

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



C-3935

B-191

554 / 1-77

P13 - 10171

Б.В.Васильев, В.В.Данилов, А.В.Сермягин

О ФАЗОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ
СИГНАЛА КВАНТОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

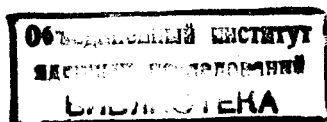
1976

P13 - 10171

Б.В.Васильев, В.В.Данилов, А.В.Сермягин

О ФАЗОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ
СИГНАЛА КВАНТОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Направлено в ЖТФ



Васильев Б.В. и др.

P13 - 10171

О фазовой зависимости сигнала квантового интерферометра

Теоретически методом гармонического баланса рассчитана фазовая зависимость сигнала квантового сверхпроводящего интерферометра.

Форма экспериментально полученной зависимости фазы от внешнего потока удовлетворительно совпадает с предсказаниями расчета.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1976

Vasiliev B.V. et al.

P13 - 10171

On Phase Dependence of the Quantum
Interferometer Signal

The phase dependence of the quantum superconducting interferometer signal has been calculated theoretically with the aid of the harmonic balance method. The form of the experimentally obtained phase dependence on the external magnetic flux coincides satisfactorily with the theoretical predictions.

The investigation has been performed at the Neutron Physics Laboratory, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research
Dubna 1976

© 1976 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

1. Введение

В качестве датчика сверхпроводящего квантового интерферометра переменного тока используется так называемый СКВИД, представляющий собой малую сверхпроводящую индуктивность /сверхпроводящий виток/, зашунтированную слабым контактом. В интерферометре СКВИД индуктивно связывается с добротным колебательным контуром, который возбуждается на частоте, близкой к резонансу, источником радиочастотной накачки /1,2/. Сигналом квантового интерферометра обычно /1,2/ служит приращение амплитуды колебаний на контуре A , возникающее при воздействии на СКВИД внешнего магнитного потока Φ_e . Однако воздействие СКВИДА на колебательный контур этим не ограничивается и приводит еще к зависимости от Φ_e /кроме изменения A / фазовых соотношений процессов в контуре /3/. В результате при использовании фазового детектирования сигналом интерферометра может служить величина сдвига фаз θ между колебаниями напряжения в контуре и в источнике накачки. Рассмотрение этого вопроса является целью данной работы.

2. Расчет зависимости сдвига фаз θ от внешнего магнитного потока Φ_e

Процессы, происходящие в квантовых интерферометрах переменного тока /1,2,4/, в которых добротность контура велика ($Q \gg 1$) и связь контура со СКВИДОм мала

($k^2 \ll 1$), могут быть проанализированы в приближении гармонического баланса, более подробно рассмотренном в работе /2/. В этом приближении нетрудно получить в общем случае для искомого сдвига фаз следующее уравнение:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\phi_k - k^2 Q \ell i_{R_s}}{2 \xi Q \phi_k - k^2 Q \ell i_{R_c}} \quad /1/$$

Здесь, как и ранее /2,5/, мы использовали обозначения: ϕ_k - приведенная величина тока в контуре I_k ; k - коэффициент индуктивной связи СКВИДа и контура; $\ell = \frac{2\pi L_R I_0}{\Phi_0}$ -

основной параметр СКВИДа; L_R - индуктивность

СКВИДа; Φ_0 - квант магнитного потока; $\xi = \frac{\omega - \omega_k}{\omega}$ - расстройка частоты колебаний источника накачки ω относительно собственной частоты контура ω_k ; i_{R_s}, i_{R_c} - синусная и косинусная компоненты тока в СКВИДе I_R , нормированного на критический ток контакта I_0 .

Исследование фазовой зависимости в общем случае весьма сложно, однако интересные с экспериментальной точки зрения результаты можно получить, проведя анализ соотношения /1/ при следующих допущениях:

1/ рассмотрим случай $\ell \gg 1$ при условии, что в СКВИДе происходит лишь первая пара скачков в одном периоде радиочастотных колебаний /5/;

2/ ввиду того, что выражение /1/ справедливо лишь в случае, когда скачки в СКВИДе происходят в каждом периоде колебаний, рассмотрим значения приведенной амплитуды источника накачки $\epsilon = \epsilon_1$ вблизи конца первого плато зависимости $\phi_k(\epsilon)$ /1,2/.

Условие $\ell \gg 1$ позволяет использовать значения i_{R_s}, i_{R_c} полученные в /5/:

$$i_{R_s} = -\frac{4}{\ell}; \quad i_{R_c} = \frac{\phi_k}{\ell} - \frac{4}{\pi \ell} - \frac{4\sqrt{\pi - |\phi_e|}}{\ell \cdot \sqrt{\ell}} \quad /2/$$

где $\phi_e = 2\pi \frac{\Phi_e}{\Phi_0}$ - приведенная величина потока Φ_e ,

причем всегда $|\phi_e| \leq \pi$ и значение ϕ_k на плато при этом равно:

$$\phi_k = \phi_k^* - \phi_e = \ell + \pi/2 - \phi_e \quad /3/$$

При амплитудном детектировании чувствительность интерферометра γ_a может быть определена как наклон характеристики $A(\Phi_e)$, в оптимальном случае величина γ_a равна /1,2/:

$$\gamma_a = \gamma_0 = \frac{\omega}{k} \sqrt{L_k / L_R} \quad /4/$$

здесь L_k - индуктивность колебательного контура. По аналогии, при фазовом детектировании чувствительность интерферометра удобно определить следующим образом:

$$\gamma_\theta = |A \frac{\partial \theta}{\partial \Phi_e}| = \gamma_0 |\phi_k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \phi_e}| \quad /5/$$

Используя /1/-/3/, получим для отношения чувствительности в этих двух режимах следующее выражение:

$$\frac{\gamma_\theta}{\gamma_0} = |\phi_k \frac{\partial \theta}{\partial \phi_e}| = \phi_k \frac{k^2 Q}{(\epsilon_1 Q)^2} \left| (8\xi Q - 4k^2 Q + \frac{2\sqrt{\ell}}{\sqrt{\pi - |\phi_e|}} + \frac{8k^2 Q - \pi}{\sqrt{\ell} \cdot \sqrt{\pi - |\phi_e|}}) \right| \quad /6/$$

где

$$(\epsilon_1 Q)^2 = [\phi_k + 4k^2 Q]^2 + [2Q \cdot \phi_k \cdot (\xi - \frac{k^2}{2}) + \frac{4k^2 Q}{\pi} - \frac{4\sqrt{\pi - |\phi_e|}}{\sqrt{\ell}}]^2 \quad /7/$$

В связи с тем, что полученные уравнения выведены для случая гистерезисного режима и в нашем приближении $\pi - |\phi_e| \gg 1/\ell$, расходимости в уравнении /6/ нет.

Анализ выражений /6/-/7/ показывает, что при достаточно большой величине параметра $\sqrt{\ell}$ оптимальная чувствительность в фазовом режиме получается при значениях расстройки:

$$\xi_{\text{opt}} = \frac{k^2}{2}. \quad /8/$$

При этом для повышения чувствительности оказывается целесообразным увеличивать параметр (k^2Q) , в то время как при амплитудном детектировании обычное условие оптимума есть $k^2Q = 1$ /1,2,4/.

Оценивая чувствительность в этих двух случаях, получим

$$\gamma_\theta / \gamma_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi - |\phi_e|}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\ell}}, \quad k^2Q = 1; \quad /9/$$

$$\gamma_\theta / \gamma_0 = 0,4 \frac{\sqrt{\ell}}{\sqrt{\pi - |\phi_e|}}, \quad k^2Q = \ell \gg 1. \quad /10/$$

Следовательно, для больших значений ℓ, k^2Q чувствительность при фазовом детектировании может превышать максимальную чувствительность интерферометра в амплитудном режиме γ_0 .

Выражения /6/-/7/ позволяют получить форму сигнала интерферометра в режиме фазового детектирования в виде следующей зависимости:

$$\theta(\phi_e) \approx C_1 \phi_e + C_2 \sqrt{\pi - |\phi_e|}. \quad /11/$$

Здесь C_1 и C_2 - константы, определяемые условиями настройки. Таким образом, при расстройке, близкой к оптимальной, зависимость $\theta(\phi_e)$ должна быть близкой к параболической, как это показано на рис. 1.

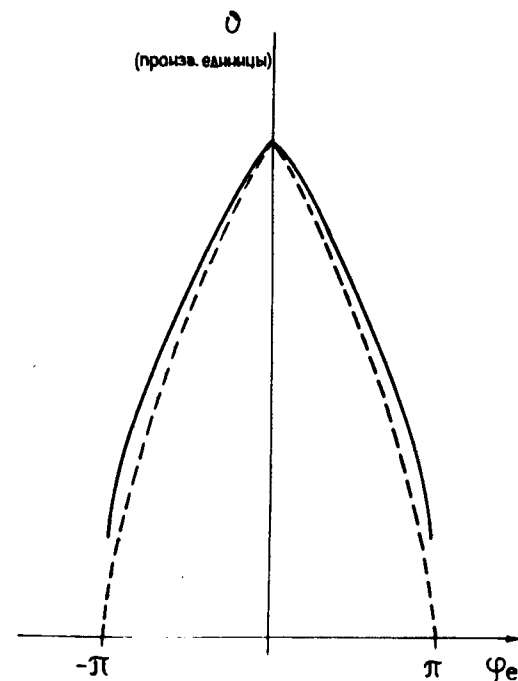


Рис. 1. Форма сигнала квантового интерферометра при использовании фазового детектирования; сплошная кривая - экспериментальный результат, пунктирная кривая - теоретическая зависимость /11/ $\theta - \sqrt{\pi - |\phi_e|}$, нормированная на амплитуду экспериментального значения $\theta(\phi_e)$.

Экспериментальное определение фазовой зависимости сигнала квантового интерферометра производилось по схеме время-амплитудного преобразования с помощью аппаратуры, блок-схема которой представлена на рис. 2. Измерялась разность фаз, точнее, время задержки в прохождении через нуль высокочастотного напряжения накачки и напряжения на колебательном контуре, усиленного широкополосным усилителем. Дискриминаторы нулевого напряжения в обоих каналах вырабатывали наносекундные импульсы, управляющие ключевым устройством, в качестве которого служил триггер с раздельным запуском. Для инверсии сигнала дискриминатора нуля и согласования с триггером между ними

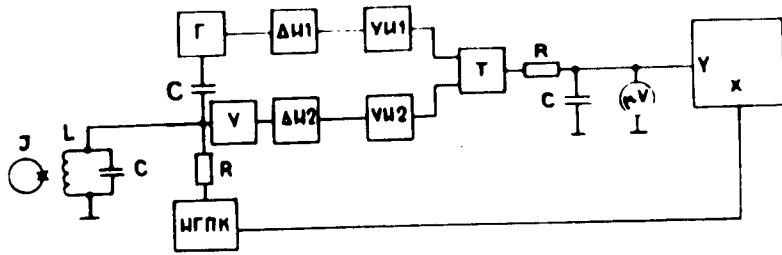


Рис. 2. Блок-схема измерительной аппаратуры. J - СКВИД, LC - контур, Г - генератор, НГПК - низкочастотный генератор пилообразного напряжения, У - усилитель, ДИ1, ДИ2 - дискриминаторы нуля, УИ1, УИ2 - импульсные усилители, Т - триггер с отдельным запуском, RC - интегрирующая цепочка, μV - микровольтметр, УХ - двухкоординатный самописец.

ставился инвертирующий импульсный усилитель. Выходной сигнал низкой частоты формировался интегрирующей цепочкой, служившей нагрузкой триггера. При измерении фазовой зависимости $\theta(\phi_e)$ сигнал с интегрирующей цепочки подавался на ось "у" двухкоординатного самописца, на ось "х" которого подавалось медленно и линейно растущее напряжение от источника модуляции внешнего потока. Типичный график полученной фазовой зависимости представлен на рис. 3а. Шумы используемой схемы время-амплитудного преобразования лежали на уровне, близком к 10^{-12} с. Полный размах напряжения на интегрирующей цепочке при изменении внешнего потока на полкванта соответствовал времени $\sim 10^{-10}$ с при частоте накачки, близкой к 7 МГц. Для сравнения полученного результата при тех же условиях развертки на том же СКВИДе была снята амплитудная зависимость сигнала, которая показана на рис. 3б.

Качественное согласие полученной формы фазовой зависимости и теоретически предсказанной позволяет сделать вывод об адекватности избранного нами теоретического подхода и допустимости тех ограничений, которые были использованы при вычислениях.

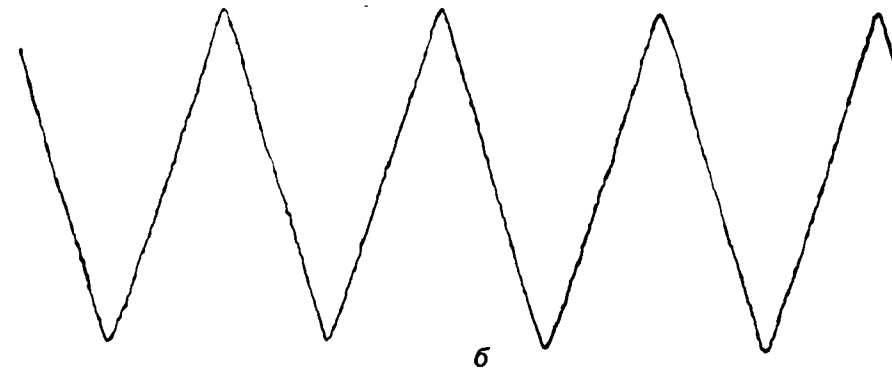
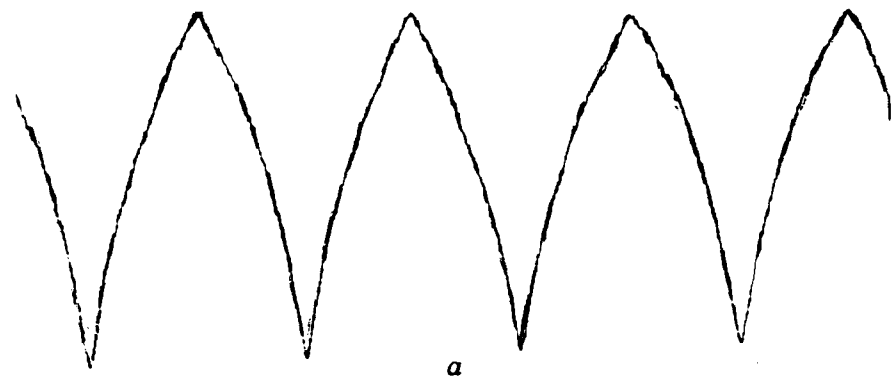


Рис. 3. Типичные графики измеренных фазовой /а/ и амплитудной /б/ зависимостей сигнала квантового интерферометра.

Экспериментально полученные значения чувствительности при амплитудном и фазовом детектировании примерно одного порядка /рис. 3/. Это, видимо, связано с тем, что все эксперименты проводились при одном и том же значении коэффициента связи k , хотя условия оптимума в этих двух режимах, как отмечалось выше, существенно отличаются.

Литература

1. J. Clark. Proc. IEEE, 61, 7 /1973/.
2. Б. В. Васильев, В. В. Данилов, К. К. Лухарев. Препринт ОИЯИ, P13-8233, Дубна, 1974.
IEEE Trans. Magn., vol. Mag.-11, 743 /1975/.
3. D. Pascal and M. Sauzade. J. Appl. Phys., 45, 3085 /1974/.
4. Б. В. Васильев, А. И. Иваненко, В. Н. Трофимов. Радиотехника и электроника, XX, №6, 1255 /1975/.
5. Б. В. Васильев, В. В. Данилов, К. К. Лухарев. Препринт ОИЯИ, P13-8790, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 октября 1976 года.