

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ИМ. Б. И. ВЕРКИНА

На правах рукописи

САМАРСКИЙ Виктор Андреевич

УДК 537.312.62

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДОСТИЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ АСТАТИЧНОСТИ
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАГНИТОГРАДИЕНТОМЕТРОВ

01.04.09 - Физика низких температур

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков - 1993

ВИБ им. В. Стефанюк
АН Украины

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00803153 (K)

16 27, 772
Работа выполнена в Физико-техническом институте
низких температур им. Б. И. Веркина АН Украины.

Научный руководитель - доктор технических наук
профессор С. И. Бондаренко

Официальные оппоненты - доктор технических наук
С. П. Логвиненко
(ФТИНТ АН Украины, г. Харьков)

доктор технических наук
И. Д. Войтович
(ИК АН Украины, г. Киев)

Ведущая организация - Институт Земного
магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн Российской Академии Наук

Защита состоится "___" _____ 1993г. в ___ час.
на заседании Специализированного совета Д 016.27.01
при Физико-техническом институте низких температур
им. Б. И. Веркина АН Украины по адресу
310164, г. Харьков, просп. Ленина, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в научной
библиотеке ФТИНТ им. Б. И. Веркина АН Украины.

Автореферат разослан "___" _____ 1993г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
кандидат физ.-мат. наук

Хацько Е. Н. Хацько

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы обусловлена наличием задач на стыке наук в областях прикладной сверхпроводимости и магнитных измерений, решение которых позволит создать измерители всех компонент тензора градиента магнитной индукции, обладающие высокой чувствительностью и высокой астатичностью. Эти параметры могут быть реализованы при размещении приборов на подвижных основаниях. Существующие измерители магнитной индукции и средства их поверки удовлетворительны, однако создание на их базе измерителей градиентов магнитной индукции затруднено необходимостью иметь большую базу для реализации требуемой чувствительности и высокую идентичность каналов для реализации требуемой астатичности, а также созданием средств поверки этих величин. Применение явления сверхпроводимости, эффектов Мейсснера, Джозефсона, других аспектов физики низких температур, позволяет создать недостающий класс удовлетворительных измерителей градиента магнитной индукции. Основные преимущества криогенных градиентометров состоят в одноканальности этих приборов, у которых вопросы идентификации каналов сводятся к повышению астатичности только их измерительных преобразователей, а реализация требуемой чувствительности возможна при базе до 0,5м. Если существующие астатические магнитометры имеют, например, астатичность равную $1,5 \cdot 10^3$ и реализуемую только в стационарных условиях, то сверхпроводниковые приборы могут иметь астатичность порядка 10^6 , реализуемую при размещении их на подвижных основаниях. Открытие в 1987г. высокотемпературной сверхпроводимости позволит в перспективе создавать криогенные магнитометрические приборы, работающие при температуре жидкого азота, что значительно удешевит их криогенное обеспечение.

В 1971г. Циммерман (США) успешно использовал сверхпроводниковые (с.п.) измерители градиента магнитной индукции (градиентометры) для магнитокардиографии. Вин с соавторами (США) в 1975г. определили движение магнитного диполя в пространстве с помощью с.п. пятикомпонентного измерителя градиента магнитной индукции и с.п. трехкомпонентного измерителя магнитной индукции. В 1977г. Бондаренко С.И. с соавторами (СССР) применили с.п. магнитометрические приборы в геофизике для поиска полезных ископаемых. Циммерман в 1980г. и Гастинг с соавторами (США) в 1985г. рассмат-

ривали вопросы применения с.п. градиентометров для исследования параметров магнитного поля в космосе.

Астатичность (см. БСЭ, 1970г., стр.333) прибора определяет коэффициент подавления вариаций магнитного поля Земли, которые являются помеховым сигналом, а также помех, возникающих при перемещениях прибора в поле Земли. Судя по публикациям, разработанные в США с.п. градиентометры обладают астатичностью на уровне 10^7 , что обусловлено возможностями симметрирующих устройств, однако называется также предельная величина астатичности, равная $2 \cdot 10^5$, обусловленная методическими ограничениями, возникающими вследствие неоднородности геомагнитного поля.

К моменту постановки темы диссертации в нашей стране подобные работы не проводились.

Ц е л ь р а б о т ы состояла в исследовании взаимодействия магнитного поля с элементами с.п. измерительных преобразователей градиентометров, низкотемпературных материаловедческих исследованиях различных свойств материалов, исследовании магнитометрических методов определения астатичности и различных конструкций криогенных устройств достижения высокой астатичности для создания с.п. измерителей градиента магнитной индукции, которые можно использовать на подвижных основаниях.

З а щ и щ а е м ы е научные результаты и их новизна. В работе экспериментально подтверждены выводы теории распределения магнитного поля вокруг с.п. тонких дисков относительно влияния последних на эффективную величину магнитного потока, сцепленного с элементами измерительных преобразователей с.п. магнитоградиентометров; впервые доказана необходимость предварительного термоциклирования в диапазоне температур (77-300)К заготовок каркасов для снятия внутренних напряжений, приводящих к необратимому формоизменению изделий, следствием чего является изменение астатичности в процессе эксплуатации приборов; впервые в магнитометрии предложен метод определения астатичности вплоть до высоких величин, учитывающий стационарный градиент в месте измерений, посредством чего решается задача поверки астатичности (защищено авторскими свидетельствами); впервые в стране достигнуты величины астатичности на уровне начала седьмого порядка, что обеспечено устройствами, защищенными авторскими свидетельствами; впервые проведены испытания разработанных с.п. градиентометров с

высокой астатичностью на авиационных носителях (вертолетах), которые показали, что такие приборы могут успешно использоваться на подвижных основаниях без дорогостоящих стабилизирующих и ориентирующих гироскопических платформ.

На защиту выносятся следующие основные положения, результаты, выводы и рекомендации:

1. Разработан метод определения астатичности с.п. ИП градиента магнитной индукции. Его новизна и эффективность обусловлены физически обоснованной постановкой задачи изучения стереометрии ИП, а также учетом характеристик электронного тракта прибора и способом оценки погрешности определения астатичности. Следствием применения метода явилась возможность использования магнитного поля Земли (МПЗ), а эффективностью применения метода - отсутствие необходимости создания сложных дорогостоящих систем генерации магнитных полей с высокой степенью однородности.

1.1. Сущность метода состоит в построении зависимости выходных сигналов прибора при наклонах его ИП в МПЗ, производимые в плоскости магнитного меридиана в заданных точках остановок при повороте преобразователя вокруг оси.

1.2. Создана установка, позволяющая реализовать предложенный метод в автоматизированном режиме, что исключает присутствие оператора рядом с высокочувствительным ИП в процессе измерений, а также обеспечивающей неизменность заданных углов наклонов и поворотов ИП от одного цикла измерений к следующему с точностью не хуже одного процента.

1.3. Результаты проведенных исследований по предложенному методу состоят в установлении ограниченности исходной астатичности ИП величинами $\approx 10^3$, в определении того, что для практических применений необходимо и возможно повышать исходную астатичность преобразователей до уровня 10^7 , в разработке способа сочетания разворота ИП и предложенного метода, что позволяет обойти ограничения, накладываемые конечной однородностью МПЗ на возможность достижения указанной величины астатичности.

2. Разработаны конструкции ИП с исходной астатичностью более 10^3 , в основу которых положено размещение витков преобразователей в торцевых пазах каркасов, что дало возможность изготавливать их на базе доступных технологий, легко обрабатываемых и магнитостерильных материалов (текстолитов), достаточно надежных и стабиль-

ных в процессе длительной эксплуатации ИП.

2.1. Выявлена необходимость учета необратимого формоизменения конструкционных материалов под воздействием циклических температурных нагрузок, влияющего на стабильность астатичности ИП, что стимулировало проведение измерений и исследований указанных характеристик для материалов, применяемых в криогенных магнитометрических приборах.

2.2. Обнаружена зависимость астатичности ИП от уровня гелия в кристатах, что указывает на возможность использования этого явления для исследований магнитных характеристик ИП и кристата при низких температурах.

3. Разработаны и испытаны устройства повышения астатичности ИП, новизна которых характеризуется использованием простых технологий изготовления и дешевых материалов, в обеспечении их высокой надежности и стабильности в процессе эксплуатации.

3.1. Показано, что конструкции устройств повышения астатичности типа магнитометр-балансировочный элемент, целесообразно использовать для повышения астатичности ИП, имеющих низкую (менее 10^2) исходную астатичность, а конструкции только с балансировочными элементами для больших (более 0.1м) ИП и высоких степенях (более 10^2) исходной астатичности.

3.2. Созданы двухступенчатые устройства повышения астатичности с выполнением опорных поверхностей для перемещения и фиксации балансировочных элементов непосредственно на каркасах измерительных преобразователей, причем каждая ступень балансировки должна обеспечивать повышение астатичности на два порядка.

3.3. Экспериментальные исследования диапазонов компенсации балансировочных элементов и сравнение этих результатов с расчетом на ЭВМ, показывает достоверность теоретической модели, которая может использоваться для определения требуемых размеров балансировочных элементов в виде тонких, плоских сверхпроводящих дисков.

3.4. Создание конструкций измерительных преобразователей и балансировочных устройств позволили практически получить приборы с астатичностью более 10^6 .

3.5. Показано, что электронный способ компенсации разбаланса позволяет на два порядка поднять астатичность ИП, а также сделать выводы о целесообразности применения таких систем.

Практическая ценность работы

заключается в том, что разработаны и испытаны авиационные измерители градиента магнитной индукции с высокой астатичностью для решения задач магнитометрии; экспериментально исследованы закономерности искажения магнитных полей с.п. дисками вблизи с.п. ИП градиентометров и разработаны конкретные программы для расчетов на ЭВМ диапазонов компенсации балансировочных дисков, что подтвердило существующую по этому вопросу теорию, а также необходимо при проектировании с.п. градиентометров; предложены различные методы и устройства определения и достижения высокой астатичности градиентометров, которые используются при разработке приборов; проведенные исследования низкотемпературных свойств различных материалов позволяют выбрать соответствующие предъявляемым требованиям для создания криогенных градиентометров. Конструкторские предложения, защищенные авторскими свидетельствами, освоены в конкретных устройствах и дали фактический экономический эффект. Методы, разработанные в ходе исследований, использовались в НПО "Рудгеофизика" Министерства геологии СССР и ЛО ИЗМИР АН СССР, в практике ФТИНТ АН Украины, а также могут быть использованы в ИЗМИР РАН, в Государственных геологических предприятиях Украины, метрологических организациях.

П у б л и к а ц и и. Основные результаты диссертационной работы отражены в 12 публикациях, включающих статьи во всесоюзных научно-технических журналах, доклады на всесоюзных и международной конференциях, авторские свидетельства.

А п р о б а ц и я р а б о т ы. Результаты исследований, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на 2-й Всесоюзной конференции "Методы и средства измерений параметров магнитного поля", Ленинград, 1980г.; 4-й Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры", Ленинград, 1983г.; 3-й Всесоюзной конференции "Методы и средства измерения параметров магнитного поля", Ленинград, 1985г.; 24-й Международной конференции стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур, ГДР, Берлин, 1985г.

С т р у к т у р а и о б ъ е м д и с с е р т а ц и и. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и приложений. Общий объем составляет 149 стр. основного текста, 74 рис., 7 табл., список литературы из 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследований, основные положения, результаты, выводы и рекомендации, выносимые на защиту. Здесь же кратко изложены основные вопросы, которые рассматриваются в каждом разделе и заключении.

В первом разделе рассматриваются вопросы методического обеспечения измерений величины астатичности сверхпроводниковых измерительных преобразователей, в которые включается сравнительный анализ известных методов определения астатичности и предложенного, разработанного для решения задачи изучения стереометрии ИП, а также представлены основные узлы установки, позволяющей в автоматизированном режиме производить требуемые перемещения криостата с ИП в МПЗ.

Разработан метод изучения стереометрии ИП сверхпроводникового градиентометра (СГ), суть которого сводится к "просвечиванию" ИП неизменным приращением магнитного потока с разных сторон (изменяя угол поворота ИП вокруг оси через, например, 30° от 0 до 360°) и измерением величины выходного сигнала СГ, возникающего при наклоне ИП на угол α в плоскости магнитного меридиана. Реализация предложенного метода на конкретном ИП показала, что зависимость $V(\beta)$ имеет вид смещенной на некоторую величину B относительно оси абсцисс синусоиды с некоторой амплитудой C и выражается формулой

$$(1) \quad V(\beta) = B + C \sin \beta$$

Величина B , которая не изменяется при изменении угла поворота, указывает на наличие в стереометрии ИП некоторой площади, перпендикулярной оси ИП, а величину C можно объяснить наличием площади, параллельной оси ИП. Стереометрия реального ИП СГ представляется идеальным ИП СГ и двумя независимыми ИП сверхпроводниковых магнитометров.

При экспериментальном снятии зависимости $V(\beta)$ должны работать два оператора, один разворачивает и наклоняет криостат с ИП, а другой снимает показания с измерительной аппаратуры. Однако принципиальная трудность состоит в том, что на операторе

не должно быть никаких магнитных предметов, иначе любое его перемещение вносит искажения в измерения, кроме того учитывался монотонный и однообразный характер таких работ. Поэтому было разработано и изготовлено автоматизированное поворотное устройство, позволившее по программе производить наклоны и повороты криостатов с ИП в автоматизированном режиме с использованием удаленного на необходимое расстояние электродвигателя. Программа обеспечивается исключительно механическими устройствами без электрических сигналов.

Метод изучения стереометрии явился основой для определения астатичности СГ по формулам:

$$(2) \quad A_z = \frac{T[\cos j \sin \alpha - \sin j(1 - \cos \alpha)]}{B \cdot b},$$

$$(3) \quad A_{xy} = \frac{T[\sin j \sin \alpha + \cos j(1 - \cos \alpha)]}{C \cdot b},$$

где A_z и A_{xy} - астатичность СГ относительно вертикальной и горизонтальной компонент соответственно, T - модуль полного вектора МПЗ в месте измерений, j - наклонение полного вектора, b - база ИП.

В этом же разделе рассматриваются вопросы ограничения степени достижимой астатичности, обусловленные неоднородностью МПЗ в месте измерений. Это ограничение определяется величиной $A = H/\Delta H$. Предложен способ выявления этого ограничения, основанный на изучении зависимости выходного сигнала прибора при увеличивающемся угле наклона α ИП. Если экспериментально полученная зависимость отличается от расчетной, которая обусловлена площадью разбаланса, то делается вывод о том, что появляется часть выходного сигнала, регистрируемая идеальным ИП СГ, связанного с неоднородностью МПЗ.

Представлен способ повышения астатичности, основанный на совмещении разворота ИП в вертикальной плоскости с методом определения стереометрии и перемещением балансировочных элементов, который позволяет повысить величину достижимой астатичности путем учета неоднородности МПЗ в месте проведения симметрирования.

Во втором разделе излагаются результаты исследований факторов, влияющих на стабильность астатичности, связанных со стабильностью геометрических размеров и магнитностью

характеристик конструкций и используемых материалов соответственно, кроме того, изложены вопросы конструирования ИП СГ, а также анализируются технологии изготовления ИП и зависящие от них величины исходной аstaticности ИП.

Впервые рассматривается вопрос о необходимости учета при создании ИП СГ эффектов необратимого формоизменения материалов при теплосменах. Проведено экспериментальное исследование стабильности геометрических размеров образцов из текстолита к циклическому тепловому воздействию в диапазоне температур (77-293)К.

Исследовались температурные зависимости магнитной восприимчивости материалов вблизи температуры кипения жидкого гелия с целью выявления магнитных шумов в рабочем диапазоне температур от различных конструкционных материалов. Шумы могут быть обусловлены нестабильностью температуры гелиевой ванны, что необходимо учитывать при выборе материалов конструкций.

В третьем разделе сопоставляются ранее известные и предложенные в диссертации способы симметрирования ИП, а также устройства, с помощью которых можно производить балансировку ИП, построенные как на основе физических принципов (эффект Мейсснера), так и на электронной компенсации с помощью трех взаимноортогональных сверхпроводниковых магнитометров.

Впервые проведены экспериментальные исследования взаимодействия магнитных полей с элементами с.п. ИП градиентометров. Подтверждены выводы теории относительно взаимодействия магнитных полей с тонкими сверхпроводящими дисками, размеры которых сравнимы с размерами магниточувствительных элементов. Разработаны программы для расчетов на ЭВМ диапазонов компенсации балансировочных элементов.

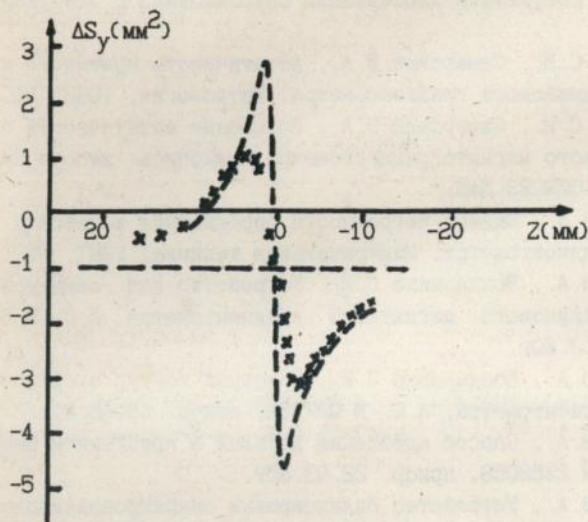
Для примера, на рисунке приведены результаты экспериментальных исследований диапазонов компенсации симметрирующего элемента и теоретическая кривая, полученная из формулы:

$$\Phi_d = -NB_x 2a_d^3 \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \rho d\rho [(x_0 + \rho \cos \phi) / (\rho^2 + 2x_0 \rho \cos \phi + x_0^2 + z^2)^{5/2}] / \pi,$$

в предположении $a_d \ll r$, т.е., радиус диска много меньше радиуса витка ИП градиентометра, а $\Phi_0 = NAB_x$.

Принцип действия созданных устройств основан на особенностях

взаимодействия магнитных полей со сверхпроводящими элементами. В этих устройствах впервые использовалась плоская система миниметр-перемещающийся сверхпроводящий диск, а также устройства с симметрированием посредством изменения размеров извлекаемых из



криостата балансировочных элементов.

Определены возможности электронного способа компенсации разбаланса, который рассматривается как дополнительный, применяемый после физической балансировки.

Четвертый раздел включает результаты полевых испытаний приборов с высокой астатичностью, разработанных и изготовленных при выполнении этой работы.

Максимальная достигнутая степень астатичности относительно вертикальной компоненты составила $2,7 \cdot 10^6$, а относительно горизонтальной компоненты составила $1,6 \cdot 10^6$.

В заключении сформулированы выводы, из которых следует, что в диссертации исследованы различные свойства материалов при низких температурах, рассмотрены закономерности взаимодействий магнитных полей с элементами сверхпроводниковых конструкций, исследованы вопросы метрологического обеспечения измерителей

градиента магнитной индукции, позволившие создать сверхпроводящую индукцию, которые были разработаны и успешно испытаны при работе на подвижных основаниях без стабилизирующих платформ, а также намечены пути дальнейших исследований.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бондаренко С. И., Самарский В. А., Астатичность приемного контура сверхпроводящего градиентометра, Метрология, 1982, №1, с. 52.
2. Бондаренко С. И., Самарский В. А., Повышение астатичности сверхпроводящего магнитоградиентометра, рукопись депонирована в ВИНТИ, N 1068-83 Деп.
3. Самарский В. А., Оценка погрешности определения астатизма магнитного градиентометра, Измерительная техника, 1987, №12, с. 50.
4. Самарский В. А., Бондаренко С. И., Устройство для симметризации сверхпроводящего магнитного градиентометра, А.С. N 900699, приор. 18.03.80г.
5. Самарский В. А., Бондаренко С. И., Приемный контур сверхпроводящего градиентометра, А.С. N 997533, приор. 03.06.81г.
6. Самарский В. А., Способ крепления деталей в криогенном резервуаре, А.С. N 2468068, приор. 22.03.85г.
7. Самарский В. А., Устройство балансировки сверхпроводящего градиентометра, А.С. N 1443598, приор. 01.04.86г.
8. Самарский В. А., Способ симметрирования градиентометра, А.с. N 1593420, приор. 12.01.88г.

Ответственный за выпуск - кандидат физ.-мат. наук
ГРИГОРАШЕНКО О. Н.

Подписано к печати 12.03.1993г.,
физ.п.л. 1, учет. изд. л. 1, заказ N 4I, тираж 100 экз.

Ротап rint ФТИНТ АН Украины, 310164, Харьков-164, пр. Ленина, 47