

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 538.945;621.793.182;621.317.445

ГРАДИЕНТОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2016 г. Ю. В. Масленников^{1,2}, В. Ю. Слободчиков^{1,2}, В. А. Крымов^{1,2},
В. В. Ханин^{1,2}, В. П. Кошелец^{1,*}

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

²ООО «НПО КРИОТОН» Российская Федерация, 101000, Москва, Троицк, ул. Лесная, д. 4Б

*E-mail: valery@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 30.03.2016 г.

Разработан, создан и исследован макет градиентометра на основе сверхпроводникового квантового интерференционного датчика (СКВИД) постоянного тока для регистрации и анализа магнитных сигналов, генерируемых различными дефектами в металлических конструкциях и материалах под воздействием дополнительных полей подмагничивания. Исследованы характеристики макета одноканального СКВИД-градиентометра, содержащего стеклопластиковый немагнитный криостат, измерительный зонд со СКВИД-датчиком и трансформатором магнитного потока в форме аксиального градиентометра второго порядка, комплект СКВИД-электроники и программу управления работой макета СКВИД-градиентометра. Продемонстрирована его устойчивая работоспособность в лабораторных условиях без дополнительной магнитной экранировки. Определены направления совершенствования СКВИД-датчиков и других элементов макета магнитометра для использования в системах неразрушающего контроля.

DOI: 10.7868/S0033849416120172

ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающий контроль (НК) относится к методам, которые используются для обнаружения, локализации и оценки дефектов или изъянов в различных материалах и готовых изделиях. Дефекты могут возникать в процессе их изготовления или быть результатом стресса, коррозии, которым материал или изделие подвергается во время его фактического использования. Очевидно, что методы обнаружения критических дефектов имеют жизненно важное значение в промышленности для контроля состояния изделий, находящихся в эксплуатации, контроля качества при их производстве и анализа возможных причин отказов. Один из широко используемых методов неразрушающего контроля основан на анализе вихревых токов в исследуемых электропроводящих образцах. Однако метод вихревых токов имеет недостаток: что он может обнаружить дефекты только до определенной глубины под поверхностью исследуемых образцов, и не подходит для определения подповерхностных дефектов, расположенных более глубоко. Это ограничение можно преодолеть, используя в системах НК высокочувствительные магнитометры на основе СКВИД.

Высокий потенциал техники неразрушающего контроля материалов и конструкций при использовании магнитометрических СКВИД-систем был продемонстрирован в течение последних трех десятилетий [1]. СКВИД-системы для НК имеют ряд значительных преимуществ перед аналогичными: высокую чувствительность (от 10 до 100 фТл/Гц^{1/2}), широкую полосу пропускания (от нуля до десятков килоГерц), широкий динамический диапазон (более 120 дБ). Недостаток подобных систем заключается в следующем: СКВИД-датчики работают только при криогенных температурах, поэтому их применение относительно дорого для рутинного использования. Тем не менее, несмотря на высокую стоимость криогенного обеспечения и связанные с этим технические неудобства, СКВИД-системы используются в тех областях, где другими методами НК не удастся достичь требуемой производительности [2]. СКВИД-системы для НК разработаны и используются при обнаружении дефектов в стальных пластинах [3], исследовании напряженно-деформированного состояния в поведении ферромагнитных материалов [4], обнаружении разрывов в стальных тросах мостовых конструкций [5], опре-

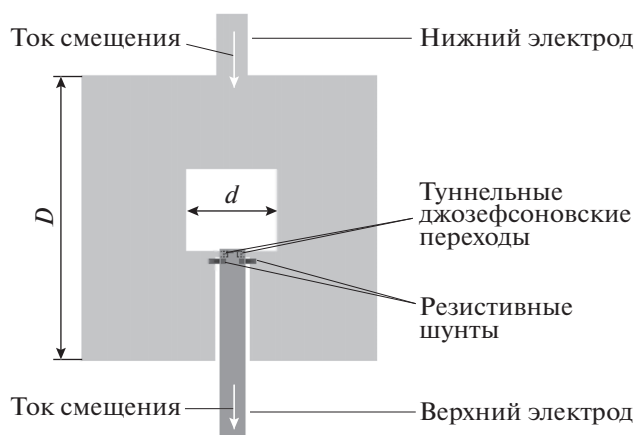


Рис. 1. Топологическая схема СКВИДа постоянного тока, использованного в измерительном зонде макета одноканальной системы НК.

делении трещин в лопатках турбин самолетных двигателей [6].

Чувствительность СКВИД-магнитометров очень высока (до $5 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$) и остается постоянной вплоть до частот порядка 1 Гц , поэтому СКВИД-датчики можно применять для обнаружения глубоких подповерхностных дефектов в проводящих материалах за счет снижения частоты вихревых токов возбуждения и увеличения таким образом толщины скин-слоя. СКВИД-системы для НК на основе метода вихревых токов могут быть использованы, например, для выявления глубоких подповерхностных дефектов внутри толстых многослойных алюминиевых конструкций при строительстве самолетов.

Цель данной работы – создание макетного образца одноканальной СКВИД-системы для потенциального применения в системах НК и исследование его характеристик.

1. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ

А. СКВИД-датчик для макета одноканального СКВИД-градиентометра и его основные характеристики

СКВИД-датчик является ключевым элементом магнитометрической системы, определяющим в итоге требования ко всем ее остальным составляющим. Сначала был выполнен анализ литературных данных по определению типов СКВИД постоянного тока, наиболее подходящих для практического применения в системах НК дефектов в различных материалах. При этом были проанализированы как физические характеристики, так и технологические возможности мелкосерийного изготовления для создания многоканальных вариантов магнитометров.

Необходимо отметить, что в настоящее время коммерчески доступными для использования в подобных системах являются СКВИД-датчики исключительно зарубежного производства, в частности СКВИД-датчики фирмы SUPRACON AG (Германия) и Star Cryoelectronics (США). В рамках развития отечественных технологий сверхпроводниковой микроэлектроники и импортозамещения были использованы экспериментальные образцы СКВИД постоянного тока, изготовленных в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [7–9], которые в дальнейшем предполагается усовершенствовать и также применять в магнитометрических СКВИД-системах для НК.

На первом этапе в разработанном макете СКВИД-градиентометра использовали СКВИД-датчики так называемого гибридного типа. В таких СКВИД-датчиках интерферометр с джозефсоновскими переходами был изготовлен методами тонкопленочной технологии, входная катушка представляла собой плоскую спираль, содержащую 20–30 витков из изолированного ниобиевого провода, которую размещали поверх контура интерферометра СКВИД. Катушка обратной связи в подобных СКВИД-датчиках была также внешней и представляла собой один виток диаметром 2 мм из медного провода сечением 0.1 мм, размещенный под чипом со СКВИД. Основная проблема гибридных СКВИД-датчиков – обеспечение приемлемого коэффициента связи входной катушки и интерферометра СКВИД для уменьшения потери полезного сигнала.

Для решения данной проблемы была использована одна из модификаций конструкции интерферометра СКВИД (рис. 1), предложенной в работе [10]. Интерферометр СКВИД имел квадратный сверхпроводниковый концентратор магнитного потока с внешним размером $D = 2.4 \text{ мм}$ и центральным квадратным отверстием размером $d = 0.07 \text{ мм}$. Два шунтированных джозефсоновских перехода размещались на внутреннем контуре концентратора, а верхний электрод тонкопленочной структуры проходил в прорези контура интерферометра.

Чипы с такими СКВИД изготавливали в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН методами тонкопленочной технологии сверхпроводниковой микроэлектроники. В СКВИД использовали туннельные джозефсоновские переходы $\text{Nb}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$ размером $3 \times 3 \text{ мкм}$ с величиной критического тока 15–25 мкА. Для их шунтирования применялись тонкопленочные резисторы из молибдена (Mo) или титана (Ti) сопротивлением 2–4 Ом. Полученные СКВИД имели значения собственной индуктивности около 120 пГн и размах сигнальной характеристики порядка 20–30 мкВ. Уровень их собственного шума по магнитному потоку составлял порядка $3.0 \text{ мк}\Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$ (здесь $\Phi_0 \approx 2.06 \times 10^{-15} \text{ Вб}$ –

квант магнитного потока). Такие характеристики СКВИД обеспечивают возможность создания на их основе прототипов высокочувствительных СКВИД-магнитометров для применения в системах НК.

Каждую накладную входную катушку для СКВИД-датчика наматывали вручную используя специальное приспособление, основные элементы которого – тонкая ось диаметром 0.35 мм из жесткой инструментальной стали и вращающийся механизм, позволявший одновременно наматывать оба конца ниобиевого провода навстречу друг другу с определенным натяжением. Спираль из ниобиевого провода наматывали в зазоре между фторопластовыми пластинками, одетыми на ось приспособления и фиксируемыми за счет силы трения. Зазор между пластинками составлял примерно 0.1 мм и фактически определял толщину получаемой спиральной входной катушки. При намотке провода в зазор между пластинками добавляли каплю жидкого клея БФ-4. После намотки необходимого числа витков, время которой не превышало одной минуты, структуру просушивали, а затем вместе с фторопластовыми пластинками снимали с оси намоточного устройства. Далее пластинки разъединяли при помощи скальпеля или лезвия бритвы, и изымали готовую входную катушку.

Чип со СКВИД приклеивали на специальную стеклотекстолитовую подложку с предварительно вклеенным в нее витком катушки обратной связи. Входную катушку закрепляли поверх чипа со СКВИД при помощи трех-четырех оборотов эластичной синтетической нити вокруг всей подложки с небольшой степенью подвижности. Взаиморасположение центрального отверстия в СКВИД и отверстия в спирали входной катушки контролировали и юстировали под микроскопом, после чего нить окончательно затягивали и заклеивали на обратной стороне стеклотекстолитовой подложки.

Для создания сверхпроводящего соединения трансформатора магнитного потока (в форме аксиального градиентометра второго порядка) и входной катушки в эту подложку вклеивали терминалы, которые представляли собой две ламели из ниобиевой фольги толщиной 0.5 мм размером 2×5 мм каждая. Они имели по два сквозных резьбовых отверстия с резьбой М1 и предназначались для механической фиксации концов градиентометра и входной катушки. Прижим зачищенных концов градиентометра и входной катушки к вклеенным ламелям осуществляли при помощи четырех винтов М1 двумя аналогичными подвижными ламелями из ниобиевой фольги, диаметр отверстия которых составлял 1 мм без резьбы.

СКВИД-датчик в макете одноканальной системы для НК был выполнен в виде капсулы с

двойным сверхпроводящим экраном из трубок ниобия с наружным диаметром 10 и 6 мм, содержащей внутри СКВИД постоянного тока и входную катушку трансформатора потока (рис. 2).

СВКИД самостоятельно работал как высокочувствительный магнитометр, поскольку интерферометр СКВИД представлял собой обычный пленочный сверхпроводниковый виток. Экспериментально измеренный уровень его собственного разрешения по магнитному полю был лучше, чем $100 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$. Для его защиты от внешних магнитных помех была применена конструкция, состоявшая из двух цилиндрических сверхпроводниковых экранов. Первый экран меньшего диаметра закрывал область подложки, где размещался чип со СКВИД и входной катушкой. Второй экран закрывал область размещения ламелей, где фиксировались концы градиентометра и входной катушки. Торцы экранов датчика также были закрыты деталями из ниобия и имели лишь небольшие отверстия диаметром 0.5 мм, чтобы пропустить сквозь них конец витой пары градиентометра с одной стороны и провода с выхода СКВИД и катушки обратной связи с другой.

Для определения конфигурации спиралей, имеющих максимальный коэффициент связи с интерферометром СКВИД, была проведена серия экспериментов. Для этого было изготовлено несколько экземпляров спиральных входных катушек с числом витков 10, 20 и 30. Предварительно для каждой из катушек измеряли индуктивность при температуре жидкого гелия. Затем спиральные катушки монтировали на чипе со СКВИД, как это было описано выше. Далее вместо градиентометра к входным терминалам СВКИД-датчика через два сопротивления по 100 кОм подключали витую пару из медного провода, по которой на входную катушку СКВИД с низкочастотного генератора подавали тестовый сигнал на частоте 8–10 Гц. СКВИД-датчик с подключенной цепью тестового сигнала крепили на специальном зонде для исследования характеристик СКВИД, и охлаждали до рабочей температуры. К зонду подключали электронику магнитометра и в режиме разомкнутой обратной связи на осциллографе наблюдали сигнальную характеристику СКВИД. Изменяя выходное напряжение генератора, во входную катушку подавали тестовый сигнал, соответствующий одному кванту магнитного потока в СКВИД. Изменив напряжение на выходе генератора и разделив его на величину сопротивления цепи (200 кОм), определяли один из основных параметров СКВИД-датчика – коэффициент преобразования $K_{A-\Phi}$ входного тока в магнитный поток в СКВИД, т.е. величину тока во входной катушке, создающего один квант магнитного потока в СКВИД. Задача исследования – установить, для какой конфигурации спиральной входной катуш-

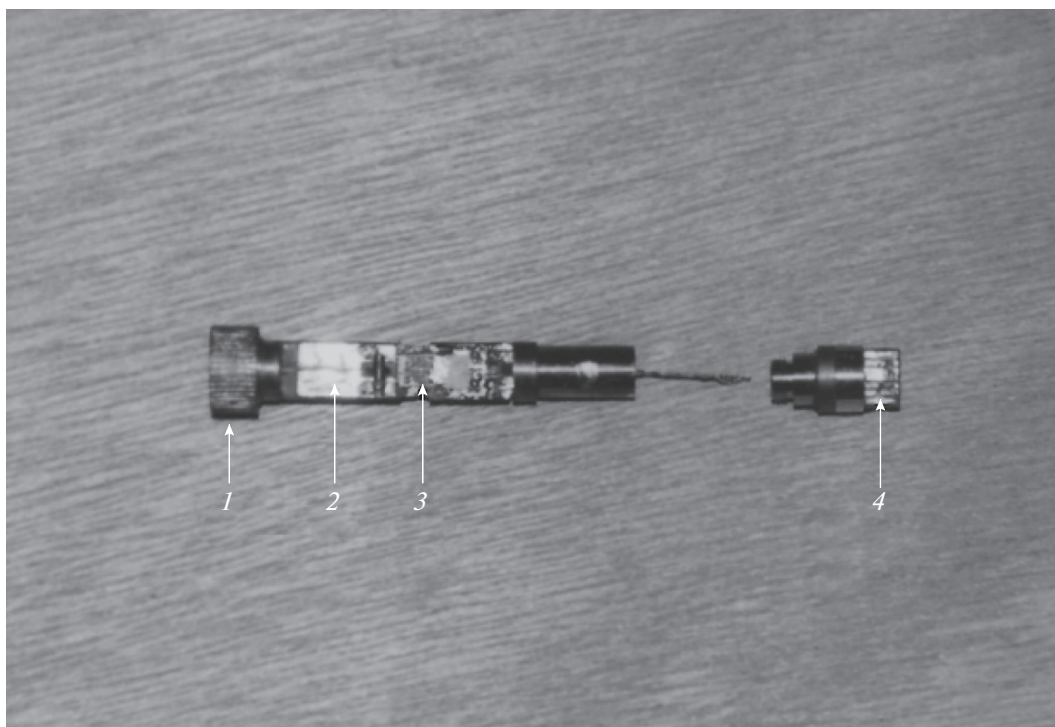


Рис. 2. Фотография внутренней части конструкции СКВИД-датчика для измерительного зонда одноканальной системы для НК (без внешних экранов): 1 – ниобиевый корпус СКВИД-датчика; 2 – ламели из ниобия для закрепления концов входной катушки и градиентометра из ниобиевого провода; 3 – тонкопленочный СКВИД с накладной входной катушкой; 4 – выходной разъем.

ки значение этого коэффициента минимально, т.е. взаимоиндуктивность $M = 1/K_{A-\Phi}$ входной катушки и интерферометра СКВИД максимальна.

В ходе исследований экспериментально было установлено, что наилучший результат по величине коэффициента $K_{A-\Phi}$ имели спиральные входные катушки с 20 витками, диаметром внутреннего отверстия $d = 0.35$ мм и диаметром внешнего контура $D = 2$ мм. При величине их индуктивности $L_{ск} \approx 0.8$ мкГн значения коэффициента $K_{A-\Phi}$ составляли около 0.8 мкА/ Φ_0 .

Взаимоиндуктивность между входной катушкой и СКВИД для данного типа разработанного гибридного датчика имела значение $M \sim 2.5$ нГн, что сравнимо, например, с аналогичным значением $M = 2.6$ нГн у полностью интегрального СКВИД-датчика модели CСblue фирмы SUPRACON AG (Германия), в котором спиральная входная катушка выполнена методами тонкопленочной технологии поверх интерферометра СКВИД.

Б. Измерительный зонд макета одноканального СКВИД-градиентометра

Измерительный зонд макета СКВИД-градиентометра (рис. 3) был сконструирован на основе

стеклопластиковых трубок и содержал следующие основные элементы:

- а) трансформатор магнитного потока в виде аксиального градиентометра второго порядка;
- б) СКВИД-датчик со СКВИД постоянного тока и входной катушкой;
- в) сверхпроводниковые балансировочные элементы для механической балансировки градиентометра в однородном магнитном поле;
- г) верхнюю капку с балансировочными винтами, электрическим разъемом и штуцером для заливки гелия.

Градиентометр второго порядка был изготовлен из изолированного ниобиевого провода диаметром 0.1 мм в конфигурации “2 : 4 : 2” (два нижних витка, четыре средних и два верхних) на графитовом основании диаметром 16 мм. Диаметр приемных витков градиентометра составлял 15.8 мм, размер базы – 55 мм, а исходный небаланс не превышал 0.1%. Концы градиентометра механически фиксировались на ниобиевых ламелях СКВИД-датчика для подключения к входной катушке СКВИД.

Для работы без магнитной экранировки градиентометр имел средства дополнительной механической балансировки в однородном магнитном поле посредством сверхпроводниковых балансировочных элементов, которые при помощи диэлектрических тяг и

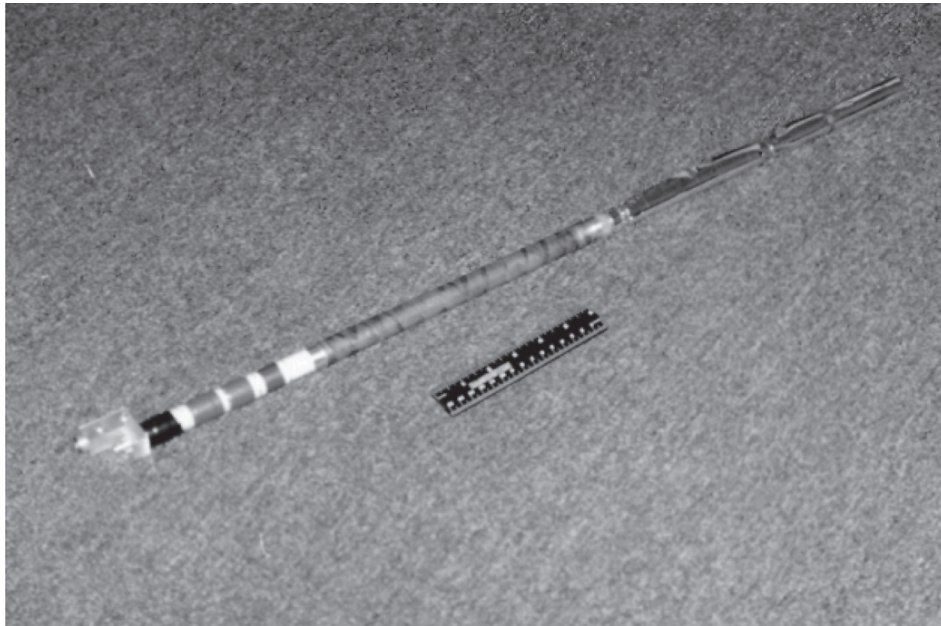


Рис. 3. Фотография измерительного зонда одноканального СКВИД-градиентометра с механической балансировкой “сигнального” градиентометра. Собственный шум СКВИД-магнитометра при этом оценивался величиной порядка 12–18 фТл/Гц^{1/2}.

винтов на капке могли перемещаться в области приемных петель градиентометра. Использование механической балансировки позволило уменьшить разбалансировку градиентометра до значений $<0.01\%$. Процедура балансировки градиентометра аналогична изложенной в [11], но с тем отличием, что минимизацию тестового сигнала однородного магнитного поля на выходе СКВИД-градиентометра, создаваемого катушками Гельмгольца, в направлениях X , Y и Z , выполняли при помощи механического перемещения соответствующего сверхпроводникового балансира.

При тестировании градиентометра в такой конфигурации были экспериментально получены значения коэффициента преобразования входного магнитного поля $B_{вх}$ в магнитный поток в СКВИД $\Phi_{ск}$ на уровне 4–6 нТл/ Φ_0 , что при уровне собственных шумов СКВИД ~ 3 мк Φ_0 /Гц^{1/2} дает значения собственной эквивалентной чувствительности градиентометра по входному магнитному полю порядка 12–18 фТл/Гц^{1/2}. Чувствительность такого уровня является достаточной для использования подобных СКВИД-градиентометров в системах НК.

В. Электроника и блок управления макета одноканального СКВИД-градиентометра

СКВИД-электроника макета магнитометрической системы была смонтирована в алюминие-

вом блоке размером $157 \times 82 \times 17$ мм (рис. 4), расположена в непосредственной близости от капки криостата и соединена при помощи специального кабеля длиной 70 см с измерительным зондом. Блок-схема СКВИД-электроники содержала аналоговую и цифровую части. В аналоговой части использована традиционная модуляционная схема нуль-детектора и цепь отрицательной обратной связи по магнитному потоку. Аналоговая часть обеспечивала настройку рабочих параметров СКВИД. Цифровая часть позволяла переключать режимы настройки и работы СКВИД-градиентометра, и осуществлять управление с персонального компьютера. СКВИД-электронику подключали к блоку управления при помощи 5-метрового кабеля.

Схемотехнически предусилитель блока электроники был выполнен на базе малошумящего полевого транзистора К-369 фирмы Toshiba, включенного по каскадной схеме. Собственный уровень шума предусилителя не превышал 0.7 нВ/Гц^{1/2}.

Однополюсный интегратор схемы формировал сигнал обратной связи, который поступал в катушку модуляции через резистор обратной связи. Напряжение на резисторе обратной связи использовалось в качестве выходного сигнала магнитометра. Электронная схема имела одно фиксированное значение коэффициента обратной связи, равное примерно 2 В/ Φ_0 . В режиме замкнутой цепи обратной связи при величине вход-



Рис. 4. Фотография СКВИД-электроники и блока управления макета одноканального СКВИД-градиентометра.

ного сигнала, эквивалентного $0.1 \Phi_0$ в СКВИД, полоса пропускания электроники находилась в диапазоне 0–16 кГц на уровне –3 дБ.

Блок управления магнитометрической системы содержал стабилизированные источники питания, дополнительный усилитель выходного сигнала и схемы микропроцессорного управления, которые использовались для настройки и переключения режимов работы СКВИД-системы.

Управление режимами работы макета СКВИД-системы осуществлялось при посредстве кодов, генерируемых цифровыми схемами блока управления, которые формировались при нажатии соответствующих кнопок в основном окне программы управления на экране монитора. Сигнал с выхода магнитометра подавали на вход осциллографа или спектроанализатора для дальнейшего анализа. На передней панели блок также имел разъем для подачи тестового сигнала с выхода генератора звуковой частоты при настройке рабочих параметров СКВИД.

Г. Стеклопластиковый криостат макета одноканального СКВИД-градиентометра

Фотография гелиевого криостата для макета одноканального СКВИД-градиентометра представлена на рис. 5.

Внутренний диаметр горловины и хвостовика криостата составлял 17 мм. Расстояние от внешней до внутренней поверхности в хвостовике в охлажденном состоянии не превышало 6 мм. В криостат заливали 1.2 л жидкого гелия, и время его работы составляло около двух дней. Параметры криостата следующие:

наружный диаметр криостата	110 мм
длина криостата	500 мм
внешний диаметр хвостовика криостата	45 мм
внешняя длина хвостовика	230 мм
внутренний диаметр горловины	17 мм
внутренний диаметр криогенной колбы	80 мм
диаметр внутреннего хвостовика	17 мм
внутренняя длина хвостовика	290 мм
расстояние “тепло–холод”	6 мм
объем жидкого гелия	1.2 л
время полного испарения жидкого гелия	48 ч
вес пустого криостата	1.2 кг

Поскольку криостат имел достаточно малый объем, процедура его заполнения жидким гелием очень проста и занимала несколько минут. Малый объем гелия и наличие предохранительного клапана обеспечивали безопасность криостата в случае нарушения вакуума в пространстве между внешней и внутренней оболочками.

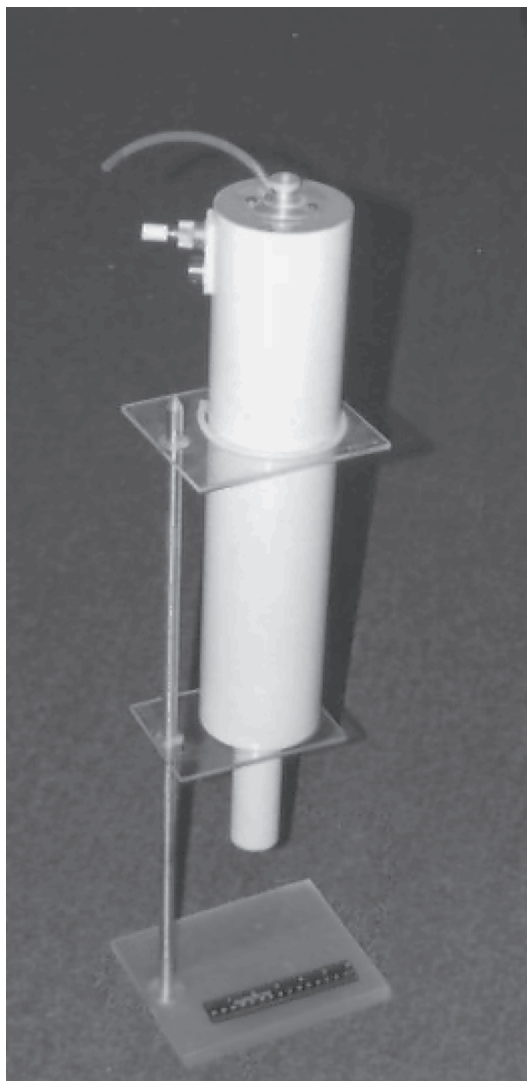


Рис. 5. Фотография стеклопластикового “гелиевого” криостата макета СКВИД-градиентометра.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе обсуждавшихся выше элементов был создан действующий макет СКВИД-градиентометра, после чего были проведены его практические испытания в лабораторных условиях и исследованы основные эксплуатационные характеристики. При помощи низкочастотного спектроанализатора фирмы Stanford Research исследовались шумовые спектры выходного сигнала макета СКВИД-градиентометра. Типичный шумовой спектр выходного напряжения СКВИД-градиентометра, измеренный в центре г. Москвы, представлен на рис. 6.

Шумовые спектры регистрировались в частотном диапазоне 1–50 Гц. Измеренная величина спектральной плотности шума порядка 11–12 мкВ/Гц^{1/2}

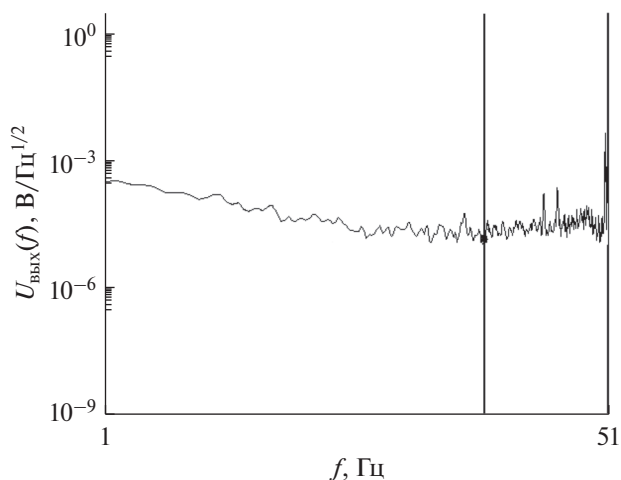


Рис. 6. Шумовой спектр выходного напряжения СКВИД-градиентометра $U_{\text{вых}}(f)$, измеренный в лабораторных условиях без дополнительной магнитной экранировки. Положение курсора на графике соответствует значениям частоты и спектральной плотности шума выходного напряжения $f = 19.4$ Гц, $U_{\text{вых}} = 11.44$ мкВ/Гц^{1/2} соответственно.

при значениях коэффициента обратной связи $K_{\text{ос}} = 2$ В/Φ₀ и коэффициента преобразования $K_{\text{А-Ф}}$ входного магнитного поля в магнитный поток в СКВИД порядка 5 нТл/Φ₀ соответствует уровню эквивалентного шума по магнитному полю порядка 30 фТл/Гц^{1/2}. Подобные уровни шума СКВИД-градиентометра свидетельствуют о достаточной степени балансировки использованного градиентометра и возможности применения подобных СКВИД-градиентометров в системах для НК. На их основе могут быть созданы и многоканальные СКВИД-системы, однако в этом случае более предпочтительно использовать электронную балансировку градиентометров по сравнению с механической балансировкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный макет одноканального градиентометра на базе СКВИД постоянного тока продемонстрировал устойчивую работоспособность в лабораторных условиях без дополнительной магнитной экранировки, и может быть использован в качестве основы при проектировании многоканальной магнитометрической СКВИД-системы для неразрушающего контроля наличия дефектов в металлических конструкциях и материалах.

Проведенные исследования выявили необходимость проектирования полностью интегрального СКВИД-датчика для подобных систем, поскольку применение тонкопленочной входной катушки трансформатора магнитного потока в СКВИД позволит увеличить коэффициент связи

входной катушки с индуктивностью СКВИД более чем в два раза. Соответственно, результирующая чувствительность СКВИД-градиентометра также может возрасти более чем в два раза. Топология интерферометра СКВИД должна иметь градиентометрическую конструкцию, чтобы снизить прямое влияние внешних магнитных полей, в том числе и полей подмагничивания, возбуждающих в исследуемых образцах вихревые токи. Это позволит существенно упростить конструкцию сверхпроводниковых экранов СКВИД-датчика.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00206).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Donaldson G.B., Cochran A., McKirdy D.A.* SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications / Ed. by H. Weinstock. Dordrecht: Kluwer, 1996.
2. *Krause H.-J., Kreuzbruck M.* // *Physica C*. 2002. V. 368. № 1. P. 70.
3. *Bain R.J.P., Donaldson G.B., Evanson S., Hayward G.* // *IEEE Trans.* 1987. V. MAG-23. № 2. P. 473.
4. *Weinstock H., Nisenoff M.* // *Proc. 3rd Int. Conf. on Superconducting Quantum Interference Devices and their Applications (SQUID'85)* / Eds. by Hahlbohm H.D., Lubbig H. Berlin: De Gruyter, 1985. P. 843.
5. *Sawade G., Straub J., Krause H.J. et al.* // *Proc. Int. Symp. on Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 1995)*. Berlin: DGZfP, 1995. V. II. P. 1077.
6. *Tavrin Y., Siegel M., Hinken J.-H.* // *IEEE Trans.* 1999. V. AS-9. № 2. P. 3809.
7. *Koshelets V.P., Matlashov A.N., Serpuchenko I.L. et al.* // *IEEE Trans.* 1989. V. MAG-25. № 2. P. 1182.
8. *Matlashov A.N., Koshelets V.P., Zhuravlev Yu.E. et al.* // *IEEE Trans.* 1991. V. MAG-27. № 2. P. 2963.
9. *Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N. et al.* // *IEEE Trans.* 2001. V. AS-11. № 1. P. 816.
10. *Jaycox J., Ketchen M.* // *IEEE Trans.* 1981. V. MAG-17. № 1. P. 400.
11. *Масленников Ю.В.* // *РЭ*. 2011. Т. 56. № 8. С. 986.