

На правах рукописи

Бурмистров Евгений Владимирович

**Градиентометр на базе ВТСП
СКВИДов для работы в
неэкранированном пространстве**

Специальность 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва - 2010

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
профессор **Снигирев Олег Васильевич**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Овсянников Геннадий Александрович

кандидат физико-математических наук
Варлашкин Андрей Валерьевич

Ведущая организация:

Московский Педагогический Государственный
Университет (МПГУ)

Защита состоится 18 февраля 2010 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, аудитория

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан

2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 501.001.66,
кандидат физико-математических наук

И.Н. Карташов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

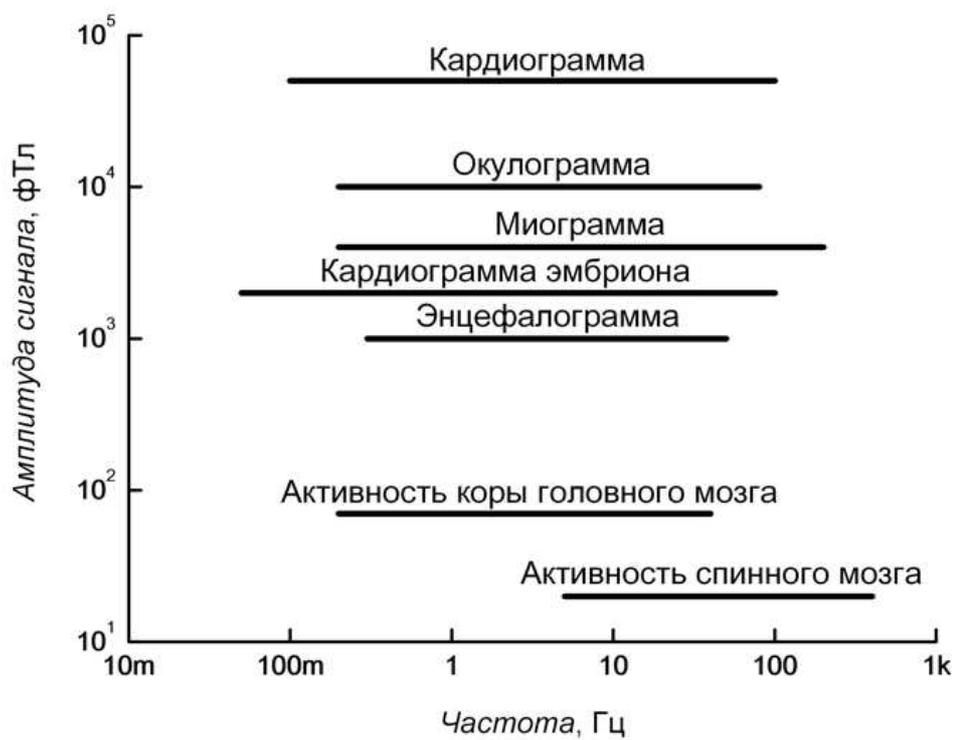


Рис. 1: Диапазоны частот и амплитуды магнитных сигналов от различных органов человека.

Большой интерес в современной науке и технике представляет использование высокотемпературных СКВИДов постоянного тока в высокочувствительных магнитометрических системах различного назначения, в частности, их практическое применение в диагностических комплексах для исследований биоманнитных сигналов, генерируемых живыми организмами. Выше на Рис.1 представлены диапазоны частот и амплитуды магнитных сигналов, генерируемых различными органами человека [1]. Очевидно, что для достоверной регистрации сигналов в указанном диапазоне частот и амплитуд наиболее предпочтительным представляется использование в качестве детекторов магнитного поля датчиков на базе низко- и высокотемпературных СКВИДов. На настоящий момент в науке и технике уже можно наблюдать успешное использование магнитометров на базе НТСП СКВИДов. В медицине,

например, это системы снятия магнитных энцефало- и кардиограмм человека [2] - [6], в геофизике - системы для измерения изменения магнитного поля Земли [7] - [10], в методах неразрушающего контроля качества материалов - системы для поиска внутренних микродефектов в материалах [11] - [15]. Однако, ряд преимуществ по сравнению в этом могли бы иметь магнитометрические системы на базе ВТСП СКВИДов. Во-первых, смена хладагента с жидкого гелия на жидкий азот сильно снизило бы стоимость эксплуатации систем. Второе неоспоримое преимущество ВТСП СКВИД-магнитометров заключается в гораздо большей мобильности измерительных систем по сравнению с системами на базе НТСП СКВИДов.

Однако, существует ряд особенностей в построении высокочувствительных магнитометрических систем на базе высокотемпературных СКВИДов постоянного тока. Во-первых, использование высокотемпературных СКВИДов для детектирования сигналов от биологических источников до недавнего времени было несколько ограничено из-за их недостаточной чувствительности по индукции магнитного поля. Предельная чувствительность стандартных высокотемпературных СКВИДов постоянного тока с автотрансформаторной системой преобразования индукции магнитного поля в магнитный поток в петле СКВИДа находится на уровне 80 - 100 фТл/Гц^{1/2}. При измерении магнитных полей, генерируемых в сердце или мозге человека, такой разрешающей способности оказывается не достаточно для получения диагностически ценной информации о работе проводящей системы сердца и мозга. Поэтому практическое применение высокотемпературных СКВИД-магнитометров в медицине представлялось очень проблематичным, пока не были изготовлены высокотемпературные СКВИД-датчики постоянного тока с предельной разрешающей способностью 15 фТл/Гц^{1/2} [16] (Исследовательский центр в г. Юлихе, Германия) вместо типичных 100 фТл/Гц^{1/2} [18], [19]. Данная модель ВТСП-СКВИД-датчиков была доработана авторами [16] до уровня коммерческих образцов, пригодных для использования в реальных измерительных системах, и получила условное обозначение "НТМ-8". Такие высокотемпературные СКВИДы уже могут быть использованы в биомагнитных

измерениях, так как их разрешающая способность по индукции магнитного поля сравнима с разрешающей способностью низкотемпературных датчиков.

Второй проблемой, которую необходимо преодолеть на пути практического применения таких СКВИД-датчиков в неэкранированном пространстве, является то, что до настоящего времени на ВТСП-материалах не удается реализовать конфигурацию приемных трансформаторов магнитного потока в форме градиометров второго порядка. Возможными решениями данной задачи является либо построения на базе трех ВТСП-СКВИД-магнитометров электронного градиентометра первого порядка с референтным СКВИДом [20], либо электронного градиентометра второго порядка [21].

В свою очередь, использование магнитометров с высокой чувствительностью по индукции магнитного поля в условиях высокой плотности индустриальных помех требует внесения существенных изменений в стандартную модуляционную СКВИД-электронику для того, чтобы магнитометры с ВТСП-СКВИД-датчиками типа НТМ-8 могли стабильно работать в неэкранированном пространстве. Поэтому необходимо разработать новый вариант модуляционной СКВИД-электроники, адаптированной для работы с такими высокочувствительными СКВИД-датчиками без дополнительной магнитной экранировки.

Цель работы

Целью данной работы были разработка и создание градиентометра на базе трех ВТСП СКВИДов для измерения слабых магнитных сигналов в неэкранированном пространстве. Так же ставилась задача исследования собственной чувствительности градиентометра.

Задачи работы

При выполнении работы ставились следующие задачи.

1. Адаптация модуляционной СКВИД-электроники для работы с ВТСП СКВИД-датчиком типа НТМ-8 в открытом пространстве.
2. Создание измерительной вставки с тремя ВТСП СКВИД-датчиками в азотный криостат с прецизионной системой механической балансировки.
3. Создание системы электронного градиентометра.

4. Проведение измерения собственной чувствительности градиентометра. Измерение магнитного поля от дипольного источника магнитного сигнала.

Научно-практическая ценность диссертации

Полученные в данной диссертации результаты крайне важны с точки зрения развития технической базы экспериментальной физики, биологии и методов диагностики в медицине.

Научная ценность данных результатов состоит в демонстрации реальной возможности использования ВТСП СКВИДов в высокочувствительной магнитометрии в неэкранированном пространстве.

Практическая ценность результатов состоит, прежде всего, в том, что использование ВТСП СКВИДов в магнитометрии на порядок снижает стоимость обслуживания магнитометра за счет использования более дешевого хладагента - жидкого азота. Кроме того, использование ВТСП СКВИДов с криокулерами гораздо легче, удобнее и дешевле в сравнении с НТСП СКВИДами. Так же можно с уверенностью сказать, что возможность использования ВТСП материалов в магнитных измерениях сильно увеличивает мобильность самих диагностических комплексов. Таким образом, открывается новая ниша крайне мобильных магнитометрических систем, которые могут быть интересны не только в экспериментальной физике и медицине, но и в методах неразрушающего контроля материалов.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на

- международной конференции "Applied Superconductivity Conference (ASC-2008)", Чикаго, Иллинойс, США, 2008;

- международной конференции "Micro- and nanoelectronics - 2009" (ICMNE-2009), Звенигород, 2009;

Результаты диссертации отражены в 6 публикациях, в том числе в двух статьях в научных реферируемых журналах [A1],[A3] рекомендованных ВАК, а также в 3 тезисах докладов конференций [A2],[A4],[A6]. По результатам работы получен патент РФ [A7].

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 107 страниц, включая 44 рисунка. Список литературы состоит из 70 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели работы, сформулированы задачи, а также перечислены основные результаты, представляемые на защиту. Кроме того, дано краткое описание содержания глав.

В **обзоре литературы** дан обзор теории, касающейся темы диссертации.

В **главе 1** описана работа СКВИД-магнитометров с модуляционной СКВИД-электроникой. Подробно рассмотрены возникающие преимущества при использовании ВТСП СКВИД-магнитометров нового типа по отношению к стандартным ВТСП СКВИД-магнитометрам. Основные характеристики используемых в работе датчиков приведены с следующей таблице:

Параметр	Значение
Размах сигнальной характеристики	50 мкВ
Наклон $\frac{\partial V_{SQUID}}{\partial \Phi}$	150 мкВ/ Φ_0
Величина $\frac{\partial B}{\partial \Phi}$	2.8 нТ/ Φ_0
Чувствительность по магнитному полю	50 фТл/ $\Gamma_{\text{ц}}^{1/2}$
Собственный шум	18 мк Φ_0 / $\Gamma_{\text{ц}}^{1/2}$
Эффективная площадь	0.7 мм ²
Коэффициент связи катушки обратной связи	2.5 мкА/ Φ_0

В разделе 1.1 рассмотрен принцип работы модуляционной СКВИД-электроники. Несмотря на то, что модуляционная схема СКВИД-электроники была впервые предложена в 1976 г. [22], она до сих пор остается более широко используемой, чем появившаяся позднее схема с прямым усилением [23]. Основным преимуществом модуляционной схемы является возможность применения согласующего трансформатора перед первым каскадом усиления в электронике, что полезно по двум причинам (см. рис. 2). Во-первых, это увеличивает выходной импеданс СКВИДа в k^2 раз, (k - коэффициент трансформации трансформатора), что переводит полевой транзистор в

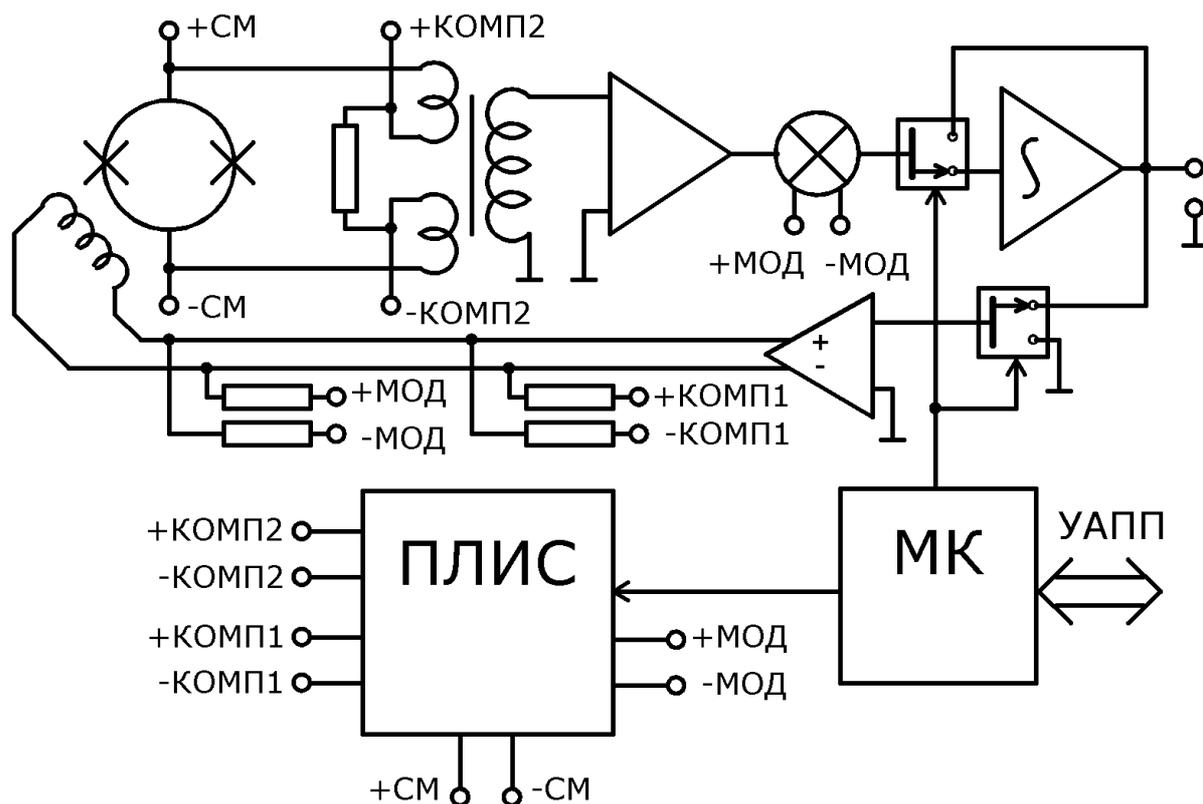


Рис. 2: Функциональная блок-схема нового варианта модуляционной СКВИД-электроники.

первом каскаде усиления в более благоприятный режим его работы с сопротивлением порядка 1 кОм на входе. Во-вторых, сам трансформатор усиливает сигнал в k раз, выступая в качестве малошумящего усилителя. Важным преимуществом модуляционной схемы является исключение из выходного сигнала низкочастотных шумов усилителей типа $1/f$.

В разделе 1.2 подробно описан реализованный в данной работе вариант модуляционной СКВИД-электроники. На Рис. 2 функциональная блок-схема устройства. Первый каскад усиления в СКВИД-электронике всегда играет самую важную усилительную роль, так как именно им определяется входной шум электроники. В нашей электронике он выполнен на базе n-канального полевого транзистора (n-Channel JFET) 2SK369. Основные характеристики разработанной СКВИД-электроники приведены в ниже:

Параметр	Значение
Полоса пропускания	от 20 кГц до 500 кГц
Скорость нарастания сигнала	250 к Φ_0 /с
Динамический диапазон	150 дБ
Шум входного усилителя	< 1 нВ/Гц ^{1/2}
Линейный коэффициент усиления	60000
Потребляемая мощность	~ 5 Вт
Физический размер	110 мм x 60 мм x 15 мм

В разделе 1.3 написано про систему переменного тока смещения, включенную в созданную СКВИД-электронику. Известно, что критические токи I_C и нормальные сопротивления в резистивном состоянии R_N джозефсоновских переходов, из которых состоят СКВИДы, подвержены низкочастотным флуктуациям. Однако в случае низкотемпературных СКВИДов с туннельными джозефсоновскими переходами эти флуктуации настолько малы, что почти не влияют на низкочастотный шум СКВИДа [24]. В случае же высокотемпературных СКВИДов флуктуации критического тока и нормального сопротивления являются доминирующим источником дополнительного низкочастотного шума [25]. Именно для борьбы с дополнительным низкочастотным шумом джозефсоновских переходов предложены схемы с переменным током смещения СКВИДа [23]. Сигнал переменного тока смещения в разработанной электронике формируется с помощью ПЛИС-матрицы и имеет прямоугольную форму, как и сигнал модуляции.

В разделе 1.4 описана работа СКВИД-электроники с ВТСП СКВИД-магнитометром типа НТМ-8 в неэкранированном пространстве. Для работы в неэкранированном пространстве в условиях индустриального города с датчиками магнитного поля типа НТМ-8 величина коэффициента обратной связи была настроена на значение 8 мВ/ Φ_0 (коэффициентом обратной связи называют величину напряжения на выходе интегратора схемы, задающего через резистор обратной связи ток в катушку модуляции, формирующий магнитный поток в СКВИДе, равный одному кванту Φ_0). При такой сильной глубине обратной связи СКВИД-магнитометр, состоящий из СКВИДа

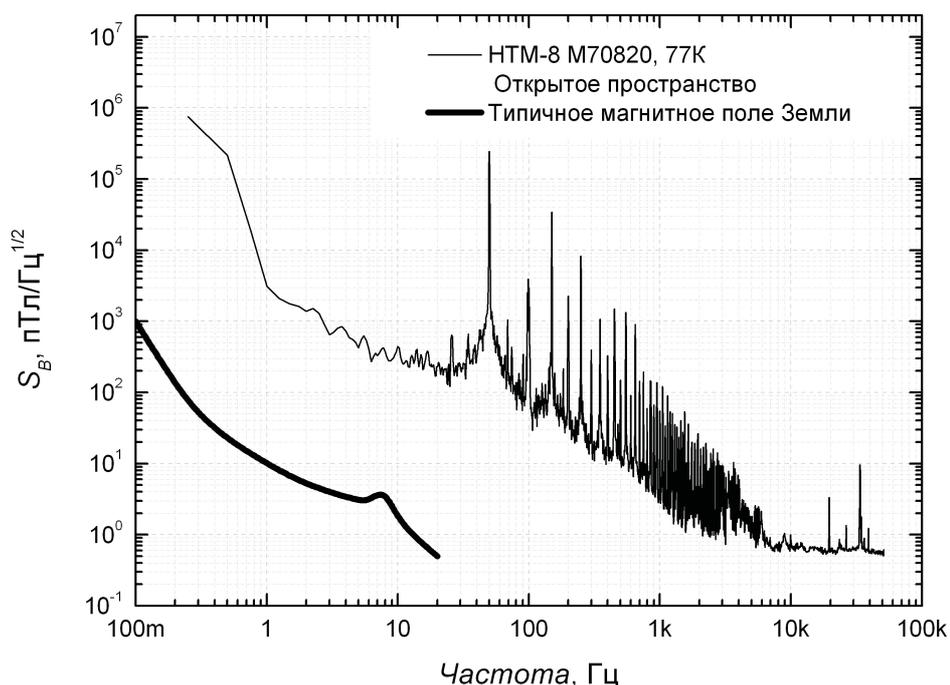


Рис. 3: Магнитный фон в индустриальном городе и в полевых условиях.

типа НТМ-8 и исследуемой электроники, стабильно работал на протяжении нескольких часов в условиях лаборатории, которая находится в центре Москвы. Спектр внешнего магнитного поля был зарегистрирован с помощью спектроанализатора модели SR785 фирмы Stanford Research Instruments (см. Рис.3).

В **главе 2** приведено описание измерительной вставки с тремя ВТСП СКВИД-датчиками. Для расположения СКВИД-датчиков типа НТМ-8 в азотном криостате была разработана и изготовлена специальная вставка из пластикового материала, имеющего очень низкий коэффициент температурного расширения. Каждый СКВИД располагается в измерительной вставке как показано на Рис. 4 (а).

При конструировании аксиального "электронного" градиометра СКВИД-датчики были размещены в измерительном зонде на одной вертикальной оси так, чтобы обеспечить максимальную параллельность приемных трансформаторов потока СКВИД-датчиков. Расстояние между датчиками

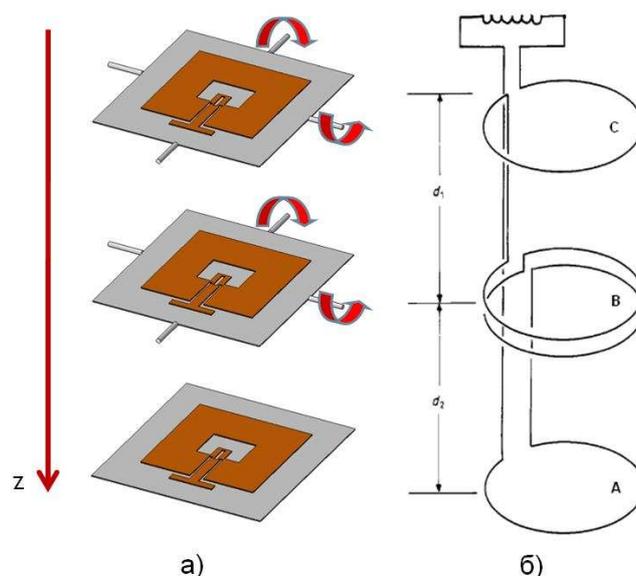


Рис. 4: а) Схема расположения 3-х ВТСП СКВИД-магнитометров в измерительном стержне с механической системой балансировки, б) Схема приемного трансформатора потока в форме аксиального градиентометра второго порядка из ниобиевой проволоки для низкотемпературных СКВИДов.

фактически, являющееся так называемой базой градиометра, равно 50 мм. Таким образом конструкция из трех ВТСП СКВИД-магнитометров является аналогом градиентометрической приемной петли в случае использования НТСП материалов (Рис. 4 (б)). Диаметр самого измерительного стержня равен 40 мм.

В главе 3 рассмотрена реализация электронной системы градиентометра с подробным анализом необходимых требований, предъявленных к магнитометрической системе в целом.

В разделе 3.1 подробно затронуты методы борьбы с внешними шумами. На Рис.3 показан спектр фонового магнитного поля в индустриальном городе. Измерять магнитные сигналы от биологических объектов (см. Рис.1) в таком шуме практически невозможно. Существует несколько способов подавления магнитного шума окружающего пространства при измерениях с помощью СКВИДов: магнитоэкранированная комната, градиентометрические приемные петли и электронная компенсация внешнего магнитного поля. Применение магнитоэкранированных комнат оказывается слишком дорогим и

неприемлемым для биомагнитных и медицинских применений.

Известно, что магнитные поля от удаленных источников гораздо более однородны, чем поля от источников, находящихся непосредственно рядом с магнитометром. Исходя из этого очевидно, что сигнал, равный разнице сигналов, измеренных в двух близко расположенных точках, будет иметь амплитуду на несколько порядков меньше, чем амплитуда исходного сигнала. При этом полезный сигнал практически не будет потерян, так как его источник всегда находится рядом с магнитометром, а шум будет уменьшен существенно.

К сожалению, до настоящего времени на ВТСП-материалах не удается реализовать конфигурацию приемных трансформаторов потока в форме градиометров второго порядка. Альтернативным подходом подавления внешнего магнитного шума может служить использование одного или более референсных магнитометров. В качестве референсных магнитометров могут выступать либо СКВИД-датчики, либо магнитометры любого другого типа. После вычитания сигнала, измеряемого референсным магнитометром, из другого СКВИД-магнитометра получается градиентометрический сигнал. Таким образом, для измерения градиентометрического сигнала 2 порядка с помощью ВТСП СКВИДов необходимо измерение магнитного сигнала каждым СКВИД-датчиком и дальнейшее сложение сигналов на электронном уровне по формуле:

$$\gamma(\alpha A - B) - (\beta B - C) = \alpha\gamma A - 2(\beta + \gamma)B - C \quad (1)$$

где A, B, C - исходные сигналы с 3 СКВИД-магнитометров, α, β, γ - подстроечные коэффициенты.

В разделе 3.2 приведено полное описание созданной электронной системы, производящей необходимое сложение сигналов с трех датчиков магнитного поля. Также тут приведена вся информация по системе электронного управления всем электронным градиентометром 2 порядка на базе трех ВТСП СКВИД-магнитометров.

В **главе 4** описана настройка, калибровка и балансировка созданной магнитометрической системы.

В результате всей работы была создана система электронного

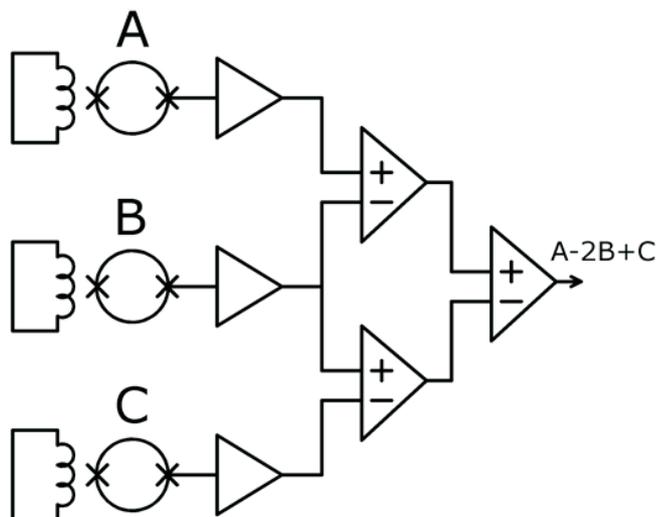


Рис. 5: Градиентометр 2 порядка.

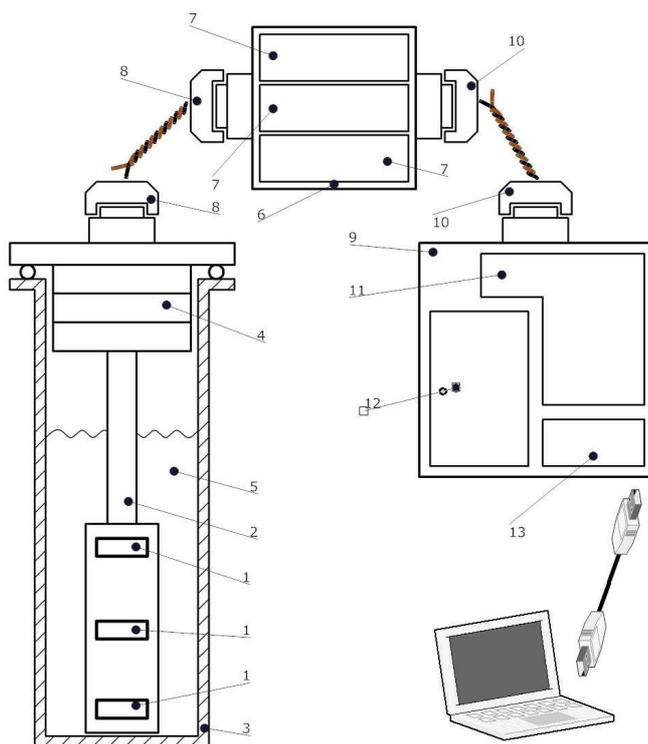


Рис. 6: Блок-схема всей системы, состоящей из измерительной вставки в азотном криостате с тремя ВТСП СКВИД-магнитометрами типа НТМ-8, блока трех СКВИД-электроник и блока электронного градиентометра. Управление системой осуществляется с персонального компьютера.

градиентометра, позволяющая измерять градиентометрический магнитный сигнал от различных источников. Система состоит из 3 каналов СКВИД-электроники, адаптированных для работы с ВТСП СКВИДами в открытом пространстве, блока электронного градиентометра и цифрового блока управления системой. Три СКВИД-датчика располагаются в специальном пластиковом измерительном стержне. Вся система управляется с помощью персонального компьютера. На Рис.6 изображена блок схема созданной системы, основными частями которой являются:

1. 3 ВТСП СКВИД-магнитометра типа НТМ-8
2. пластиковая вставка в азотный криостат
3. азотный криостат из неметаллического материала
4. пенопластовое горло в азотный криостат
5. жидкий азот
6. блок 3-х канальной СКВИД-электроники
7. модуляционная СКВИД-электроника, адаптированная для работы с ВТСП СКВИД-магнитометрами типа НТМ-8
8. соединительный кабель с разъемами типа SCSI
9. система электронного градиентометра
10. соединительный кабель с разъемами типа DVI-29
11. блок электронного градиентометра, управляемый микроконтроллером типа AVR
12. блок питания всей системы
13. электронный блок управления системой на базе микроконтроллера типа ARM7

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Заключение

1. Создана модуляционная СКВИД-электроника, адаптированная для работы с ВТСП СКВИДами постоянного тока как в экранированном, так и в открытом пространстве. У созданного варианта СКВИД-электроники расширен динамический диапазон до 150 дБ и имеется возможность подавать в СКВИД переменный ток смещения.

2. Для СКВИД-магнитометра с дополнительным концентратором магнитного потока, обеспечивающим чувствительность в экранированном пространстве $50 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ на частотах выше 10 Гц, продемонстрирована стабильная работа СКВИД-магнитометров типа НТМ-8 в неэкранированном пространстве в условиях индустриального города с чувствительностью на уровне $100 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$.

3. Спроектирована и собрана измерительная пластиковая вставка в азотный криостат с тремя ВТСП СКВИД-магнитометрами, располагающимися вертикально друг над другом. В конструкции вставки создана прецизионная система механической балансировки электронного градиентометра.

4. Спроектирован и сконструирован электронный градиентометр второго порядка, производящий обработку сигналов с трех СКВИДов по формуле $A - 2B + C$. Созданное устройство имеет следующие характеристики:

- База градиентометра равна 10 см.
- Предельная чувствительность по магнитному полю составляет $4 \text{ фТл/см}^2\text{Гц}^{1/2}$ или $100 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$, приведенных к нижнему СКВИД-магнитометру .
- Рабочая полоса измеряемого сигнала равна 15 кГц.
- Динамический диапазон измеряемого сигнала равен 144 дБ.
- Скорость слежения изменения измеряемого сигнала равна $250 \text{ к}\Phi_0/\text{с}$.

5. Прибор может быть использован с предельной чувствительностью по магнитному полю $4 \text{ фТл/см}^2\text{Гц}^{1/2}$ в слабо-экранированном пространстве

или в местах, удаленных от промышленных помех с использованием аккумуляторного питания всей системы. Также возможно использование созданной магнитометрической системы в условиях неэкранированного пространства в промышленном городе с чувствительностью $8 - 12 \text{ фТл/см}^2\text{Гц}^{1/2}$, что эквивалентно $200 - 300 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$, приведенным к нижнему СКВИД-магнитометру.

6. Проведенное исследование показало, что использование высокотемпературных СКВИД-магнитометров в области измерения магнитных сигналов в неэкранированном пространстве в промышленном городе затруднено наличием сильного и крайне нестабильного низкочастотного магнитного фона.

Результаты диссертации отражены в следующих публикациях

- [A1] Е.В. Бурмистров, П.Н. Дмитриев, М.А. Тарасов, А.С. Калабухов, С.А. Ковтонюк, С.А. Гудошников, О.В. Снигирев, Л.С. Кузьмин, В.П. Кошелец, "Реализация планарного СКВИД-пикоамперметра", Радиотехника и Электроника, 2006, т. 51, е 5, стр. 1-6.
- [A2] L. Kuzmin, P. Mauskopf, V. Zakosarenko, D. Golubev, E. Burmistrov, H.-G. Meyer, "Cold-Electron Bolometers with SQUID Readout for OLIMPO Balloon Telescope", 7-th Int. Conf. on Low Temp. Electron., WOLTE-7, 21-23 June 2006, Noordwijk, The Netherlands. ESA Proceedings 264, pp. 117-124
- [A3] Е.В. Бурмистров, В.Ю. Слободчиков, В.В. Ханин, Ю.В. Масленников, О.В. Снигирев, "Модуляционная СКВИД-электроника для работы с высокотемпературными СКВИДами в открытом пространстве", Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, е10, стр. 1333-1340.
- [A4] E.V. Burmistrov, V.Yu. Slobodchikov, V.V. Khanin, Yu.V. Maslennikov, O.V. Snigirev, "DC SQUID modulation electronics for operation with HTS DC SQUID magnetometers in the unshielded environment", 2008 Applied Superconductivity Conference, Chicago, Illinois USA, August 17-22, 3EPF02.
- [A5] E.V. Burmistrov, V.Yu. Slobodchikov, V.V. Khanin, Yu.V. Maslennikov, O.V. Snigirev, "DC SQUID modulation electronics for operation with HTS DC

SQUID magnetometers in the unshielded environment", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, issue 3, pp. 206-209.

[A6] E.V. Burmistrov, V.Yu. Slobodchikov, V.V. Khanin, Yu.V. Maslennikov, "DC SQUID modulation electronics for operation with HTS DC SQUID magnetometers in the unshielded environment", L1-06, International Conference "Micro- and nanoelectronics", 2009.

[A7] 29.10.2009 в федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ принято решение о выдаче патента РФ по заявке € 2008147035(061496) от 28.11.2008 "Магнитометр-градиентометр на основе СКВИДов постоянного тока из высокотемпературных сверхпроводников".

Список литературы

- [1] Wikswo J.P., Applications of SQUID magnetometers to biomagnetism and non-destructive evaluation, *Application of superconductivity, H. Weinstock, pp. 139-228, 2000*
- [2] Koch H., SQUID Magnetocardiography: Status and Perspectives, *IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, No. 1, 2001*
- [3] Fenici R., Brisinda R., and Meloni R., Clinical application of magnetocardiography, *Expert Rev. Mol. Diagn. 5 n.3, 291-313 2005*
- [4] Измеров Н.Ф., Ушаков И.Б., Бухтияров И.В., Васнев А.В., Масленников Ю.В., Кондратюк Л.Л., Никитина Л.С., Магнитокардиография как новый метод кардиодиагностики для медицины труда, *Медицина труда и промышленная экология, 2005, € 6, с.32-37*
- [5] Howak H., Giessler F., Huonker R., Multichannel magnetocardiography in unshielded environments, *Clin. Phys. Physiol. Meas., 12, 5-11, 1991*
- [6] Lounasmaa O.V., Seppa H., SQUIDS in Neuri- and Cardiomagnetism, *J. of Low Temp. Phys., V. 135, N. 5/6, 2004*

- [7] J. Clarke, Geophysical applications of SQUID, *IEEE Trans. Magn.*, **19**, 288, 1983
- [8] Foley C.P., Tilbrook D.I., Leslie K.E. et al., Geophysical exploration using magnetic gradiometry based on HTS SQUIDs, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11**, 1375, 2001
- [9] Leslie K.E., Binks K.E., Foley C.P. et al. Operation of a geophysical HTS SQUID system in sub-Arctic environments, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13**, 759, 2001
- [10] Meyer H.G., Stolz R., Chwala A., Schulz M., SQUID technologies for geophysical exploration, *Phys. Stat. Sol.*, (c) **2**, 1504, 2004
- [11] Weinstock H., A review of SQUID magnetometry applied to nondestructive evaluation, *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 3231, 1991
- [12] Mignogna R.B., Chaskelis H.H., Investigation of deformation using SQUID magnetometry, *Review of Progress in QNDE vol. 8*, ed. Thompson D.O. and Chimenti D., pp. 551-8, 1989
- [13] Banchet J., Jouglar J., Vuillermoz P.-L., Waltz P. and Weinstock H., Magneto-mechanical behaviour of steel via SQUID magnetometry, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, 2486, 1995
- [14] Wikswo J.P., Design considerations for magnetic imaging with SQUID microscopes and arrays, *Pros. 4th Int. Superconductive Electronics Conf.*, pp. 189, 1993
- [15] Jenks W.G., Sadeghi S.S.H. and Wikswo J.P., SQUIDs for nondestructive evaluation, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **30**, 293-323, 1997
- [16] Faley M.I., Poppe U., Urban K., Paulson K. and Fagaly K., A New Generation of the HTS Multilayer DC-SQUID Magnetometers and Gradiometers, *Journal of Physics: Conference Series* **43**, 1199-1202, 2006

- [17] Фалей М.И., Тонкопленочные гетероструктуры оксидных сверхпроводников и их применение для сверхпроводниковых квантовых интерферометров, *Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Москва, 2005*
- [18] Cantor R., Lee L.P., Teepe M., Vinetskiy V., and Longo J., Low-noise single-layer YBaCuO DC-SQUID magnetometers at 77K, *IEEE Trans. Magn.*, 1991, v.27, N 2, pp. 1434-1437
- [19] Lee L.P., Longo J., Vinetskiy V., and Cantor R., Monolithic 77K dc SQUID magnetometer, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, V. 59, N 23, pp. 3051-3053
- [20] Koch R.H., Rozen J.R., Sun J.R. and Gallagher W.J., Tree SQUID gradiometer, *Appl. Phys. Lett.* **63**, n.3, 19 July 1993.
- [21] Zhang Y., Panaitov G., Wang S.G., Wolters N., Otto R., Schubert J., Zander W., Krause H.-J., Soltner H., Bousack H. and Braginski A.I., Second-order, high-temperature superconducting gradiometer for magnetocardiography in unshielded environment, *Appl. Phys. Lett.* **76**, n. 7, 14 February 2000.
- [22] Clarke J., Goubau W.M. and Ketchen M.B., Tunnel junction DC SQUID: fabrication, operation and performance, *J. Low Temp. Phys.*, **25**, 99-44, 1976
- [23] D. Drung, "High-TC and Low-TC dc SQUID electronics", *Supercond. Sci. Technol.* 16 (2003) 1320-1336.
- [24] Savo B., Wellstood F.C. and Clarke J., Low frequency excess noise in Nb-Al₂O₃-Nb Josephson tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1757-9, 1987
- [25] Koelle D., Kleiner R., Ludwig F., Dantsker E. and Clarke J., High-transition-temperature superconducting quantum interference devices, *Rev. Mod. Phys.* **71**, 631-86, 1999