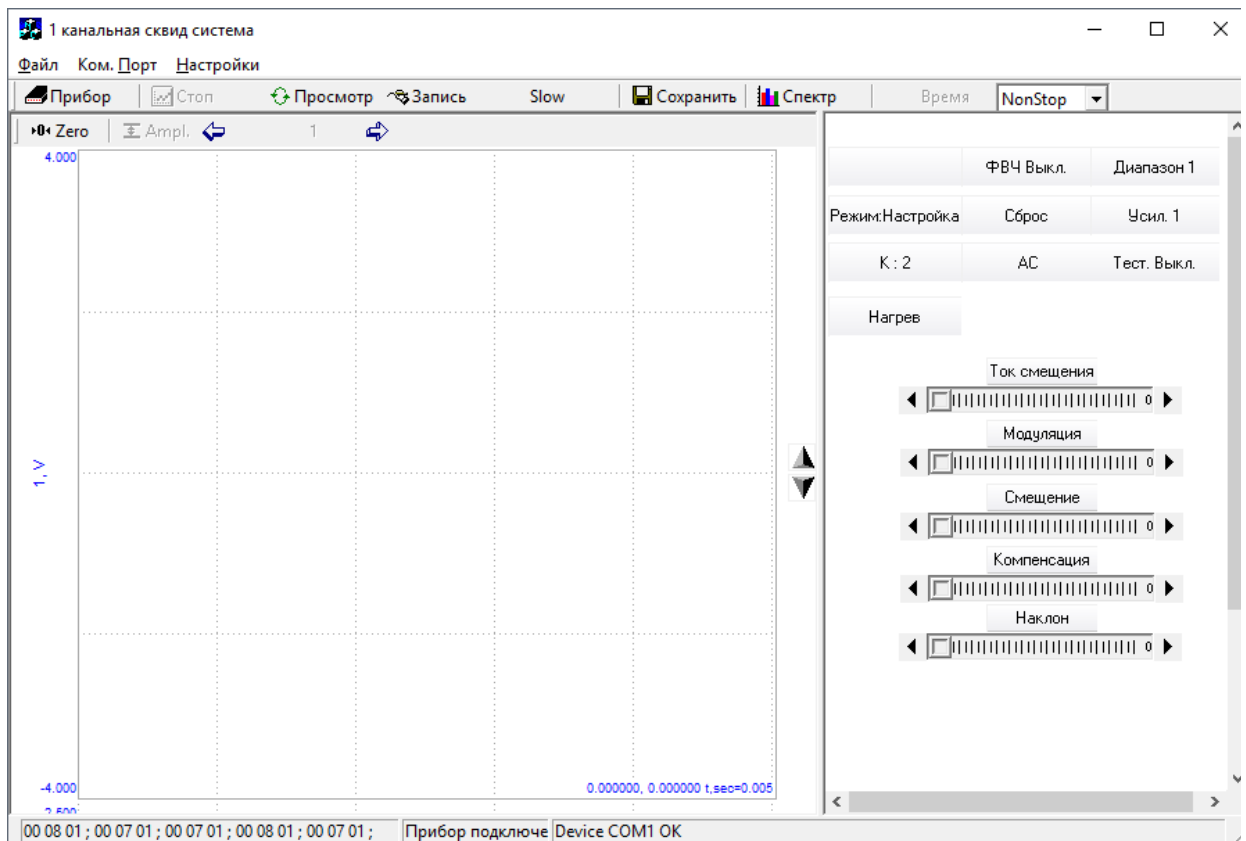


Рис. 14. Общий вид интерфейса программы:

“Adjust” – “Настройка” - режим работы

“Work” – “Работа” - режим работы

“×1” - значение коэффициента усиления дополнительного усилителя равно 1.

“×10” - значение коэффициента усиления дополнительного усилителя равно 10.

“DC” – Смещение СКВИДа постоянным током;

“AC” – Смещение СКВИДа переменным током на высокой частоте;

“Нагрев” – включение нагревателя

“Прибор” – Сохранение всех параметров, установленных на экране, в блоки электроники.

5. Нажмите следующие кнопки: “Adjust”, “DC”, и адрес, как показано на рис. 15.

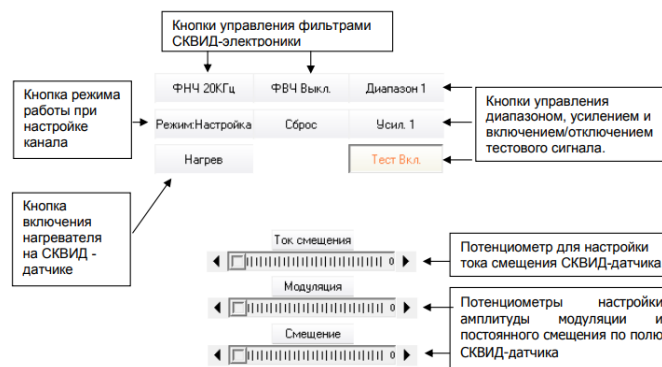


Рис. 15. Общий вид окна настройки параметров магнитометрического канала.

6. Подайте с генератора тестовый синусоидальный сигнал частотой 80 -100 Гц и амплитудой несколько Вольт на разъем "TEST" блока согласования. Выходной разъем "OUT" блока управления соедините со входом "Y" осциллоскопа.
7. С выхода звукового генератора подайте сигнал амплитудой 1-2 Вольт и частотой 80 – 120 Гц на разъем «Test» блока согласования.
8. Движением мыши или установите потенциометр «Mod» в среднее положение. Движением потенциометра "BIAS" слева направо добейтесь появления сигнала на экране осциллоскопа и установите его максимальное значение.
9. Движением потенциометра "MOD" найдите первый максимум выходного сигнала (Рис.16) ВТСП-СКВИД-сенсора. Заметьте значение этого параметра (цифровое значение параметра высвечивается в левой или правой части потенциометра «Mod») и не изменяйте его больше в ходе измерений. Запишите значение амплитуды выходного сигнала, при котором на кривой в режиме «Настройка» умещается один период синусоидального сигнала между двумя соседними широкими частями графика. Такая кривая будет соответствовать одному кванту магнитного потока, а измеренная величина и будет ГОС – глубиной обратной связи.

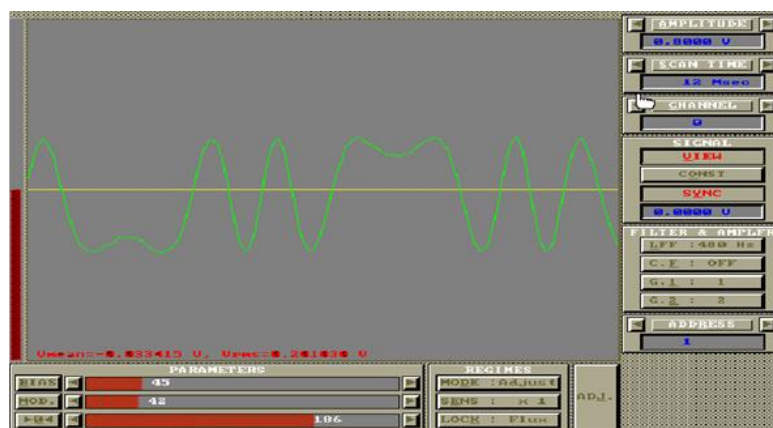


Рис. 16. Вид выходного сигнала измерительного канала в режиме разомкнутой обратной связи (“Adjust”), соответствующий величине магнитного потока $\Phi_0 = 2,07 \times 10^{-15}$ Вб на входе ВТСП-СКВИД-датчика.

1.4. Запись спектра сигнала и его обработка.

1. После нажатия на кнопку «Спектр» (рис.14), откроется окно спектр-анализатора, в котором следует выбрать двойные логарифмические координаты нажатием кнопки «Лог.». В окне спектр-анализатора можно пронаблюдать общую картину записываемого сигнала, но невозможно его обработать.
2. Настройте генератор сигналов таким образом, чтобы на его выходе был пилообразный или модулированный сигнал частотой 100-900 мГц.

3. Закройте окно спектр-анализатора и нажмите кнопку «Запись». Записываемая кривая окрасится в красный цвет, а данные с АЦП начнут записываться в файл temp1.dat. Измерения следует проводить в течение одной минуты.
4. Нажмите на кнопку «Сохранить». Откроется диалоговое окно, в котором следует выбрать файл temp1.dat и нажать кнопку «Открыть», затем откроется диалоговое окно, в котором следует ввести желаемое имя файла (фамилия, дата, тип сигнала и его частота), и нажать на кнопку «Сохранить».
5. В сохранённом файле содержатся выполненные измерения в двух колонках – время и значение напряжения. По данным измерения постройте график спектральной плотности мощности сигнала в любой программной среде (для среды Visual Studio Code можно воспользоваться готовым скриптом в папке «code»), посчитайте отношение «сигнал/шум» на частоте, близкой к частоте сигнала.
6. Повторите измерения для частоты 10-30 Гц.

1.5. Отчёт.

В качестве отчёта предоставьте:

1. Измеренное значение глубины обратной связи.
2. Графики зависимости выходного напряжения на СКВИДе от времени для обоих измеренных сигналов.
3. Графики спектральной плотности мощности и рассчитанное значение отношения «сигнал/шум» для обоих сигналов.