

Н. И. Фирсов

(Новосибирск)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБЪЕМНЫХ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КВАНТОВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ
В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ**

Исследованы возможности применения высокотемпературных сверхпроводящих квантовых интерферометров в измерительных комплексах. Для этого использованы квантовые интерферометры различных конструкций: одноконтурные, двухконтурные, типа Харви. Рассмотрены следующие характеристики измерительных комплексов: коэффициент преобразования входного магнитного потока в выходное напряжение измерительного канала, порог чувствительности, частотная зависимость спектральной плотности входного шума, амплитудно-частотная характеристика преобразования магнитного потока в выходное напряжение измерительного канала, верхняя граничная частота полосы пропускания измерительного канала. Описана методика исследований этих характеристик и приведены результаты. Показано, что наиболее перспективным интерферометром является интерферометр типа Циммермана. Даны примеры использования магнитометра в конечных измерительных системах.

Введение. После открытия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) внимание разработчиков сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков (СКВИДов) и систем на их основе стало переключаться на эти материалы. Но при исследовании электрофизических свойств новых материалов и первых интерферометров (на основе этих материалов) обозначилось несколько основных проблем, успешное решение которых позволило бы высокотемпературным СКВИДам занять место низкотемпературных. Эти проблемы сформулированы следующим образом [1].

1. Необходимость изготовления ВТСП-трансформаторов магнитного потока, включающих как приемную, так и выходную катушки. На тот период времени [1] еще не было технологии изготовления проволок из ВТСП-материала, поэтому высокотемпературные СКВИДы имели меньшую чувствительность, чем низкотемпературные [2]. К настоящему времени данная проблема решена. Сейчас изготовить ВТСП-трансформатор потока не представляет особого труда [3–9]. Обычно его выполняют на той же тонкой ВТСП-пленке, где располагается и само тело сверхпроводящего квантового интерферометра (СКИ), хотя данное обстоятельство не позволяет отделить для экранировки сам СКВИД от объекта исследования и требуется наличие боль-

ших магнитоэкранированных объемов. Это пока служит основным сдерживающим фактором замены низкотемпературных СКВИД-систем, применяемых в основном в медицине, на высокотемпературные.

2. Необходимость изготовления СКИ малых размеров. Это связано как со снижением теплового шума тела интерферометра, так и с увеличением размаха выходной характеристики $V_{\phi} \sim I_c/L$ (L – индуктивность контура СКИ).

3. Технологичность, т. е. возможность контроля и управления параметрами интерферометров.

Решение вышеперечисленных проблем, обозначенных в работе [1], привело к тому, что в настоящее время исследуются и изготавливаются в основном СКВИДы постоянного тока (ПТ) в тонкопленочном исполнении с использованием стандартной технологии микроэлектроники. Работы же по изготовлению и исследованию высокочастотных (ВЧ) СКВИДов почти отсутствуют за исключением работ немецкой группы, которая наладила выпуск ВЧ СКВИДов в толстопленочном исполнении для коммерческого использования [5–7], а также фирмы “F.I.T.”, которая занимается изготовлением конечных СКВИД-устройств на основе толстопленочного ВЧ СКВИДа. Это связано с желанием получить СКИ с наиболее лучшими шумовыми характеристиками, так как основной областью применения низкотемпературных СКВИД-систем является медицина. Из-за того, что в этой области необходима очень высокая чувствительность СКИ по магнитной индукции $\sim 10^{-13} - 10^{-14}$ Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [10], было выбрано направление изготовления СКВИДов постоянного тока как СКВИДов с наилучшими характеристиками, а гибкость и массовость изделий тонкопленочной технологии определили развитие данной технологии в этой области криоэлектроники.

В последнее время наблюдается тенденция применения СКВИДов в областях, где традиционные низкотемпературные СКВИДы не применялись из-за громоздкости и высокой стоимости систем охлаждения, например в геофизике при измерении содержания магнитных включений в геологических породах или в системах неразрушающего контроля. В таких областях шумовые характеристики обычных ВЧ СКВИДов вполне достаточны, и именно поэтому германская фирма “F.I.T.” ориентирована на коммерческий выпуск систем с данным типом СКВИДов. И хотя чувствительность ВЧ СКВИДов, выпускаемых этой фирмой, по магнитной индукции порядка $2-4 \cdot 10^{-12}$ Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что на несколько порядков ниже достигнутой чувствительности низкотемпературных СКВИДов постоянного тока ($B_N \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$) [9, 11], этого оказывается достаточно для использования их в СКВИД-системах в геофизике и СКВИД-микроскопии. Объемные же ПТ и ВЧ СКВИДы и системы на их основе вообще отсутствуют как на рынке, так и в разработках, хотя технология их изготовления наиболее простая.

Цель данной работы заключается в исследовании практических возможностей использования объемных ВТСП квантовых интерферометров в различных измерительных комплексах. Для этого они помещались в один из измерительных каналов (ИК) автоматизированного многоканального комплекса [12] и производилась оценка основных технических характеристик ИК. Использовались ВТСП-интерферометры различных конструкций: одноконтурные, двухконтурные, типа Харви.

Исследовались следующие характеристики:

– порог чувствительности,

- коэффициент преобразования входного магнитного потока в выходное напряжение ИК,
- частотная зависимость спектральной плотности входного шума,
- амплитудно-частотная характеристика преобразования магнитного потока в выходное напряжение ИК,
- верхняя граничная частота полосы пропускания ИК.

Порог чувствительности и коэффициент преобразования магнитного потока в выходное напряжение. Вопрос о значении порога чувствительности средств измерения с использованием ВТСП-интерферометров, охлаждаемых жидким азотом, является одним из основных при их исследовании. Вследствие «треугольной» многозначной зависимости выходного напряжения СКВИДа от входного сигнала, достижение низкого уровня порога чувствительности ($\Phi_{\text{пор}}$) важно не только с точки зрения данной характеристики СКВИДа, но и для обеспечения бесшумной работы всего средства измерения в широком частотном диапазоне.

С учетом этого был проведен ряд экспериментов по изучению возможностей достижения низких значений $\Phi_{\text{пор}}$ ИК, оцениваемых по уровню входного шума $\Phi_{\text{ш}}$.

Известно [13, 14], что для обеспечения оптимального режима работы ВЧ СКВИДа необходимо так подобрать коэффициент связи K между его СКИ и катушкой резонансного контура, чтобы выполнялось условие

$$KQ^2 \sim 1, \quad (1)$$

где Q – добротность резонансного контура.

При работе с ВТСП-интерферометрами различных конструкций подбор оптимального значения K , соответствующего данному условию, осуществляется нахождением таких положений катушки резонансного контура СКВИДа вдоль осей отверстий интерферометров, при которых значения $\Phi_{\text{ш}}$ становятся минимальными.

На рис. 1, *a* в качестве примера приведены две кривые зависимости $\Phi_{\text{ш}}$ ИК от положения катушек резонансного контура с одной и той же индуктивностью 0,60 мкГн, изготовленных из медного изолированного провода диаметрами 0,05 и 0,1 мм.

Как видно из рисунка, при разных добротностях катушки имеются оптимальные положения ее внутри отверстия СКИ, при которых значения $\Phi_{\text{ш}}$ ИК имеют одно и то же минимальное значение, равное $\sim 3 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$ (Φ_0 – квант магнитного потока, равный $2,07 \cdot 10^{-15}$ Вб). Однако следует заметить, что в случае использования катушки 1 длиной ~ 4 мм (с внешним диаметром 0,75 мм и 70 витками провода диаметром 0,05 мм) исследуемая зависимость $\Phi_{\text{ш}}$ имеет более резкий, «острый», характер, чем в случае применения катушки 2 длиной ~ 10 мм (с внешним диаметром 0,9 мм и 95 витками провода диаметром 0,10 мм). Так, при смещении их относительно оптимального положения на ± 2 мм значение $\Phi_{\text{ш}}$ при использовании катушки 1 возрастало приблизительно в 2,7 раза, а в случае применения катушки 2 – приблизительно в 1,7 раза.

На рис. 1, *b* для тех же положений катушек (см. рис. 1, *a*, точки *A–G* и *H–L* на соответствующих кривых 1 и 2) приведены зависимости $\Phi_{\text{ш}}$ ИК от его коэффициента преобразования магнитного потока в выходное напряже-

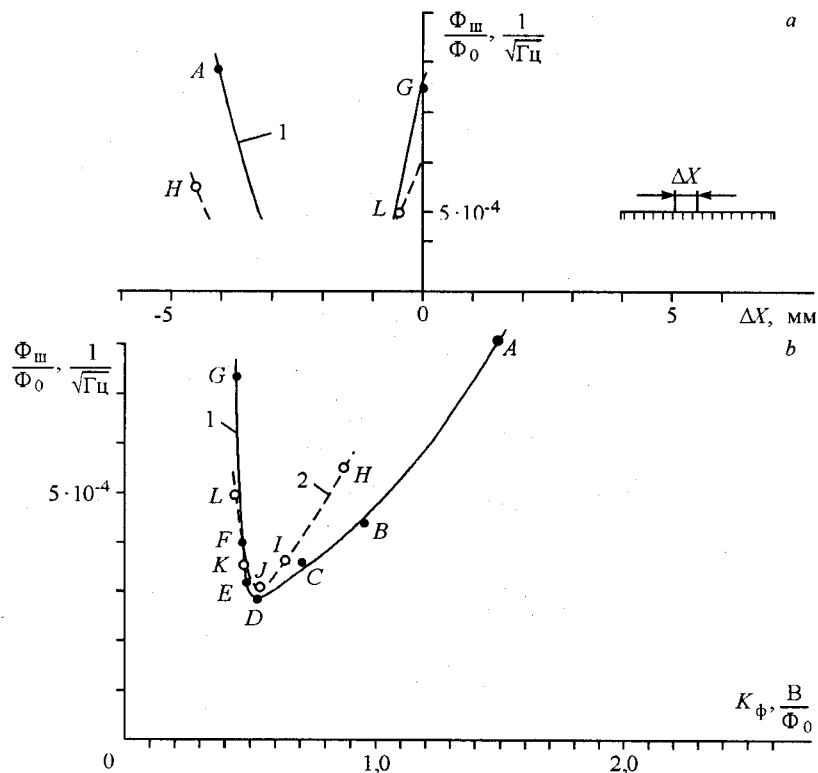


Рис. 1. Зависимости $\Phi_{ш}$ ИК магнитометра от положения катушек резонансного контура внутри СКВИ с диаметром отверстия 1,0 мм (а) и от коэффициента преобразования магнитного потока в выходное напряжение (б)

ние K_{Φ} , оценка значения которого для ИК может быть сделана достаточно точно.

Результаты экспериментов указывают на существенную зависимость $\Phi_{ш}$ ИК от положения катушки в ВТСП-интерферометре. Поэтому при оценках значений $\Phi_{ш}$ для любых вариантов и экземпляров ВТСП-интерферометров следует обращать на это особое внимание: сравнивать значения оценок $\Phi_{ш}$ следует, по-видимому, только убедившись, что они являются минимальными для различных положений катушки внутри отверстий интерферометров.

С целью определения возможностей дальнейшего снижения $\Phi_{ш}$ ИК с ВТСП-интерферометрами были проведены эксперименты по оценке влияния на $\Phi_{ш}$ следующих параметров:

- диаметра отверстий и длины двухдырочных ВТСП-интерферометров конструкции Циммермана;
- длины p -й части зонда СКВИДа, которая соединяет его ВЧ-блок и капсулу с ВТСП-интерферометром и экраном вокруг нее;

– частоты высокочастотного смещения СКВИДа $f_{вч}$.

В результате этих экспериментов было обнаружено:

1. Уменьшение диаметра отверстий и увеличение длины СКИ снижают $\Phi_{ш}$ ИК. Наименьшее значение оценки $\Phi_{ш}$ (при диаметре отверстий 1,0 мм и длине СКИ 10 мм) $1,3 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$, а наибольшее (при диаметре отверстий 2,0 мм и длине СКИ 3 мм) составило $11,0 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$.

2. Уменьшение длины соединительной части зонда снижает $\Phi_{ш}$ ИК, но незначительно: при уменьшении r в 10 раз (от 1,05 до 0,1 м) спад $\Phi_{ш}$ происходит приблизительно на 10 %.

3. Увеличение частоты высокочастотного смещения ВТСП-интерферометра с 15,0 до 25,0 МГц приводит к незначительному (~6 %) снижению $\Phi_{ш}$ ИК.

С учетом этих выводов последующие ВТСП-интерферометры изготавливались длиной 10 мм и диаметром отверстий 1,0 мм. Длина соединительной части зонда была выбрана равной 0,4 м (исходя из размеров криостата), а частота высокочастотного смещения интерферометров 15,0 МГц, при этом не требуется переделка ВЧ-блоков СКВИДов, да и стабильность их работы становится более высокой.

Эксперименты по оценке величин K_{ϕ} и $\Phi_{ш}$ для двухдырочных ВТСП-интерферометров конструкции Циммермана и однодырочных СКИ показали, что однодырочные ВТСП-интерферометры имеют больший уровень собственного шума, чем описанные выше двухдырочные СКИ конструкции Циммермана. Это обстоятельство можно объяснить тем, что в двухконтурных СКИ внешний шумовой поток почти самокомпенсируется и остается лишь внутренний шум, а в одноконтурном интерферометре самокомпенсация отсутствует.

Амплитудно-частотные характеристики преобразования входного сигнала ИК в его выходное напряжение. Типичные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) преобразования входного сигнала ИК в его выходное напряжение в режимах с первым и со вторым порядками астатизма представлены на рис. 2 (кривые 1). Однако необходимо заметить, что для

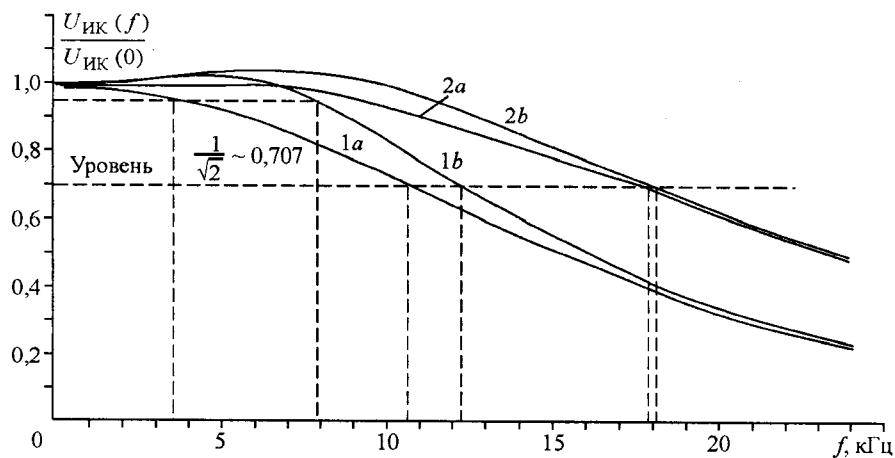


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики преобразования входного сигнала ИК в его выходное напряжение: второй порядок астатизма (кривые 1а, 2а), первый порядок астатизма (кривые 1б, 2б)

снижения паразитных выбросов выходного напряжения ИК, связанных с процессом модуляции–демодуляции, напряжение с его интегратора поступает на выход ИК через фильтр низких частот (ФНЧ). Поэтому с целью лучшего представления динамических характеристик самой «петли» преобразований в ИК на рисунке приведены также соответствующие кривые АЧХ (кривые 2) и для напряжений с выхода его интегратора.

Из кривых на рис. 2 следует, что при первом порядке астатизма верхняя граничная частота полосы пропускания f_v несколько увеличивается (до ~ 18 и $\sim 12,2$ кГц), а в АЧХ появляются незначительные подъемы, достигающие $\sim 3,5\%$ на частоте около 4 кГц. Однако, и это – главное, что характеризует работу ИК со вторым порядком астатизма, на низких частотах (до $f_1 \sim 1,8$ кГц) в ИК снижаются установившиеся значения ошибок компенсации $\Delta\Phi_x$ приращений входного магнитного потока Φ_x цепью обратной связи. Вследствие этого, например, для гармонического входного сигнала увеличиваются максимально допустимые (без сбоев ИК) амплитуда $\Phi_{x_{\max}}$ и скорость изменения Φ_x . Исходя из максимально допустимого значения $\Delta\Phi_x$, равного $\pm\Phi_0/4$, при $f \ll f_1$, $f \ll f_v$ и отсутствии ограничения напряжения на выходе ИК возрастание $\Phi_{x_{\max}}$ должно быть равно $\sim f_1/f$ раз [15].

Такая возможность увеличения быстродействия ИК часто использовалась при исследовании его работы с ВТСП-интерферометрами, особенно с однодырочными и двухдырочными конструкции Харви, когда в лабораторных условиях амплитуда Φ_x магнитной помехи промышленной частоты достигала (со снятым ВТСП-экраном) $(50-100)\Phi_0$. В этих случаях ИК с первым порядком астатизма не обладает требуемым быстродействием и практически неработоспособен из-за частых сбоев. При введении же второго порядка астатизма для $f = 50$ Гц значение $\Phi_{x_{\max}}$ ограничивалось лишь значениями напряжения на выходе ИК, что в его наиболее широком диапазоне работы составляло $\pm 140\Phi_0$. Этого вполне достаточно для обеспечения бесбойной работы ИК.

Из других преимуществ режима работы со вторым порядком астатизма следует отметить расширение рабочей полосы частотного диапазона преобразования ИК. При заданной неравномерности АЧХ, составляющей, например, 5% , на выходе ИК рабочая полоса увеличивается с $3,5$ до $7,8$ кГц, т. е. более чем в 2 раза (см. рис. 2, кривые 1). Кроме того, вследствие снижения значений $\Delta\Phi_x$ должен уменьшаться и коэффициент гармонических искажений ИК [16].

Измерительные устройства на основе ВТСП-магнитометра. Из-за высокой чувствительности ВТСП ВЧ СКВИДов к магнитному полю требуется их экранировка в условиях эксплуатации. С учетом этого была разработана установка по измерению магнитной восприимчивости, в состав которой входил несверхпроводящий трансформатор магнитного потока градиентометрического типа для связи объекта исследования с имеющимся СКИ. Функциональная схема установки для измерения магнитной восприимчивости приведена на рис. 3 [17]. Из рисунка видно, что эта установка включает рассмотренный ранее ВТСП СКВИД-магнитометр, а также трансформатор магнитного потока в виде градиентометра первого порядка.

Такая конструкция называется градиентометром и довольно часто и успешно используется для проведения измерений сверхслабых магнитных полей в неэкранированных условиях [18]. Но особенностью данной установ-

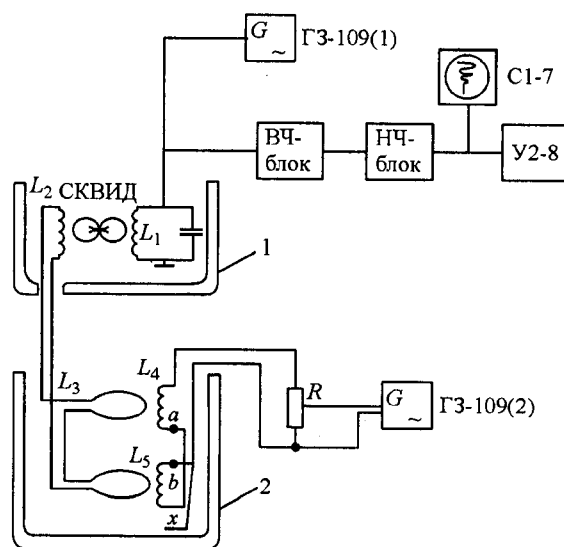


Рис. 3. Функциональная схема установки для измерения магнитной восприимчивости [17]: 1, 2 – ВТСП магнитные экраны; ГЗ-109(1), ГЗ-109(2) – НЧ-генераторы; С1-7 – осциллограф; У2-8 – селективный усилитель; а, б – разъемы

ки является использование несверхпроводящего (медного) трансформатора потока.

Установка состоит из двух функциональных частей. Верхняя часть представляет собой обычный СКВИД-магнитометр, в схему которого дополнительно введен НЧ-генератор ГЗ-109(1). Это позволило провести измерение шумовых характеристик магнитометра. Контрольный сигнал с НЧ-генератора и величина выходного напряжения магнитометра контролировались по показаниям селективного усилителя У2-8. Визуальный контроль выходного сигнала осуществлялся с помощью осциллографа С1-7. Для защиты от влияния внешних магнитных полей СКВИД был помещен в ВТСП магнитный экран 1.

Для определения предельных характеристик установки было выполнено измерение величины спектральной плотности эквивалентного шумового потока $S_{\Phi, f}^{1/2}$ СКВИД-магнитометра с трансформатором потока при отключенном генераторе ГЗ-109(2) (см. рис. 3). Полоса пропускания Δf селективного усилителя У2-8 была измерена в диапазоне от 20 Гц до 6 кГц по уровню понижения выходного сигнала в 0,707 раз при увеличении и уменьшении частоты НЧ-генератора ГЗ-109(1). Расчет спектральной плотности эквивалентного шумового потока был выполнен с учетом того, что $\Delta f_{ШЭ} = 1,57 \cdot 25 \times \Delta f$ для данной установки:

$$\Phi_{\text{пор}} = S_{\Phi, f}^{1/2} = \frac{U_{\text{вых, ш}}}{V_{\Phi}^S \sqrt{\Delta f_{\text{ШЭ}}}}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{пор}}$ – входной шум ИК по магнитному потоку при отношении сигнал/шум, равном 1; $U_{\text{вых, ш}}$ – выходное напряжение шума ИК на частоте f ; $\Delta f_{\text{ШЭ}}$ – эквивалентная шумовая полоса пропускания установки на частоте измерения f .

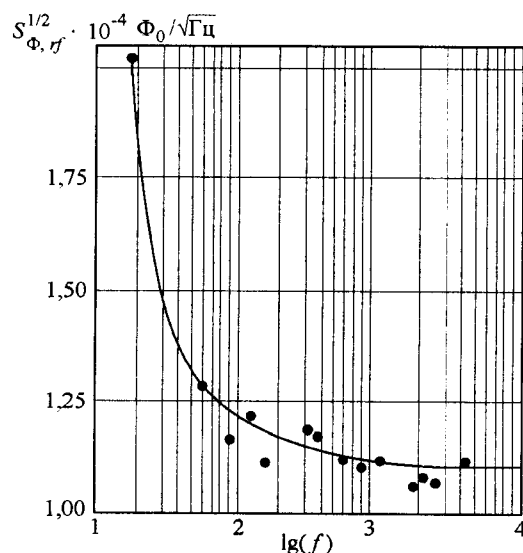


Рис. 4. Зависимость спектральной плотности эквивалентного шумового потока ВТСП-градиентометра от частоты внешнего магнитного поля

График зависимости $S_{\Phi, f}^{1/2}$ от $\lg(f)$ представлен на рис. 4. Согласно этой зависимости можно сделать вывод, что трансформатор магнитного потока не внес существенных шумов в характеристики СКВИД-магнитометра и что измерения величины магнитного поля целесообразно проводить на высоких частотах, так как уровень шума в этом диапазоне в 1,5–2 раза ниже. Величина шумового потока установки оказалась равной $1,1 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma_{ц}}$ на частоте 1 кГц. Данная частота была выбрана как рабочая частота установки, т. е. проводилось измерение магнитной восприимчивости в переменном поле.

После определения уровня шума по магнитному потоку СКВИД-магнитометра были проведены измерения характеристик характеристик магнитометрической системы с трансформатором магнитного потока. Была получена погрешность в диапазоне измерения магнитной восприимчивости от $1,4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\sqrt{\Gamma_{ц}}}$ до $0,3 \frac{1}{\sqrt{\Gamma_{ц}}}$ и намагниченности от $4,2 \cdot 10^{-5} \frac{A}{м\sqrt{\Gamma_{ц}}}$ до $9 \frac{A}{м\sqrt{\Gamma_{ц}}}$ для образца объемом $0,15 \text{ см}^3$ при частоте поля 1 кГц и величине магнитной индукции $0,4 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$, не превышающая 15 %.

Рассмотрим еще одно из направлений практического применения СКВИД-магнитометров. Таким направлением является применение их для точных радиотехнических измерений ВЧ- и постоянного токов, напряжения и ослабления электромагнитных колебаний, что актуально в метрологии [14, 19, 20]. Был изготовлен измеритель ослабления электромагнитных колебаний, который представляет собой широкополосный эталон для калибровки аттенуаторов [21]. В этой установке использовался СКИ типа Циммермана с диаметром отверстий 1 мм и ВТСП магнитный экран. Схема измерения передаточной характеристики установки представлена на рис. 5.

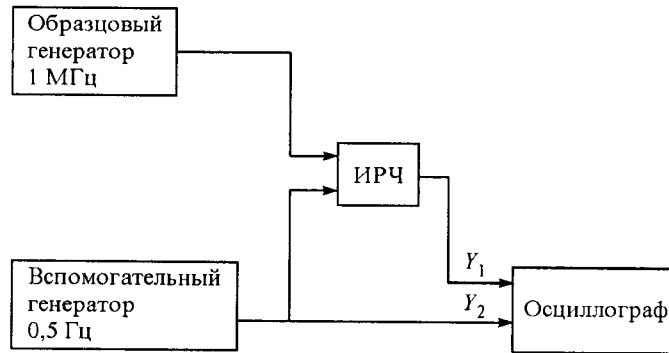


Рис. 5. Схема измерения передаточной характеристики измерителя ослабления электромагнитных колебаний

Блок ИРЧ (измеритель радиочастотный) представляет собой погружной зонд, ВЧ- и НЧ-блоки СКВИД-магнитометра. Спектральная плотность эквивалентного шумового потока данного магнитометра оказалась равной $3,25 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$. Помимо генератора сигнала с рабочей частотой 1 МГц, в схему измерения был дополнительно включен вспомогательный генератор Г6-27 с частотой сигнала 0,5 Гц и уровнем сигнала, равным магнитному потоку $\Phi \leq \Phi_0/2$, что позволило произвести установку рабочей точки СКВИД-магнитометра в максимум его вольт-веберной характеристики (ВВХ).

Методика измерения коэффициента ослабления с помощью СКВИДа основана на периодичности его ВВХ [9]:

$$U(\Phi) = U_1 \cos(\varphi),$$

где $\varphi = 2\pi\Phi(t)/\Phi_0$. Если теперь из внешнего сигнала $\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega_m t)$ с помощью фильтра нижних частот удалить все гармоники, то можно получить для низкочастотной части $U(t)$ следующее выражение:

$$\bar{U}(\Phi) = U_1 J_0 \left[\frac{2\pi\Phi_m}{\Phi_0} \right] = U_1 J_0 \left[\frac{2\pi I_m}{I_0} \right],$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; I_m – амплитуда тока в сигнальной катушке СКВИДа; I_0 – сила тока, изменяющая магнитный поток в СКИ на один квант.

Используя таблицы функции Бесселя, можно связать амплитуды Φ_m (или I_m) со значениями Φ_0 (или I_0). При этом в качестве опорных точек используют нули этой функции. Поскольку значения нулей хорошо известны, то можно достаточно точно определить отношения токов I_m в этих точках, что позволяет вычислить коэффициент деления.

Для калибровки аттенуатор помещают между генератором сигнала и блоком ИРЧ. Уровень ослабления начинают снижать от максимального значения до тех пор, пока сигнал на выходе магнитометра не перейдет первый нуль. Далее, уменьшая ослабление, продолжают фиксировать показания аттенуатора при прохождении им всех последующих нулей, а затем по таблицам функций Бесселя определяют отношение аргументов в нулях функции и,

следовательно, разность соответствующих уровней ослабления. Погрешность измерений равна разности между измеренным и табличным значениями.

По схеме рис. 5 были проведены измерения диапазона входного сигнала данной установки. В качестве образцового использовался генератор сигнала Г4-164, и было зафиксировано путем подсчета $n = 133$ нуля передаточной характеристики, при этом $U_{\text{вх}}(n = 133) = 9,92$ мВ. С применением генератора ГЗ-122 величину n удалось увеличить до 173 ($U_{\text{вх}} = 24,74$ мВ). Однако и с данным типом генератора не удалось достичь верхней границы диапазона, так как наблюдалось значительное превышение выходного сигнала магнитометра над уровнем шумов. В работах [8, 10] установлено, что данный измеритель позволяет проводить измерения ослабления делителей напряжения и вольтметров переменного тока до частоты 1 МГц в диапазоне измеряемого сигнала от нескольких микровольт до нескольких вольт с погрешностью менее 10^{-3} дБ, что соответствует $n = 620$ нулям функции Бесселя.

Заключение. Проведенные исследования шумовых характеристик объемных СКИ различных конструкций (одноконтурного, типа Циммермана и Харви) в СКВИД-магнитометрах показали, что данные СКИ обладают достаточной чувствительностью к магнитному потоку. При этом оказалось, что наибольшей чувствительностью к магнитному потоку обладают магнитометры, имеющие СКИ типа Циммермана ($\sim 10^{-4} \cdot \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$), а наименьшей – типа Харви ($\sim 4 \cdot 10^{-4} \cdot \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$). Это связано с уровнями шумов в данных интерферометрах. Применение таких ВТСП-элементов в составе конечных электронных устройств (в измерителях магнитной восприимчивости и ослабления электромагнитных колебаний) показало, что их шумовые характеристики близки к шумовым характеристикам аналогичных устройств, изготовленных с использованием пленочных ВТСП ВЧ СКВИДов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tesche C. D., Clarke J. DC SQUID: Noise and optimization // Journ. Low Temp. Phys. 1977. 29. P. 301.
2. Likhachev A. G., Polushkin V. M., Uchaikin S. V., Vasiliev B. V. Magnetocardiometer based on a single-hole high- T_c SQUID // Supercond. Sci. Technol. 1990. 3. P. 148.
3. Greenberg Ya. S. Application of superconducting quantum interference devices to nuclear magnetic resonance // Rev. Mod. Phys. 1998. 70. P. 175.
4. Drung D. Recent LTS SQUID developments // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1994. N 4. P. 121.
5. Zhang Y., Yi H. R., Schubert J. et al. A design of planar multi-turn flux transformers for radio frequency SQUID magnetometers // Appl. Phys. Lett. 1998. 72. P. 2029.
6. Zhang Y., Zander W., Schubert J. et al. Operation of high-sensitivity radio frequency superconducting quantum interference device magnetometers with superconducting coplanar resonators at 77 K // Appl. Phys. Lett. 1997. 71. P. 704.
7. Zhang Y., Wolters N., Zander W. et al. Washer rf SQUID magnetometers with coplanar resonators at 77 K // Proc. ISEC'97. 1997. P. 51.
8. Itozaki H., Tanaka S., Nagaishi T., Kado H. High- T_c SQUID // Advances in Superconductivity VI /Eds. T. Fujita, K. Shiohara. Tokyo: Springer-Verlag, 1994. Vol. 1. P. 1097.
9. Chen J., Ogawa T., Yamashita T. Flicker (1/f) noise of YBCO grain boundary DC SQUIDs // Ibid. P. 1103.

10. **Кравченко А. Ф.** Магнитная электроника. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002.
11. **Drung D.** Advanced SQUID read-out electronics // SQUID sensors: Fundamentals, fabrication and Applications /Ed. H. Weinstock. N. Y.: Kluwer Academic Publishers, 1996.
12. **Береснев В. К., Гольшев Н. В., Моторин С. В. и др.** Автоматизированный комплекс для измерения слабых магнитных полей // ПТЭ. 1989. № 5. С. 240.
13. **Лихарев К. К., Ульрих Б. Т.** Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории. М.: МГУ, 1978.
14. **Бароне А., Патерно Дж.** Эффект Джозефсона. Физика и применение. М.: Мир, 1984.
15. **Петров А. Ю.** Повышение порядка астатизма в сверхпроводниковом магнитометре на основе СКВИДа // Сб. тез. VII Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры». Л., 1989. Ч. 1. С. 131.
16. **Петров А. Ю.** Нелинейные искажения в сверхпроводниковом веберметре на основе ВЧ-СКВИДа // Там же. С. 125.
17. **Фирсов Н. И., Новиков И. Л.** Высокотемпературный сверхпроводящий измеритель магнитной восприимчивости // Сб. науч. тр. НГТУ. 1995. № 2. С. 132.
18. **Кларк Дж.** Сверхпроводящие квантовые интерференционные приборы // ТИИЭР. 1989. 77. С. 118.
19. **Гуменюк В. С., Карпов О. В., Кутовой В. Д. и др.** Предварительные исследования возможности использования ВТСП СКВИДа для прецизионных измерений величины ВЧ-тока, напряжения и ослабления электромагнитных колебаний // Тез. докл. 1-й Конф. по проблемам физической метрологии. С.-Пб., 1994. Секция В. С. 35.
20. **Serra H.** Some new aspects concerning the X-band SQUID for the measurement of RF attenuation // IEEE Trans. Instrum. and Meas. 1983. **IM-32**. P. 253.
21. **Карпов О. В., Кутовой В. Д., Маркин А. С. и др.** Установка для калибровки делителей напряжения и вольтметров переменного тока низкой частоты на основе ВТСП СКВИДа // Измерит. техн. 1995. № 9. С. 47.

*Новосибирский государственный
технический университет,
E-mail: gridthin@ref.nstu.ru*

*Поступила в редакцию
12 сентября 2003 г.*