

Институт физики им. Л. В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН) –  
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
(ФИЦ КНЦ СО РАН)

На правах рукописи



Боев Никита Михайлович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО  
МАГНИТОМЕТРА СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО РЕЗОНАТОРА  
С ТОНКОЙ МАГНИТНОЙ ПЛЕНКОЙ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

*Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук*

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
профессор  
Беляев Борис Афанасьевич

Красноярск 2019

## Оглавление

Введение.....		4
1	Обзор датчиков магнитных полей .....	12
1.1	Классификация магнитометрических преобразователей.....	13
1.2	Магнитометрические преобразователи на тонких магнитных пленках.....	20
1.3	Методы измерения магнитных характеристик тонкопленочных образцов .....	23
	Выводы по главе 1 .....	26
2	Датчики слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой .....	28
2.1	Разработка конструкций датчиков и градиентометров слабых магнитных полей .....	31
2.2	Теоретическое исследование датчика слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой.....	39
2.2.1	Модель микрополоскового датчика слабых магнитных полей.....	39
2.2.2	Результаты исследования микрополоскового датчика слабых магнитных полей .....	44
2.2.3	Заключение по результатам теоретического исследования модели микрополоскового датчика слабых магнитных полей .....	47
2.3	Характеристики разработанных датчиков слабых магнитных полей .....	48
2.4	Исследование и оптимизация параметров датчиков слабых магнитных полей...	52
2.5	Аппаратное и программное обеспечение датчиков слабых магнитных полей ....	56
2.6	Применение датчиков слабых магнитных полей.....	58
2.6.1	Электромагнитные геофизические исследования .....	59
2.6.2	Ближнепольные магнитные системы связи.....	62
	Выводы по главе 2 .....	66
3	Автоматизированный комплекс для проведения измерений характеристик тонких магнитных пленок и чувствительных элементов датчиков.....	69
3.1	Методы измерения параметров тонких магнитных пленок и чувствительных элементов датчиков.....	69
3.2	Состав оборудования автоматизированного измерительного комплекса.....	74
3.3	Программно-аппаратная реализация автоматизированного измерительного комплекса .....	78
3.4	Результаты измерений с использованием автоматизированного измерительного комплекса .....	82
	Выводы по главе 3 .....	83

4	Измерительные головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса ...	85
4.1	Разработка новой конструкции головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса .....	86
4.2	Разработка автоматизированной установки для исследования режимов работы головок спектрометра ферромагнитного резонанса .....	93
4.3	Исследование локальных участков магнитных пленок чувствительных элементов датчиков слабых магнитных полей .....	95
	Выводы по главе 4 .....	98
	Заключение .....	99
	Список сокращений и условных обозначений .....	101
	Список литературы .....	103
	Приложение А – Исследование зависимости коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от мощности возбуждения резонатора .....	113
	Приложение Б – Исследование угловых зависимостей коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика.....	115
	Приложение В – Исследование зависимости коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от величины постоянного поля смещения .....	117
	Приложение Г – Испытание ближнепольной магнитной системы связи с приемной антенной на основе широкополосного магнитометра слабых магнитных полей.....	119
	Приложение Д – Исследование спектров ферромагнитного резонанса используемых в датчиках тонких магнитных пленок .....	123
	Приложение Е – Исследование характеристик чувствительного элемента датчика резонансным методом с использованием СВЧ-генератора .....	125
	Приложение Ж – Исследование характеристик чувствительного элемента датчика резонансным методом с использованием векторного анализатора цепей .....	127
	Приложение И – Исследование характеристик чувствительного элемента датчика при различных частотах поля возбуждения .....	131
	Приложение К – Исследование спектров поглощения высокочастотной энергии используемыми в датчиках тонкими магнитными пленками .....	133
	Приложение Л – Исследование влияния угла поворота пленки в резонаторе на параметры чувствительного элемента датчика .....	137
	Приложение М – Исследование магнитных спектров используемых в датчиках тонких магнитных пленок .....	139
	Приложение Н – Исследование влияния количества слоев и химического состава пленок на коэффициент преобразования чувствительного элемента.....	142

## Введение

**Актуальность темы диссертационного исследования.** Высокочувствительные датчики слабых магнитных полей и магнитометры на их основе находят широкое применение при решении многих научно-технических задач [1–5]. В зависимости от сферы применения к современным магнитометрам предъявляется ряд требований, например: к линейности и долговременной стабильности параметров; к большому динамическому диапазону и низкому уровню собственных шумов; к широкому частотному диапазону; к простоте конструкции, надежности при малой стоимости; к стойкости к внешним воздействующим факторам; к габаритам и массе и др. Создание универсального магнитометрического устройства, одновременно удовлетворяющего предельным требованиям по каждому параметру – задача практически нереализуемая. Поэтому на сегодняшний день для решения конкретных узкоспециализированных задач разработаны десятки типов магнитоизмерительных преобразователей, работающих на различных физических принципах.

Для решения ряда задач требуются магнитометры, работающие в широкой полосе частот (от десятков миллигерц до сотен килогерц), обладающие при этом высокой чувствительностью. Например, при поиске и разведке рудных месторождений, прогнозировании месторождений углеводородов, а также при решении различных задач инженерной геологии, гидрогеологии и археологии используется один из высокоинформативных методов электромагнитной разведки – метод переходных процессов [6–8]. При использовании данного метода производят измерение динамики неустановившегося электромагнитного поля, являющегося откликом на искусственно созданное импульсное электромагнитное воздействие. Для повышения информативности метода требуется измерение вектора магнитного поля во многих точках исследуемой области. Поэтому магнитометр для таких исследований должен быть компактным, обладать малым энергопотреблением и быть сравнительно дешевым.

Таким образом, актуальной является задача создания магнитометра, способного работать в широкой полосе частот с низким уровнем собственных шумов, малыми габаритами и массой, низким энергопотреблением и невысокой стоимостью. В полной мере указанным требованиям удовлетворяет разработанный и исследованный в настоящей работе широкополосный магнитометр слабых магнитных полей и векторный магнитометр на его основе, чувствительным датчиком в которых является микрополосковый резонатор (МПП) с тонкой магнитной пленкой (ТМП).

Перспективным направлением разработки систем связи специального назначения является проектирование ближнепольных магнитных систем связи [9–18]. В этих системах для



передачи цифровой информации используется переменное магнитное поле с частотами от единиц до сотен килогерц, что позволяет обеспечить связь с подземными и подводными объектами в случаях, когда традиционные системы связи на основе электромагнитных волн не эффективны. Приемной антенной ближнепольной системы связи является магнитометр, причем в простейшем случае может использоваться магнитная рамочная антенна – индукционный магнитометр. Однако эффективная работа ближнепольных систем связи возможна только на низких частотах, что затрудняет создание высокочувствительных широкополосных индукционных магнитометров с приемлемыми габаритами и массой. Кроме этого, магнитные рамочные антенны чувствительны к электрической составляющей электромагнитного поля, что отрицательно сказывается на помехоустойчивости систем связи, особенно при работе в условиях городского электромагнитного шума и промышленных помех. Разработанный и исследованный в данной работе векторный магнитометр хорошо подходит в качестве приемной антенны для решения задач ближнепольной магнитной связи.

Помимо перечисленных выше и подробно рассмотренных в тексте диссертационной работы областей применения магнитометров существует множество других задач, при решении которых они также могут быть эффективны [19, 20]. В частности, бесконтактное измерение тока [21, 22]; магнитные системы локации и навигационно-измерительные системы [24–27]; геофизические измерения [6–8]; биомагнитные измерения [28–30]; системы связи (использование в качестве магнитной антенны) [31–35]; различные системы безопасности [36, 37]; магнитные измерительные решетки для визуализации структуры магнитных полей рассеяния [38, 39] и др. Таким образом, актуальность работы определяется также необходимостью создания и исследования новых специализированных конструкций высокочувствительных магнитометров для самых различных применений.

Чувствительным элементом разработанного датчика является тонкая магнитная пленка, от параметров которой зависят характеристики магнитометра. В частности, от неоднородностей магнитных характеристик и характера их распределения по площади тонкопленочных образцов [40], связанных с несовершенством технологии изготовления ТМП [41–44]. Одним из самых информативных методов для измерения основных магнитных параметров ТМП, в том числе необходимых при отработке технологии их получения, является метод ферромагнитного резонанса (ФМР), реализованный в сканирующем спектрометре ФМР [45, 46]. Точность измерения магнитных параметров пленок в этом спектрометре определяется характеристиками сверхвысокочастотной (СВЧ) головки, поэтому задача увеличения ее чувствительности является актуальной, как и задача создания автоматизированного комплекса для измерения

интегральных магнитных характеристик тонкопленочных образцов при исследовании разрабатываемых магнитометров.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование новой конструкции широкополосного магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Анализ существующих средств измерений параметров магнитного поля, в том числе использующих в конструкциях датчиков тонкие магнитные пленки в качестве чувствительного элемента.

2. Разработка новой конструкции широкополосного магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой, удовлетворяющего следующим требованиям: полоса рабочих частот от  $10^{-2}$  до  $10^6$  Гц; уровень собственных шумов не более  $10^{-11}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> на частоте 1 Гц, менее  $2 \cdot 10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> на частотах более  $10^4$  Гц.

3. Создание автоматизированного комплекса и разработка экспериментальных методик для измерения интегральных магнитных характеристик ТМП, используемых в датчиках, а также создание автоматизированного комплекса для измерения характеристик разрабатываемых магнитометров.

4. Разработка новой конструкции высокочувствительной измерительной СВЧ-головки сканирующего спектрометра ФМР, используемого для измерения распределения неоднородностей магнитных параметров по площади тонкопленочных образцов.

5. Проведение лабораторных и полевых испытаний магнитометров на основе разработанной конструкции датчика слабых магнитных полей в задачах геофизики и ближнепольной магнитной связи.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы:

1. Разработана и исследована новая конструкция магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой, обладающей одноосной магнитной анизотропией, содержащего СВЧ-генератор, амплитудный детектор и систему формирования постоянного магнитного поля смещения. Конструкция отличается от известных решений ориентацией магнитных полей: высокочастотное поле возбуждения направлено вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) магнитной пленки, а постоянное поле смещения направлено под небольшим оптимальным углом к ОТН, при этом направление максимума

чувствительности датчика к измеряемому полю примерно совпадает с осью легкого намагничивания (ОЛН) ТМП.

2. Создан автоматизированный измерительный комплекс и разработаны методики, позволяющие проводить измерение интегральных характеристик ТМП, а также характеристик датчиков на их основе. Разработанный комплекс отличается возможностью формирования произвольной ориентации постоянных и переменных магнитных полей и позволяет в автоматическом режиме измерять с необходимой точностью как характеристики ТМП, так и характеристики датчиков слабых магнитных полей. В автоматизированном комплексе реализованы резонансные и нерезонансные методики измерений с использованием СВЧ-генератора для создания поля возбуждения и измерения частотных зависимостей коэффициентов отражения и передачи (S-параметров).

3. Разработана новая конструкция СВЧ-головки сканирующего спектрометра ФМР, которая состоит из чувствительного элемента, выполненного в виде миниатюрного резонатора с измерительным отверстием и подключенного к СВЧ-генератору, а также амплитудного детектора, размещенных в немагнитном корпусе с разъемом. Отличительной особенностью конструкции является резонатор, образованный нерегулярными отрезками полосковых линий, расположенными на одной печатной плате с элементами генератора и амплитудного детектора. Отрезок полосковой линии с измерительным отверстием в экране располагается в профрезерованном пазу или на внутреннем слое многослойной печатной платы.

#### **Практическая значимость результатов диссертационной работы:**

1. Разработанный датчик является универсальным магнитометрическим устройством и может использоваться при решении широкого круга научно-технических и исследовательских задач, например, при реализации различных методов электромагнитных геофизических исследований, в системах магнитной связи в качестве широкополосной антенны, в военных целях, в медицине и в охранной сигнализации. Разработанный датчик имеет малые массу и габариты, является простым и сравнительно дешевым при серийном производстве, при этом он обладает чувствительностью, превышающей более чем на порядок чувствительность известных конструкций датчиков на ТМП. Уровень собственных шумов датчика на частоте 1 Гц составляет  $10^{-11}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>; на частотах более  $10^2$  Гц чувствительность датчика превышает чувствительность лучших феррозондовых преобразователей, а на частотах выше  $10^4$  Гц, вплоть до частоты до  $10^6$  Гц, уровень шумов снижается до  $10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>.

2. Разработанный автоматизированный измерительный комплекс позволяет значительно ускорить процесс проведения измерений характеристик ТМП и характеристик чувствительных

элементов датчиков. С использованием комплекса удастся проводить исследования с большим числом измерений порядка  $10^8$ , что практически невозможно в режиме ручных измерений.

3. Чувствительность разработанной конструкции СВЧ-головки для сканирующего спектрометра ФМР увеличена на 20 дБ, что дает возможность проводить измерения без накопления сигнала на локальных участках ТМП толщиной менее  $100 \text{ \AA}$ , значительно сокращая время проведения измерений. Конструкция головки проста в изготовлении и настройке, что позволило изготовить более 100 СВЧ-головок, перекрывающих с малым шагом широкий диапазон частот от 0,1 до 6,0 ГГц.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработанная конструкция магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой, работающего в диапазоне частот  $10^2$ – $10^6$  Гц и в диапазоне полей  $10^{-13}$ – $10^{-4}$  Тл. Уровень собственных шумов магнитометрического преобразователя на частоте 1 Гц составляет  $10^{-11}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>, а на частотах от  $10^4$  до  $10^6$  Гц не превышает  $2 \cdot 10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>.

2. Автоматизированный измерительный комплекс, предназначенный для измерений основных магнитных характеристик (эффективная намагниченность насыщения, величина и направление поля одноосной магнитной анизотропии) тонкопленочных образцов, используемых в чувствительных элементах датчиков, а также для измерения характеристик датчиков слабых магнитных полей.

3. Резонансная и нерезонансная методики измерения интегральных магнитных характеристик ТМП с использованием новой конструкции микрополоскового преобразователя. Разработанные методики дают возможность измерения магнитных характеристик тонкопленочных образцов и коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика.

4. СВЧ-головка новой конструкции для локального спектрометра ФМР, которая обладает чувствительностью, позволяющей измерять магнитные параметры локальных участков площадью  $0,8 \text{ мм}^2$  тонкопленочного образца толщиной  $100 \text{ \AA}$  без накопления сигнала. Разработанная конструкция головки перекрывает частотный диапазон от 0,1 до 6,0 ГГц.

**Использование результатов диссертации.** Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

– Проект по теме «Разработка радиофизических методов диагностики тонкопленочных магнитных материалов – активных сред электрически управляемых устройств СВЧ-электроники». Государственное задание №3.528.2014К (2014–2016 гг.).

– Прикладные научные исследования по теме «Разработка и изготовление широкополосной активной магнитной антенны для систем ближнепольной магнитной связи». Уникальный идентификатор работ RFMEFI60417X0179 (2017–2019 гг.).

– Проект по теме «Исследование возможности создания систем ближнепольной магнитной связи с использованием приемников на микрополосковых структурах с тонкими магнитными пленками». Государственное задание №3.1031.2017/ПЧ (2017–2019 гг.).

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены и обсуждались на конференциях: Третья всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации», Россия, г. Красноярск, 2016 г. Двенадцатая всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления», Россия, п. Домбай, 2017 г. Четвертая всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации», Россия, г. Красноярск, 2017 г. Тринадцатая международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Россия, г. Томск, 2017 г. Международная конференция «IEEE Sensors-2017», Великобритания, г. Глазго, 2017 г. Двенадцатая международная конференция «European Magnetic Sensors and Actuators», Греция, г. Афины, 2018 г.

**Публикации по теме работы.** Всего по теме работы опубликовано 28 работ, из них: опубликовано в журналах из перечня ВАК, индексируются базами WoS, Scopus – 7 статей; получено патентов РФ – 5 шт.; зарегистрировано программ ЭВМ – 6 шт.

**Личный вклад автора.** Все представленные в работе результаты получены лично автором или при непосредственном его участии: автор разработал и исследовал новую конструкцию широкополосного магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой; разработал автоматизированный измерительный комплекс, методики измерений интегральных характеристик ТМП и чувствительных элементов датчиков; разработал новую конструкцию СВЧ-головки для сканирующего спектрометра ФМР; исследовал различные варианты применения разработанного магнитометра, в частности, разработал аппаратуру ближнепольной магнитной связи и провел ее испытания в воздушной среде, в пресном водоеме, в морской воде, провел испытания разработанного для геофизических исследований магнитометра.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием сертифицированного и поверенного оборудования, воспроизводимостью результатов измерений при использовании различных приборов и методов измерений, а также совпадением экспериментальных результатов с результатами теоретических расчетов.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 12 приложений. Общий объем диссертации – 143 страницы, включая 81 рисунок и 6 таблиц. Список литературы содержит 120 наименований.

*Первая глава* диссертационной работы представляет собой обзор датчиков магнитных полей, построенных на основе различных физических явлений и эффектов. Задачей главы является классификация различных магнитометрических преобразователей с целью определения места в классификации для разработанных и исследованных в данной работе магнитометров на основе микрополоскового резонатора с ТМП. Приводятся сравнительные характеристики основных магнитометрических преобразователей (классических: магнитомеханических, индукционных, гальваномагнитных, магнитооптических; квантовых: электронно-, ядерно-, атомно-прецессионных, на эффекте Джозефсона, SERF-магнитометров), указываются ближайшие функциональные аналоги исследуемых в данной работе магнитометров. Отдельно рассматриваются различные типы датчиков на магнитных пленках, указываются отличительные особенности разработанных магнитометров, приводятся сравнительные характеристики. Описываются существенные отличия исследуемого в диссертационной работе магнитометра от известных образцов. Также в первой главе рассматриваются методы измерения магнитных характеристик чувствительных элементов датчиков – тонких магнитных пленок.

*Вторая глава* посвящена описанию разработанных и исследованных конструкций магнитометров и градиентометров. Описывается конструкция нового магнитометра на основе микрополоскового резонатора с ТМП, отличительной особенностью которого является ориентация магнитных полей чувствительного элемента: высокочастотное поле возбуждения направлено вдоль ОТН; постоянное поле смещения направлено под небольшим оптимальным углом к ОТН; максимум чувствительности направлен примерно вдоль ОЛН. Принцип работы датчика отличается от известных образцов: измеряемое поле приводит к изменению условий возбуждения ФМР в ТМП, что изменяет добротность резонатора чувствительного элемента и регистрируется амплитудным детектором. Рассматривается конструкция нового магнитометра, содержащего два резонатора с пленками. Отличительной особенностью такой конструкции

является включение резонаторов, позволяющее компенсировать на суммирующем элементе амплитудные шумы СВЧ-генератора возбуждения и удваивать полезный сигнал. Дается описание новой конструкции модуляционного датчика, предназначенного для измерения сигналов с постоянной составляющей. Датчик содержит генератор модулирующего сигнала, синхронный детектор. Описываются конструкции градиентометров на основе тонкопленочных датчиков. Приводится описание математической модели микрополоскового датчика на ТМП, отражены результаты численного моделирования датчика. Результаты теоретических расчетов сопоставляются с экспериментальными измерениями. Дается подробное описание характеристик разработанных магнитометров, приводятся результаты измерения их параметров. Рассматриваются варианты возможного применения разработанных магнитометров.

*Третья глава* содержит описание разработанного автоматизированного комплекса, предназначенного для проведения измерений магнитных характеристик ТМП и характеристик чувствительных элементов магнитометров. Приводится описание разработанных методик измерения параметров ТМП, подробно описываются требования к составу оборудования измерительного комплекса. Отличительной особенностью автоматизированного комплекса является возможность формирования произвольной ориентации магнитных полей, в том числе соответствующей направлениям полей в чувствительных элементах датчиков. Процесс измерений полностью автоматизирован и определяется на программном уровне. Приводятся результаты измерений параметров чувствительных элементов датчиков с использованием автоматизированного комплекса.

*Четвертая глава* содержит описание новой конструкции СВЧ-головки локального спектрометра ФМР. Конструкция СВЧ-головки оптимизирована с точки зрения упрощения серийного изготовления и настройки. Разработана серия СВЧ-головок, перекрывающая широкий частотный диапазон. В том числе разработаны СВЧ-головки, позволяющие проводить измерения параметров ТМП на рабочих частотах чувствительных элементов магнитометров на основе микрополоскового резонатора с ТМП. Значительно повышена чувствительность головки, что дает возможность проведения измерений характеристик тонких пленок без накопления сигнала и позволяет существенно повысить локальность измерений. Приводятся результаты измерения отношения сигнал/шум для образца ТМП толщиной 500 Å.

В приложениях А–В и приложениях Д–Н приведены результаты измерений параметров чувствительных элементов разработанных датчиков. В приложении Г отражены результаты испытаний ближнепольной системы магнитной связи с использованием разработанного магнитометра.

## 1 Обзор датчиков магнитных полей

Задачей данной главы является краткий обзор известных и наиболее распространенных устройств для измерения параметров магнитного поля и определение места в классификации для разработанных магнитометров.

Датчики магнитных полей широко используются в современном мире [1–5, 19, 20], ниже приведены некоторые примеры их использования:

– В магниторазведке – для изучения распределения в пространстве геомагнитного поля. Результаты измерений могут быть использованы при решении целого ряда задач [6–8]: геотектоническое районирование, прослеживание тектонических нарушений; выделение и оконтуривание горных пород, определение глубины их залегания; поиск и разведка магнитных руд; поиск и разведка немагнитных полезных ископаемых, залегающих среди магнитных пород; археологические исследования и др.

– В биологии и медицине [28–30], например, для регистрации слабых магнитных полей, создаваемых сердцем, активностью мозга и т. д., при этом величина регистрируемых полей не превышает  $10^{-9}$  Тл, что требует использования высокочувствительных магнитометров, например, СКВИД (сверхпроводящий квантовый интерферометр) [47–49] или SERF (оптический магнитометр, свободный от спин-обменного уширения) [50, 51].

– В системах навигации [23–27] – в простейшем, наиболее известном случае – измерение направлений на магнитные полюса Земли. Навигация в пространстве может осуществляться как по естественному (геомагнитному) полю, так и по искусственно сформированному: системы навигации проходческих комплексов, буровых установок, шахтные навигационные системы, системы навигации космических аппаратов и др.

– В охранных системах и системах специального назначения [36, 37], где магнитометрические устройства позволяют детектировать массивные магнитные предметы – автомобили и другую наземную технику, надводные и подводные корабли, элементы оружия и т. д.

– В системах визуализации магнитного поля (системы «магнитного зрения») [38, 39], позволяющих отобразить распределение параметров магнитного поля в двух- и трехмерном пространстве, что может быть использовано как в научных и образовательных целях, так и в прикладных – например, в дефектоскопии.

За последний период времени возможности устройств для измерения параметров магнитного поля возросли на многие порядки. Более трех десятилетий, с момента изобретения в 1964 году и до появления SERF-магнитометра, самым чувствительным магнитометрическим



преобразователем оставался СКВИД-магнитометр (сверхпроводящий квантовый интерферометр) [47]. Чувствительность СКВИД-магнитометров ограничена на уровне  $\sim 10^{-15}$  Тл, а максимальная величина измеряемого поля – более 1 Тл. Чувствительность SERF-магнитометра (магнитометр, свободный от спин-обменного уширения) равна  $\sim 10^{-15}$  Тл, теоретический предел чувствительности ограничен шумами, вызванными спин-разрушающими столкновениями, и ограничен на уровне  $10^{-17}$  Тл / Гц<sup>1/2</sup> [50]. SERF-магнитометр работает при комнатной температуре и может быть использован для измерений исключительно слабых полей – менее  $10^{-6}$  Тл.

Не утратили актуальности пассивные магнитометрические преобразователи – измерительные катушки. Изменением параметров измерительной рамки достаточно просто удастся создать высокочувствительные магнитометры, работающие от  $10^{-3}$  Гц, обладающие большим динамическим диапазоном и высокой линейностью [52–57].

### 1.1 Классификация магнитометрических преобразователей

Разнообразие различных физических явлений и эффектов, используемых при построении датчиков магнитного поля, а также большое число веществ, выступающих в роли активной среды датчика, привели к появлению десятков разнообразных типов магнитометров [58–63]. Число различных типов магнитометров в современной измерительной технике велико, поэтому далее будут рассмотрены только широко используемые магнитометры, а также устройства с рекордными параметрами, например, СКВИД и SERF-магнитометр.

Магнитометрические преобразователи можно условно разделить на два класса [5]: *классические* и *квантовые*. Основой работы классических магнитометров являются законы классической физики. Наиболее известными представителями этого класса являются магнитомеханические преобразователи, в простейшем случае содержащие постоянный магнит, взаимодействующий с магнитным полем – магнитный компас. Чувствительным элементом квантовых преобразователей является вещество, поглощающее или излучающее электромагнитную энергию на некоторой частоте, зависящей от значения измеряемого параметра поля. В основе работы квантовых преобразователей лежат законы квантовой механики, поэтому в уравнения преобразования датчиков входят фундаментальные физические постоянные, что обеспечивает высокую долговременную стабильность их параметров, наименьшую систематическую и случайную погрешность измерений. Как правило, выходной сигнал чувствительного элемента квантового магнитометра промодулирован по частоте, измерение которой дает возможность получения информации о магнитной индукции.

*Механические* датчики магнитного поля в качестве чувствительного элемента содержат магниты или контуры с током [5]. Пассивные механические преобразователи в виде свободно вращающихся стрелок используются для определения направления вектора магнитной индукции, активные преобразователи позволяют измерить амплитуду магнитной индукции по периоду колебаний стрелки в магнитном поле. Главным достоинством механических преобразователей является возможность измерения абсолютного значения магнитной индукции (впервые данный метод был предложен Гауссом). Основным применением механических датчиков являются геомагнитные измерения, например, в качестве вариометров – устройств, регистрирующих вариации элементов естественного поля Земли. На сегодняшний день механические датчики устарели и практически полностью вытеснены другими типами магнитометрических преобразователей.

*Индукционные* преобразователи разделяются на пассивные и активные [1–5, 52]. Пассивные индукционные преобразователи представляют собой измерительную катушку, которая реагирует на скорость изменения внешнего поля. Отсутствие возможности измерения постоянных полей для некоторых применений является существенным недостатком данного типа преобразователей. Однако в ряде случаев применение индукционных преобразователей позволяет автоматически избавиться от постоянного геомагнитного поля, которое нередко мешает проведению измерений. Чувствительность пассивного преобразователя растет с частотой изменения индукции магнитного поля. Повышение чувствительности преобразователя достигается увеличением площади рамки и числа витков, что в свою очередь приводит к резкому увеличению активного и индуктивного сопротивлений, увеличению паразитной емкости и в итоге снижает верхнюю рабочую частоту. Использование сердечников из высокопроницаемых материалов дает возможность значительно повысить чувствительность пассивного индукционного преобразователя, но вместе с тем приводит к значительному ухудшению других параметров магнитометра – снижаются линейность и температурная стабильность, появляется зависимость параметров от внешних постоянных магнитных полей. Несмотря на то, что пассивные индукционные преобразователи являются одним из старейших типов магнитометров, они до сих пор не утратили своей популярности в силу простоты конструкции, высокой чувствительности, широкой полосы частот, большого динамического диапазона, простого обслуживания и малой стоимости [52–57].

Наиболее распространенным магнитометром в практике измерений постоянного геомагнитного поля является активный индукционный преобразователь – *феррозондовый* магнитометр (ферроиндукционный преобразователь с магнитным возбуждением) [64, 65]. В простейшем случае преобразователь содержит ферромагнитный сердечник с двумя катушками:

катушкой возбуждения и измерительной катушкой. При отсутствии внешнего поля перемагничивание сердечника обмоткой возбуждения происходит по симметричному циклу, а при воздействии внешнего измеряемого поля кривая перемагничивания становится несимметричной – в спектре сигнала происходит изменение гармонических составляющих, амплитуда которых фиксируется схемой синхронного детектирования. Сложностью при изготовлении феррозондовых преобразователей является производство высококачественного ферромагнитного сердечника – основы для создания преобразователя с низким уровнем шумов. Кроме того, низкая частота возбуждения ограничивает диапазон измеряемых частот (верхняя граничная частота коммерчески доступных устройств, как правило, менее  $10^4$  Гц) [66].

*Гальваномагнитные* преобразователи используют физические явления, возникающие при воздействии магнитного поля на движущийся заряд. В основе гальваномагнитных датчиков лежат эффекты: Холла, магнетосопротивления, Нернста и Эттингсгаузена. На сегодняшний день гальваномагнитные преобразователи являются наиболее распространенными – занимаемая часть рынка магнитометрических преобразователей в денежном выражении превышает 90% [59]. Наибольшее распространение получили датчики на основе эффекта Холла (появление поперечной разности потенциалов на краях проводящей пластины, помещенной в магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции, обязательным условием является протекание по пластине электрического тока), занимающие более 75% рынка магнитометрических преобразователей [59]. Датчики Холла являются миниатюрными малопотребляющими магнитометрическими устройствами, выпускаемыми промышленностью в различном виде: микросхемы с аналоговым выходом, позволяющие регистрировать амплитуду магнитного поля в аналоговом виде; цифровые (импульсные) микросхемы, реагирующие на фиксированное значение амплитуды магнитного поля и используемые в автоматических системах управления с релейным регулированием; микросхемы с многокомпонентным датчиком, системой аналого-цифрового преобразования и цифровой обработкой сигналов. Преобразователи на основе эффекта Холла работают в широком диапазоне частот, позволяя измерять величину постоянной составляющей магнитного поля и высокочастотные составляющие на частотах до  $10^7$  Гц. Чувствительность серийно выпускаемых датчиков Холла ограничена на уровне  $10^{-7}$  Тл, датчики широко применяются для регистрации сильных и сверхсильных полей – с амплитудой более 10 Тл [67].

*Магниторезистивные* датчики представлены классом устройств, в основе которых лежит магниторезистивный эффект – изменение электрического сопротивления материала при воздействии магнитного поля [68–70]. Классифицируют магниторезистивные датчики по характеру изменения сопротивления: отрицательное магнетосопротивление; анизотропное

магнетосопротивление; гигантское магнетосопротивление; колоссальное магнетосопротивление; туннельное магнетосопротивление. Наибольшее распространение получили датчики на основе анизотропного и гигантского магнетосопротивления, при изготовлении которых используются достаточно простые для массового изготовления технологии напыления тонких ферромагнитных пленок. Изменение сопротивления регистрируется мостовыми измерительными схемами. Низкая стоимость магниторезистивных датчиков при высокой чувствительности и широкой полосе частот, возможности измерения сильных полей (более 10 Тл) при простоте измерительной аппаратуры обуславливают преобразователям второе место по объемам продаж после датчиков Холла [59].

*Магнитооптические* датчики магнитного поля могут быть построены на основе эффекта Фарадея, эффекта Керра и магнитострикционных эффектов. Широкое распространение получили магнитометрические преобразователи на основе эффекта Фарадея (вращение плоскости поляризации света при прохождении через вещество в магнитном поле) в оптических волокнах. Отличительными особенностями датчиков на этом эффекте являются механическая и кондуктивная развязка измерительного преобразователя от остальной части прибора; широкий диапазон рабочих температур; высокая линейность [71–74].

Квантовые приборы с *оптической накачкой* содержат в качестве рабочего вещества пары щелочных металлов, атомы которых имеют один валентный электрон, и метастабильный гелий (ортогелий), спины двух электронов атомов которого параллельны и направлены в одну сторону [71, 75]. Оптическая накачка заключается в создании разной заселенности подуровней основного состояния ансамбля путем облучения их светом определенной длины волны. Например, для проведения измерений модуля вектора индукции магнитного поля Земли при поиске и разведке полезных ископаемых, а также при проведении инженерных изысканий и археологических работ широко используются квантовые магнитоизмерительные преобразователи, где в качестве активного элемента используются пары нерадиоактивного цезия-133. Конструктивно магнитометр состоит из двух частей – квантового оптического блока и электронного блока. Термостатированный квантовый оптический блок содержит эллипсоидный отражатель, внутри которого размещаются: лампа накачки, наполненная парами цезия-133, которые возбуждаются высокочастотным полем индуктора; три камеры поглощения с круговыми поляризаторами и катушками, наполненные парами цезия-133; фотодетектор, регистрирующий изменения прозрачности камер поглощения. Электронный блок содержит: элементы термоавтоматики; генератор возбуждения лампы накачки с петлей автоматической регулировки уровня мощности; элементы генератора, замыкающие катушки камер поглощения и фотодетектор в контур с положительной обратной связью. Частота колебаний генератора

измеряется с помощью частотомера и соответствует модулю измеряемой магнитной индукции. Частоты диапазона 70–349 кГц соответствуют магнитной индукции 20–100 мкТл. Главное достоинство квантовых магнитоизмерительных преобразователей с оптической накачкой заключается в возможности измерения величины модуля постоянного магнитного поля с высокой точностью: среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей погрешности серийно выпускаемых приборов не превышает  $10^{-11}$  Тл при систематической составляющей не более  $\pm 10^{-8}$  Тл. К недостаткам следует отнести относительно высокую сложность и стоимость приборов, чувствительность к механическим воздействиям, необходимость в ориентации чувствительного элемента в пространстве, низкую частоту измерений – не более 10 Гц.

*Протонные* магнитометры относят к квантовым приборам дискретного действия, основанным на свободной ядерной прецессии [1–5, 76]. Измерение магнитной индукции сводится к измерению частоты спиновой прецессии, которая линейно зависит от величины измеряемого поля. Особенностью протонных магнитометрических приборов является дискретный характер измерений, не позволяющий получать измерения с частотой более 5 Гц. Протонные магнитометры широко используются при проведении геофизических измерений благодаря следующим достоинствам: стойкость к механическим вибрациям; стабильная работа при изменении условий окружающей среды; отсутствие необходимости точной ориентации измерительного преобразователя в пространстве; высокая точность измерений и малый дрейф нулевого значения. К недостаткам протонных магнитометров, помимо низкой частоты измерений, относят нестабильную работу при наличии градиента магнитного поля.

В магнитометрах на эффекте *Оверхаузера* для создания ядерной намагниченности применяют динамическую поляризацию ядер, получаемую путем наложения переменного поля с частотой прецессии электронов на образец [77]. В качестве образца используют вещества, содержащие частицы с ядерными и электронным магнитными моментами. Эффект Оверхаузера заключается в увеличении интенсивности ядерного магнитного резонанса при насыщении электронного парамагнитного резонанса, что приводит к намагниченности, примерно в 500 раз большей статической ядерной намагниченности. Достоинствами метода динамической поляризации являются возможности увеличения частоты измерений и проведения измерений одновременно с процессом поляризации рабочего вещества. Существенным недостатком магнитометров на эффекте Оверхаузера может являться требование к периодической замене рабочего вещества.

*СКВИД*-магнитометры (SQUID, СКИ – сверхпроводящий квантовый интерферометр) относят к классу квантовых измерителей магнитного поля, работающих на явлении

сверхпроводимости. В основе работы квантовых интерферометров лежит совокупность эффектов, которая была теоретически предсказана английским физиком Б. Джозефсоном, и явление квантования магнитного потока [47]. С момента изобретения в 1964 г. и до появления в 2003 г. SERF-магнитометра СКВИД обладал наиболее высокой чувствительностью среди магнитоизмерительных преобразователей всех типов – на уровне  $10^{-13}$ – $10^{-15}$  Тл. СКВИД-магнитометр широко используется при проведении лабораторных исследований различного рода. Существенными недостатками магнитометров данного типа являются: высокая стоимость; большие габаритные размеры и масса; требование поддержания низких температур. На сегодняшний день отсутствуют доступные серийные приборы, пригодные, например, для масштабных полевых геофизических измерений.

*SERF-магнитометр* (магнитометр, свободный от спин-обменного уширения) имеет рекордную чувствительность на сегодняшний день –  $\sim 10^{-15}$  Тл, теоретический предел которой ограничен спин-разрушающими столкновениями на уровне  $10^{-17}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> [50, 51]. Отличительной особенностью в сравнении с высокочувствительным СКВИД-магнитометром является работа при комнатных температурах. Магнитометр является оптическим прибором, рабочее вещество которого заполняет колбу, просвечиваемую лазером. Результат измерений определяется по интенсивности поглощения лазерного излучения. Существенным недостатком прибора является ограничение диапазона измеряемых полей, для работы магнитометра требуется подавление внешних магнитных полей и их градиентов до уровня не более  $10^{-6}$  Тл.

В основе разработанных и исследуемых в данной работе *магнитометров на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой* лежит явление ферромагнитного резонанса (ФМР). Датчики, работающие непосредственно на явлении ФМР, относят к квантовым преобразователям [5], однако при работе датчиков на основе микрополоскового резонатора с ТМП непосредственно параметры ФМР не регистрируются. Поглощение СВЧ-энергии пленкой при ФМР влияет на параметры резонансной системы датчика, что и регистрируется измерительной системой. Долговременная стабильность параметров датчиков не обеспечивается постоянством фундаментальных физических констант, поэтому они относятся к классическим устройствам.

На рисунке 1.1 показаны некоторые типы широко применяемых магнитоизмерительных преобразователей с указанием чувствительности, диапазона измеряемых полей и диапазона частот.

Исследуемые в данной работе магнитометры и градиентометры на их основе характеризуются широким диапазоном частот и низкими шумами на высоких частотах. Например, уровень собственных шумов на частотах более  $10^3$  Гц не превышает  $10^{-12}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>

[78–84], что позволяет использовать их в качестве миниатюрных датчиков переменного магнитного поля. При измерениях параметров постоянного магнитного поля тонкопленочные датчики сравнимы с феррозондовыми преобразователями, обеспечивая чувствительность не хуже  $10^{-10}$  Тл. На частотах более  $10^4$  Гц целесообразно применять индукционные датчики, так как их чувствительность растет с увеличением частоты и может превышать чувствительность СКВИД-магнитометров [52]. Однако отличительной особенностью датчиков на основе микрополоскового резонатора с ТМП является возможность измерения параметров магнитного поля в полосе частот от постоянной составляющей до  $10^5$ – $10^8$  Гц, что особенно актуально при проведении широкополосных импульсных измерений (например, при проведении геофизических измерений – зондировании методом становления поля, требуемый диапазон частот от  $10^{-2}$  до  $10^5$  Гц [85]).

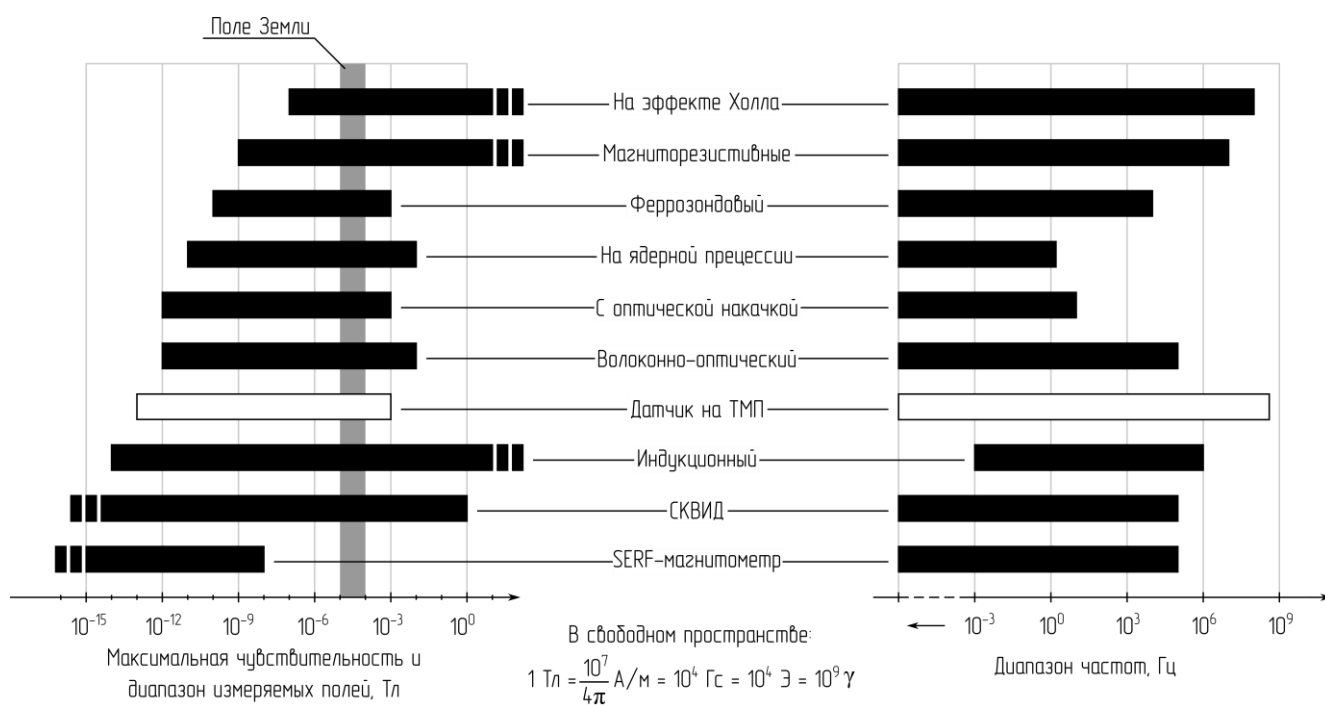


Рисунок 1.1 – Сравнительные характеристики магнитометрических преобразователей

Таким образом, ближайшим функциональным аналогом датчиков на ТМП при проведении измерений параметров постоянного магнитного поля являются феррозондовые магнитометры; при измерении параметров переменных магнитных полей – индукционные магнитометры. Отличительной особенностью магнитометрических преобразователей на ТМП является возможность проведения измерений в широкой полосе частот: в низкочастотной области – от постоянной составляющей (как феррозондовые преобразователи); в

высокочастотной области – до частот  $10^5$ – $10^9$  Гц. Ближайшим типом магнитометров, имеющих сравнимо широкую полосу частот, являются датчики на основе эффекта Холла, однако они обладают значительно меньшей чувствительностью.

## 1.2 Магнитометрические преобразователи на тонких магнитных пленках

Классификация различных типов магнитометров на ТМП может быть проведена на основе ориентации полей относительно осей магнитной анизотропии ТМП. Как правило, в качестве чувствительного элемента датчика используются ТМП нестрикционного состава пермаллоя  $Ni_{80}Fe_{20}$  толщиной  $10^2$ – $10^4$  Å. В таблицах 1.1 и 1.2 приведены различные типы датчиков на ТМП и их сравнительные характеристики [86]. В таблице 1.1 указаны:  $H_{изм}$  – измеряемое поле;  $H_{см}$  – постоянное поле смещения;  $H_{мод}$  – поле модуляции;  $H_{Вч}$  – высокочастотное поле возбуждения; выход – ориентация катушки съема выходного сигнала (при ее наличии); ОЛН – поле направлено вдоль оси легкого намагничивания; ОТН – поле направлено вдоль оси трудного намагничивания.

Последний тип магнитометров на ТМП в таблице 1.1 является объектом данного диссертационного исследования. В таблице указана ориентация полей в датчике, при которой на практике удастся получить наибольший коэффициент преобразования магнитометра (тип *а*). В зависимости от требований к магнитометрическому преобразователю схема построения может включать схему модуляции и синхронного детектирования, что позволяет повысить долговременную стабильность датчика (тип *б*).

Сравнительные характеристики различных типов магнитометров на ТМП приведены в таблице 1.2: чувствительность, как правило, определяемая уровнем собственных шумов преобразователя; коэффициент преобразования; энергетическая эффективность (потребление преобразователя, отнесенное к единицам измерения напряженности поля); частоты возбуждения ТМП; относительная сложность изготовления прибора; чувствительность к полю, ортогональному поверхности ТМП –  $\perp H$ ; диапазон частот поля  $H_{изм}$ ; амплитуда поля возбуждения  $H_{Вч}$  относительно величины  $H_k$ .



Таблица 1.1 – Классификация магнитометров на ТМП

Тип	Направление $H_{изм}$	Направление $H_{см}$	Направление $H_{мод}$	Направление $H_{вч}$	Выходной сигнал, вдоль
<b>Магнитометры согласно классификации [86]</b>					
<b>I</b>	ОЛН	–	ОЛН	ОТН	ОЛН
<b>II</b>	ОТН	–	–	ОЛН	ОТН
<b>III</b>	ОЛН	ОТН	ОЛН	ОЛН	ОТН
<b>IV</b>	ОЛН	ОЛН	–	ОТН	ОТН
<b>V</b>	ОТН	ОТН	–	ОЛН	ОЛН
<b>VI</b>	ОТН	–	–	ОЛН	ОТН
<b>Исследуемые в диссертационной работе магнитометры на ТМП: <math>a</math> – без модуляции; <math>b</math> – модуляционный</b>					
$a$	~ОЛН	~ОТН	–	ОТН	
$b$	ОЛН	ОТН	ОЛН	ОТН	

Конструкция исторически первого магнитометрического преобразователя на основе ТМП (тип I в таблице 1.2) подразумевала возбуждение образца полем  $H_{вч} > H_k$  вдоль ОТН на частоте около 4 МГц [87]. Выходной сигнал датчика пропорционален величине измеряемого поля (направлено вдоль ОЛН) и снимается с катушки, ориентированной вдоль ОЛН. В процессе работы датчика ТМП непрерывно перемагничивается по синусоидальному закону, воздействие внешнего измеряемого поля приводит к изменению спектрального состава выходного сигнала.

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики различных типов магнитометров на ТМП

Тип	Чувствительность, Гл	Коэффициент преобразования $K_{пр}$ , В/Э	Энергетическая эффективность, Вт/Э	Мощность возбуждения $P_{вч}$ , Вт	Частота возбуждения $F_{вч}$ , МГц	Относительная сложность изготовления	Чувствительность к полю ДН	Диапазон частот, Гц	Соотношение $H_{вч}$ и $H_k$
<b>Магнитометры согласно классификации [86]</b>									
<b>I</b>	$10^{-10}$	6		~0,1	4	средняя	средняя	1	$H_{вч} > H_k$
<b>II</b>	$10^{-9}$	200		0,1	0,39	низкая	средняя	1	
<b>III</b>	$10^{-9}$	0,01	$2 \cdot 10^{-6}$		500	высокая	высокая	1	
<b>IV</b>	$10^{-10}$	1	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	11	низкая	низкая	1	$H_{вч} < H_k$
<b>V</b>	$10^{-8}$	0,75	$10^{-2}$	1	300	средняя	средняя	$10^8$	
<b>VI</b>	$5 \cdot 10^{-8}$				4,2+6,5	высокая	высокая		
<b>Исследуемые в диссертационной работе магнитометры на ТМП: <math>a</math> – без модуляции; <math>b</math> – модуляционный</b>									
$a$	$10^{-13}$	10		< 0,1	600–800	низкая	низкая	$10^{-3}$ – $10^8$	$H_{вч} < H_k$
$b$	$10^{-10}$	10		< 0,1	600–800	средняя	низкая	0– $10^4$	

Второй тип магнитометров также подразумевает возбуждение образцов ТМП полями более  $H_k$ , однако в отличие от первого типа поле  $H_{вч}$  направлено вдоль ОЛН, а полезный сигнал снимается с катушки, ориентированной вдоль ОТН [88]. Направление вращения вектора

магнитного момента и фаза выходного сигнала определяются измеряемым полем, направленным вдоль ОН; величина измеряемого поля находится по уровню четных составляющих в спектре выходного сигнала.

Третий тип магнитометров работает при наличии постоянного поля смещения  $H_{см}$ , направленного вдоль ОН и приблизительно равного полю анизотропии ТМП  $H_k$ , в силу чего положение магнитного момента неустойчиво и значительно изменяется при наличии модуляционного и измеряемого полей, направленных вдоль ОЛН [89]. Возбуждение осуществляется на частоте 500 МГц вдоль ОЛН, полезный сигнал снимается с измерительной катушки, ориентированной вдоль ОН. Выходной сигнал датчика поступает со схемы синхронного детектирования и пропорционален основной гармонике в спектре снимаемого с измерительной катушки сигнала; чувствительность датчика определяется дисперсией поля анизотропии ТМП.

Отличительной особенностью магнитометрических преобразователей первых трех типов является величина поля возбуждения  $H_{вч}$  более  $H_k$ .

Магнитометрические преобразователи четвертого типа используют эффект изменения магнитной проницаемости ТМП вдоль ОН при воздействии слабых измеряемых полей вдоль ОЛН. ТМП используется в качестве сердечника проволочной катушки индуктивности, которые совместно с сосредоточенной емкостью образуют параллельный колебательный контур на частоте  $\sim 11$  МГц. Амплитуда напряжения на резонансном контуре пропорциональна величине измеряемого поля и измеряется при помощи амплитудного детектора [90].

В основе работы датчиков слабых магнитных полей пятого типа лежит явление ферромагнитного резонанса; отличительной особенностью данного типа преобразователей является широкая полоса частот – до 300 МГц [91]. ТМП размещается в короткозамкнутом полосковом резонаторе, входное сопротивление которого на частоте ФМР выбирается равным 50 Ом, после чего увеличением поля смещения  $H_{см}$  активную часть входного сопротивления резонатора устанавливают равной 25 Ом. Поле смещения и измеряемое поле сонаправлены и находятся под прямым углом к полю возбуждения. Измерение величины реальной части отраженного сигнала с помощью циркулятора и амплитудного детектора позволяет судить о величине измеряемого поля.

Шестой тип магнитоизмерительных преобразователей на основе ТМП подразумевает маломощное возбуждение ТМП вдоль ОЛН на двух частотах: 4,2 и 6,5 МГц; сигнал на частоте 10,7 МГц снимается вдоль ОН, измеряемое поле направлено вдоль ОН [92]. Для расширения динамического диапазона магнитометра используется компенсационный метод измерения со схемой синхронного детектирования (СД) полезного сигнала.

Отличительными особенностями конструкций, предлагаемых и исследуемых в данной работе широкополосных магнитометров слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП, являются [78–84, 93, 94]:

– в основе работы датчиков лежит явление ФМР: внешнее измеряемое поле изменяет мнимую часть магнитной проницаемости ТМП, что приводит к изменению амплитуды колебаний резонансной системы;

– рабочая область ТМП локализована: не вся площадь пленки принимает участие в работе датчика, за счет чего удастся избежать шумов, вызванных краевыми эффектами (как, например, в датчиках II типа [81]);

– рабочему режиму датчика соответствует величина поля возбуждения  $H_{вч}$  менее  $H_k$ , тогда как величина  $H_{см}$  более  $H_k$ , за счет чего удастся минимизировать уровень собственных шумов ТМП.

### 1.3 Методы измерения магнитных характеристик тонкопленочных образцов

Традиционным и широко используемым методом исследования тонкопленочных образцов является метод ферромагнитного резонанса [41–44], который на практике может быть реализован тремя различными способами [95–97] (рисунок 1.2).

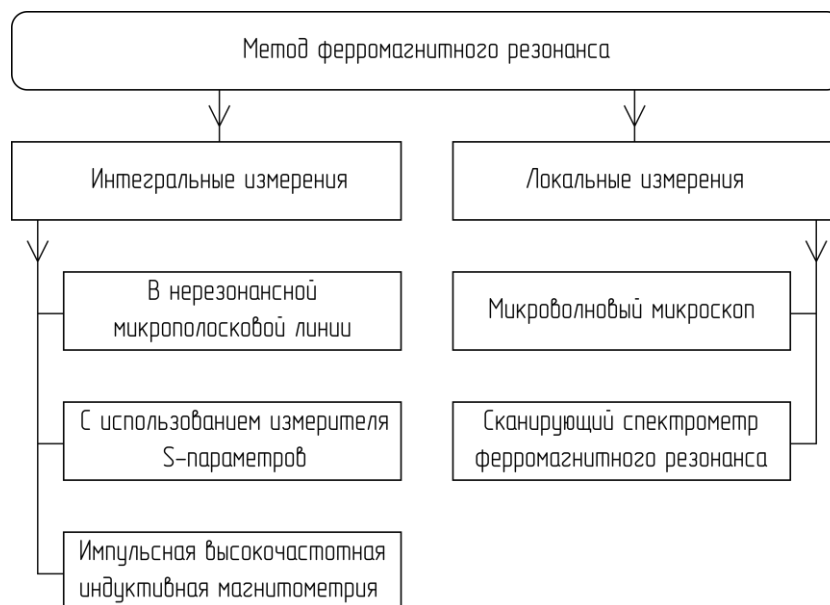


Рисунок 1.2 – Исследование тонких магнитных пленок методом ферромагнитного резонанса

Первый способ подразумевает размещение исследуемого образца вблизи микрополосковой линии, причем измерения проводятся при развертке по постоянному полю и в широком диапазоне частот. Во втором способе используется измеритель S-параметров (векторный анализатор цепей), работающий в заданном диапазоне частот. Образец, как правило, помещается в короткозамкнутый отрезок микрополосковой линии, измерения S-параметров проводятся на частотах ниже резонансной. Полученные от векторного анализатора параметры матрицы рассеяния пересчитываются в кривые поглощения ФМР. Третий способ подразумевает использование технологии импульсной индуктивной высокочастотной магнитометрии (PIMM – pulsed inductive microwave magnetometry). Исследуемый образец размещают над копланарной линией, которая возбуждается ступенчатым воздействием от высокочастотного импульсного генератора. Кривую поглощения ФМР получают с помощью прямого преобразования Фурье от отклика на ступенчатое воздействие. Все три метода имеют свои преимущества и недостатки, объединяет их возможность измерения интегральных характеристик ТМП в широкой полосе частот и в широком диапазоне полей. Микрополосковый метод измерений параметров ФМР является самым простым в реализации, не требует сложных процедур калибровки, но обладает низкой чувствительностью, т. к. в качестве чувствительного элемента используется нерезонансная структура. Метод с использованием векторного анализатора цепей позволяет использовать все преимущества современных измерителей S-параметров: быструю развертку в широком диапазоне частот; прецизионное измерение элементов матрицы рассеяния многополюсников. Главным преимуществом метода PIMM является использование ступенчатого магнитного воздействия на образец взамен высокочастотного возбуждения, недостатком является сложность и высокая стоимость измерительного оборудования. Общим недостатком последних двух методов является необходимость в сложной калибровке измерительной системы.

Необходимо отметить, что описанные методы измерения параметров ФМР являются интегральными, т. е. не позволяют измерять локальные свойства тонкопленочных образцов. Тогда как предельно достижимые характеристики многих устройств на основе ТМП, в том числе и датчиков магнитных полей, в значительной мере определяются степенью неоднородности магнитных характеристик материала, а также характером распространения неоднородностей по площади ТМП [40]. Известно, что эти неоднородности вызваны в первую очередь несовершенством технологии получения пленок [42, 44].

Наиболее чувствительным и точным методом измерения распределений резонансных параметров по поверхности образца является метод измерения локальных параметров ФМР [46]. Распределение дефектов по площади образца может быть получено с использованием

микроволнового магнитного микроскопа [44], магнитный образец в котором размещается с внешней стороны задней стенки объемного СВЧ-резонатора, имеющей отверстие малого диаметра. В этой конструкции только малая часть пленки подвержена воздействию высокочастотного поля СВЧ-резонатора. Резонансный спектр участка пленки получают путем развертки по постоянному полю. Перемещая исследуемый образец относительно отверстия резонатора, определяют распределение магнитных свойств по всей его площади. При измерении спектров пленок толщиной менее  $100 \text{ \AA}$  стремятся максимально увеличить чувствительность измерительных установок, так как объем исследуемого образца чрезвычайно мал. Обычной практикой является использование низкочастотной модуляционной схемы с синхронным детектированием полезного сигнала. При таком методе измерения постоянное магнитное поле модулируется полем малой амплитуды, частотой до  $150 \text{ кГц}$  [44], посредством чего происходит перенос спектра полезного сигнала на промежуточную частоту, где сигнал усиливается и фильтруется без воздействия низкочастотных шумов измерительной схемы. После демодулирования сигнала получают дисперсионную кривую (производную кривой поглощения). Существенным недостатком микроволнового микроскопа является невозможность исследований пленок в метровом и дециметровом диапазонах длин волн, так как при этом существенно увеличиваются габариты резонаторов и уменьшается полезный сигнал вследствие уменьшения коэффициента заполнения резонатора образцом [45].

В Институте физики им. Л. В. Киренского разработан автоматизированный спектрометр ферромагнитного резонанса, обладающий следующими уникальными возможностями [46]: установка позволяет изучать свойства магнитных материалов, такие как эффективная намагниченность насыщения; константы анизотропии; направления осей легкого намагничивания; коэрцитивная сила; параметры обменного взаимодействия; ширина линии ФМР; спектрометр обладает высокой чувствительностью и работает в диапазоне частот от  $0,1$  до  $6 \text{ ГГц}$  с локальностью измерения от  $0,3$  до  $2,5 \text{ мм}$ .

Чувствительным элементом автоматизированного спектрометра ФМР является СВЧ-головка [46]. Головка имеет малые размеры (габариты  $25 \times 30 \times 35 \text{ мм}$ ) и состоит из корпуса, изготавливаемого из немагнитной латуни, в котором размещается микрополосковый резонатор с круглым измерительным отверстием, вытравленным в металлизации со стороны экрана точно на оси вращения головки. Датчиком ФМР является резонатор, возбуждаемый транзисторным СВЧ-генератором. К выходу генератора подключен амплитудный детектор (АД). Сигнал на выходе АД пропорционален величине поглощения СВЧ-мощности участком пленки, расположенным под измерительным отверстием. Для повышения чувствительности спектрометра используется схема синхронного детектирования сигнала. Тем не менее,

чувствительность прибора не позволяет проводить измерения характеристик ТМП малой толщины без накопления сигнала, в связи с чем возникает задача повышения его чувствительности (чувствительности СВЧ-головки спектрометра). Кроме этого, недостатками СВЧ-головки сканирующего спектрометра ФМР является сложность изготовления и настройки.

### Выводы по главе 1

Создание универсального магнитоизмерительного преобразователя, обладающего лучшими характеристиками среди всех возможных конструкций магнитометрических устройств, связано с серьезными трудностями. Поэтому на сегодняшний день существуют десятки типов датчиков магнитных полей, работающих на основе различных физических явлений и имеющих свои преимущества по тем или иным характеристикам.

Особое место среди различных типов магнитометрических приборов занимают устройства, способные проводить измерения параметров слабых магнитных полей в широкой полосе частот – от постоянной составляющей и до  $10^5$ – $10^8$  Гц. Например, при проведении геофизических исследований с искусственным возбуждением среды методом переходных процессов требуется регистрация отклика в частотном диапазоне  $10^{-2}$ – $10^5$  Гц на искусственное импульсное воздействие. Заданному частотному диапазону удовлетворяют, например, датчики на основе эффекта Холла, однако требуемая для качественной интерпретации данных магнитной разведки чувствительность на частотах более  $10^2$  Гц должна быть не менее  $10^{-12}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>, что недостижимо для гальваномангнитных преобразователей. Для повышения информативности метода необходимо использовать автономные компактные трехкомпонентные датчики магнитного поля, устанавливаемые во многих точках как внутри петли возбуждения, так и снаружи. Используемые в настоящее время индукционные магнитометры (магнитные рамки) не удовлетворяют современным требованиям проведения геофизических исследований.

В ряде применений магнитометрических устройств, например, при разработке специализированных охранных систем и датчиков перемещения массивных магнитных объектов, требуется обеспечить высокую чувствительность в диапазоне частот от  $10^{-2}$  до  $10^3$  Гц, датчики должны иметь высокую энергетическую эффективность (низкое потребление мощности для обеспечения высокой автономности), малые габариты и массу, а также быть простыми в изготовлении и дешевыми при массовом производстве. Использование индукционных датчиков затруднительно в силу необходимости намотки большого числа витков

для получения высокой чувствительности на низких частотах, что ограничивает верхнюю рабочую частоту устройства, увеличивает массу и габариты датчика.

Кроме указанных выше областей использования магнитометрических приборов существует ряд применений, где ключевыми требованиями являются: широкая полоса частот – от постоянной составляющей до десятков и сотен мегагерц; способность измерения компонент магнитного поля; высокая линейность и равномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ); малые габариты и масса датчика; простота конструкции и низкая стоимость при серийном производстве. Приведенным требованиям в большей мере удовлетворяют исследуемые в данной работе датчики слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой [78–84].

Таким образом, цель работы заключалась в создании новой конструкции широкополосного датчика слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой, удовлетворяющей современным требованиям к магнитометрической аппаратуре. Для достижения указанной цели требовалось решение вспомогательных задач: разработка новых автоматизированных комплексов и повышение чувствительности известных приборов для измерения различных характеристик ТМП и чувствительных элементов датчиков на их основе.

## 2 Датчики слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой

В предлагаемой конструкции датчика слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой в общем случае содержатся следующие компоненты: активный элемент; генератор возбуждения; амплитудный детектор (АД); операционный усилитель (ОУ); магнитная система, формирующая постоянное поле смещения; компенсационная система; система электропитания. На рисунке 2.1 показана структурная схема, общая для различных видов разработанных магнитометров. В работах [78–83] показано, что датчики обладают наибольшей чувствительностью в случае, когда высокочастотное поле возбуждения  $H_{ВЧ}$  направлено вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) ТМП; постоянное поле смещения  $H_{см}$  направлено под некоторым небольшим углом  $\alpha$  к ОТН. В этом случае направление максимальной чувствительности к измеряемому полю  $H_{изм}$  примерно совпадает с направлением оси легкого намагничивания (ОЛН).

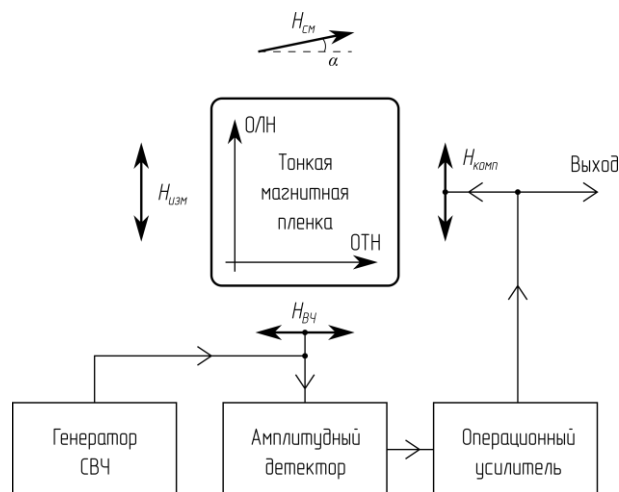


Рисунок 2.1 – Структурная схема датчика магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП:

$H_{см}$  – поле смещения;  $H_{изм}$  – измеряемое поле;

$H_{ВЧ}$  – высокочастотное поле возбуждения;  $H_{комп}$  – компенсационное поле

Рассмотрим элементы конструкции датчика на основе микрополоскового резонатора (МПР) с магнитной пленкой. Активным элементом измерительного преобразователя является ТМП, помещаемая, как правило, в МПР, создающий направленное вдоль ОТН поле  $H_{ВЧ}$ . В общем случае поле  $H_{ВЧ}$  может быть создано и другими способами: одиночным проводником



или многовитковой катушкой индуктивности. При реализации катушки, работающей на высоких частотах, необходимо учитывать ее индуктивное сопротивление на рабочей частоте и минимизировать геометрические размеры для локализации рабочей поверхности ТМП. Края пленки не должны участвовать в работе датчика, так как это приводит к увеличению шумов [85]. Создание многовитковой катушки, работающей на оптимальной для ТМП железоникелевого сплава  $Fe_{20}Ni_{80}$  частоте в диапазоне 600–800 МГц, возможно только при минимизации линейных размеров пленки до нескольких миллиметров и меньше, что приводит к снижению чувствительности датчика за счет уменьшения рабочего объема ТМП и оправдано только при конструировании сверхминиатюрных преобразователей. В остальных случаях для повышения чувствительности увеличивают размер ТМП и уменьшают число витков до минимально возможного – одного витка. Размеры ТМП 5x9 мм, например, позволяют реализовать одновитковый преобразователь, работающий на частотах возбуждения до 1 ГГц. Значительное увеличение площади ТМП ограничивается дисперсиями характеристик одноосной магнитной анизотропии.

Постоянное поле смещения  $H_{см}$  создается постоянными магнитами и направлено под некоторым небольшим углом  $\alpha$  (порядка единиц град.) к ОН. В некоторых случаях постоянное поле может быть создано кольцами Гельмгольца, что позволяет регулировать его амплитуду в широких пределах путем изменения тока через катушки, но требует дополнительной мощности от источника питания и системы стабилизации напряженности поля. Изменением направления тока в катушках, формирующих поле смещения  $H_{см}$ , удастся реализовать один из модуляционных режимов работы датчика. Конструктивная реализация магнитной системы формирования поля смещения  $H_{см}$  должна предусматривать возможность плавной регулировки и фиксации угла  $\alpha$  в пределах не менее  $\pm 10^\circ$ .

Возбуждение МПР осуществляется от малощумящего СВЧ-генератора. Исследованы несколько вариантов реализации генератора возбуждения:

- Малошумящий генератор СВЧ, нагруженный через цепь связи на резонатор. Преимуществом этого варианта является малый размер и низкое потребление генератора, главным недостатком – возникающее противоречие между выходной мощностью генератора и шумами. Создание малошумящего генератора с высокой выходной мощностью затруднительно. Достоинством является возможность создания датчика с минимальным током потребления (например, менее 1 мА) при снижении чувствительности.

- Малошумящий генератор СВЧ, нагруженный на резонатор через усилитель мощности. Данный вариант является лучшим по критерию минимальных шумов, но требует увеличения числа электрорадиоизделий (ЭРИ) и повышения электропотребления.

– Малошумящий генератор СВЧ, резонатором которого является МПР датчика. Достоинством является отсутствие необходимости подстройки частоты генератора в резонанс с измерительным МПР. Отсутствие согласующей цепи (емкости связи) и большое влияние элементов генератора на резонатор приводят к невозможности создания высокочастотных резонансных систем.

Амплитудный детектор является нелинейным элементом, напряжение на выходе которого изменяется в соответствии с законом изменения огибающей сигнала генератора СВЧ, нагруженного на МПР с пленкой. В спектре выходного сигнала АД присутствует постоянная составляющая, пропорциональная амплитуде сигнала генератора СВЧ, и низкочастотная составляющая, пропорциональная величине измеряемого поля  $H_{изм}$ . Главным требованием к АД является минимальный уровень собственного шума, что учитывается при выборе элементной базы. Собственные шумы современных диодов не превышают в большинстве случаев амплитудных шумов генератора СВЧ.

Выходной сигнал АД подается на операционный усилитель и на компенсационную катушку, создающую поле  $H_{ком}$ . Компенсационный метод измерений позволяет повысить долговременную стабильность коэффициента преобразования и значительно повысить линейность датчика. При практической реализации компенсационная катушка включается через высокостабильное прецизионное малошумящее сопротивление. Активное сопротивление катушки уменьшают до минимально возможного, в этом случае текущий через катушку ток определяется только последовательно включенным стабильным сопротивлением. Материал каркаса катушки выбирается таким образом, чтобы ее коэффициент преобразования не изменялся значительно при изменениях температуры и с течением времени. Исполнение катушки в виде колец Гельмгольца позволяет избавиться от эффекта экранирования измеряемых высокочастотных магнитных полей. Также для избавления от эффекта экранирования катушка может быть выполнена плоской, а резонатор и ТМП размещены на ее внешней стороне [94]. Оптимальное число витков катушки ОС находится исходя из противоречивых требований увеличения магнитной постоянной (что позволяет снизить токи компенсации и общее потребление датчика) и уменьшения индуктивности в петле ОС, которой ограничивается верхняя рабочая частота датчика.

Выходное напряжение ОУ, подаваемое на цепь компенсации, является выходным сигналом измерительного преобразователя. В зависимости от сферы применения датчика выходной сигнал может быть отфильтрован в требуемом диапазоне частот, усилен или ослаблен, выходное сопротивление может быть приведено к требуемому значению, например, к широко распространенному сопротивлению 50 Ом.

## 2.1 Разработка конструкций датчиков и градиентометров слабых магнитных полей

На рисунке 2.2 отображена предложенная функциональная схема датчика, соответствующая прямой реализации структурной схемы, показанной на рисунке 2.1.

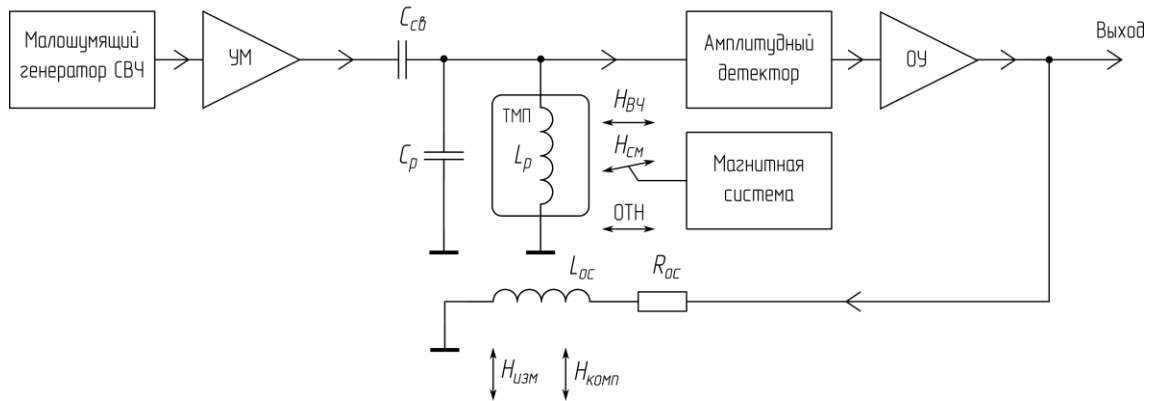


Рисунок 2.2 – Функциональная схема датчика магнитных полей на основе ТМП

Датчики слабых магнитных полей, выполненные согласно функциональной схеме на рисунке 2.2, обладают следующими преимуществами: простота конструкции; малые габариты и масса; малое энергопотребление. Рассмотрим принципы работы данной конструкции. Направление постоянного поля смещения  $H_{см}$  определяет рабочую точку и режим работы датчика. В случае, когда постоянное поле смещение  $H_{см}$  больше поля анизотропии пленки  $H_k$ , а также направлено вдоль ОЛН и поля  $H_{вч}$ , условия для возникновения ферромагнитного резонанса в ТМП отсутствуют. Воздействие низкочастотного измеряемого поля  $H_{изм}$ , направленного вдоль ОЛН, приводит к отклонению результирующего вектора магнитного поля и отклонению равновесного положения магнитного момента  $M$ . С изменением равновесного направления намагниченности ТМП происходят изменения компонент тензора магнитной восприимчивости и, как следствие, энергии СВЧ-поглощения  $E_n$  (рисунок 2.3, а). Таким образом, воздействие внешнего поля  $H_{изм}$  приводит к изменению вносимых в колебательных контур потерь и изменению его добротности, что влияет на амплитуду колебаний на контуре и регистрируется АД.

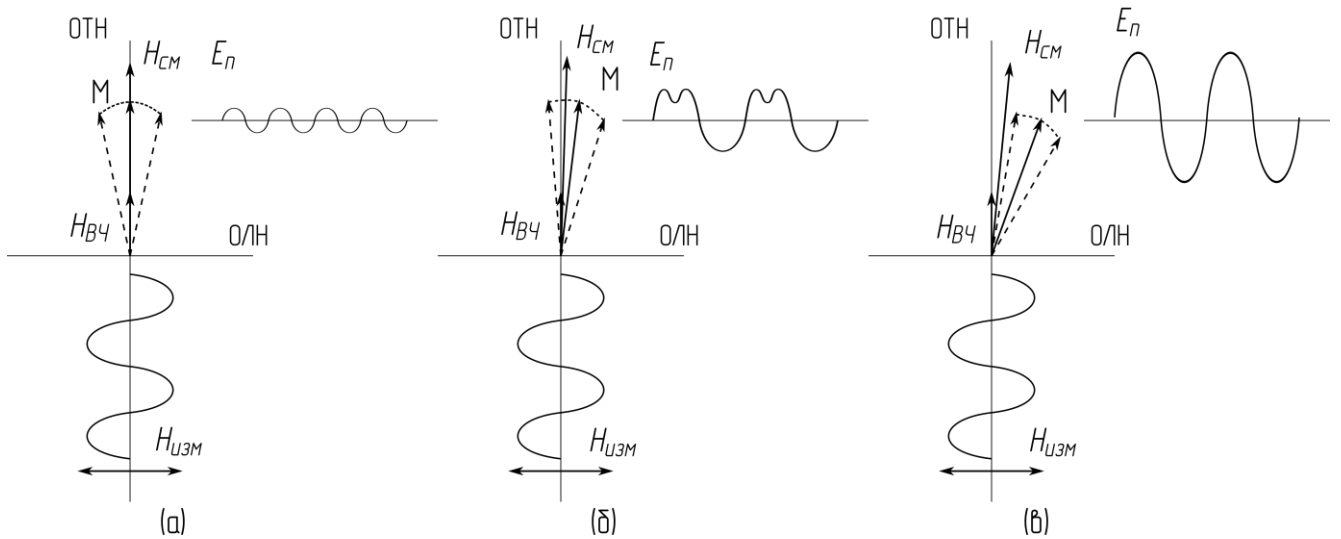


Рисунок 2.3 – Режимы работы датчика при различных углах  $\alpha$  между ОТН и  $H_{см}$ :

*a* – режим удвоения частоты; *б* – переходный режим; *в* – линейный режим

В случае, когда угол  $\alpha$  между ОТН и  $H_{см}$  равен нулю, на АД регистрируется сигнал удвоенной частоты поля  $H_{изм}$ . Увеличение угла  $\alpha$  приводит к искажению выходного сигнала датчика: амплитуда второй гармоники  $H_{изм}$  убывает, в спектре появляется составляющая с частотой изменения поля  $H_{изм}$  (рисунок 2.3, б). При дальнейшем увеличении угла  $\alpha$  коэффициент преобразования растет, в работе датчика устанавливается линейный режим (рисунок 2.3, в), для которого характерно наличие в спектре только составляющей с частотой  $H_{изм}$ . Существует некоторый оптимальный угол  $\alpha$ , при котором коэффициент преобразования датчика максимален и последующее увеличение угла приводит к снижению чувствительности. Необходимо отметить, что уровень сигнала с выхода АД для режима удвоения частоты (рисунок 2.3, а) значительно ниже, чем для линейного режима (рисунок 2.3, в).

На рисунке 2.4 (а) показана экспериментально полученная зависимость значения коэффициента преобразования  $K_{пр}$ , нормированного на максимальное значение  $K_{пр}$ , от значения поля смещения, нормированного на величину поля анизотропии  $H_k$ . Максимальное значение  $K_{пр}$  соответствует смещающему полю, равному  $H_k$ , однако работе датчика в этих условиях соответствует большой уровень магнитных шумов ТМП и явление гистерезиса. На практике рабочее значение  $H_{см}$  выбирается около  $(1,1-1,2) \cdot H_k$ , что позволяет значительно снизить шумы ТМП при приемлемом уменьшении  $K_{пр}$ . На рисунке 2.4 (б) показана зависимость значения коэффициента преобразования  $K_{пр}$  от угла между направлением постоянного поля смещения  $H_{см}$  и ОТН.

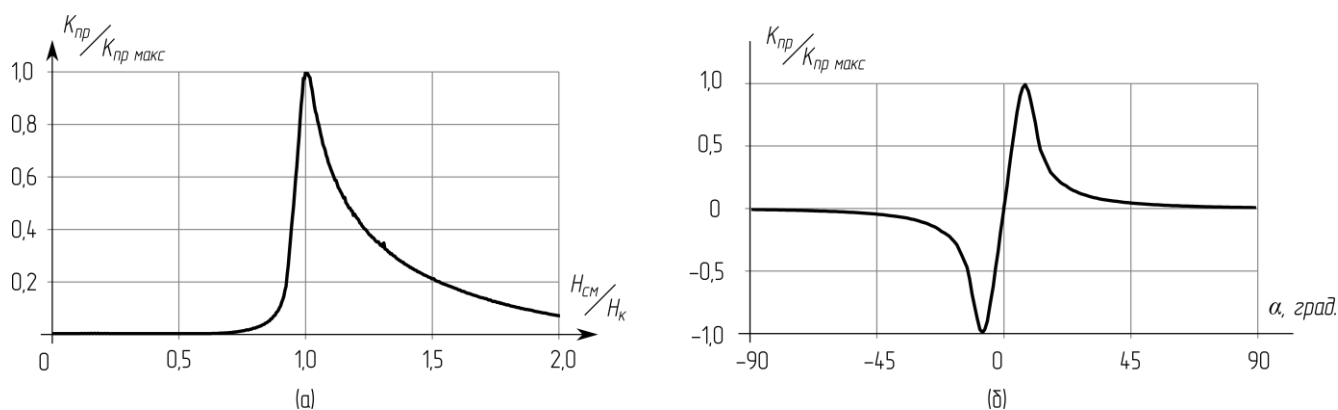


Рисунок 2.4 – Экспериментально измеренные зависимости:

$a$  – нормированное значение коэффициента преобразования  $K_{пр}/K_{пр макс}$  от нормированной величины поля смещения  $H_{см}/H_k$ ;  $b$  – от угла  $\alpha$  между полем смещения  $H_{см}$  и ОТН

Для уменьшения шумов измерительного преобразователя и повышения чувствительности датчика разработана и исследована конструкция датчика с двумя резонаторами и двумя ТМП (рисунок 2.5), где постоянное поле смещения  $H_{см}$  направлено строго вдоль ОТН. Для вывода рабочей точки датчика в линейный режим полоски резонатора фиксируют под углом  $\alpha$  в противоположных направлениях.

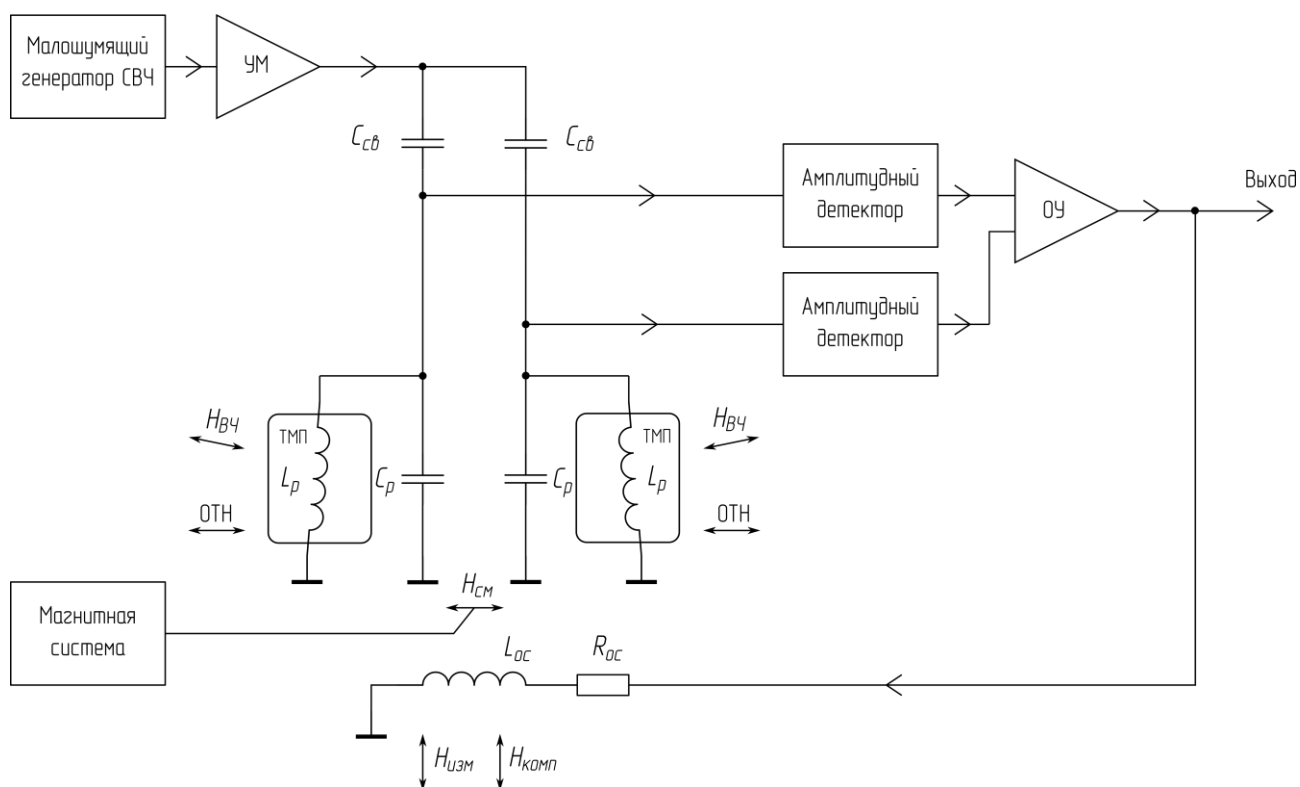


Рисунок 2.5 – Функциональная схема датчика магнитных полей с двумя резонаторами и двумя ТМП

Однополупериодный выпрямитель одного из АД настраивается на работу на положительной полуволне, второго АД – на отрицательной (рисунок 2.5). Постоянные составляющие на выходах АД равны по модулю и противоположны по знаку, переменные составляющие равны по модулю и синфазны в силу поворота микрополосков резонаторов в противоположные стороны. Суммирование сигналов на входе ОУ позволяет избавиться от постоянных составляющих на выходах АД и удвоить уровень полезного сигнала. Амплитудные шумы СВЧ-генератора частично компенсируются на ОУ, что дополнительно повышает чувствительность данной конструкции.

На рисунке 2.7 приведена электрическая принципиальная схема датчика магнитных полей на основе двух ТМП, а на рисунке 2.6 показаны: модель печатной платы; изготовленная печатная плата с установленными компонентами (без ТМП и индуктивной части резонатора); конструкция компенсационной системы и магнитной системы датчика; внешний вид устройства.

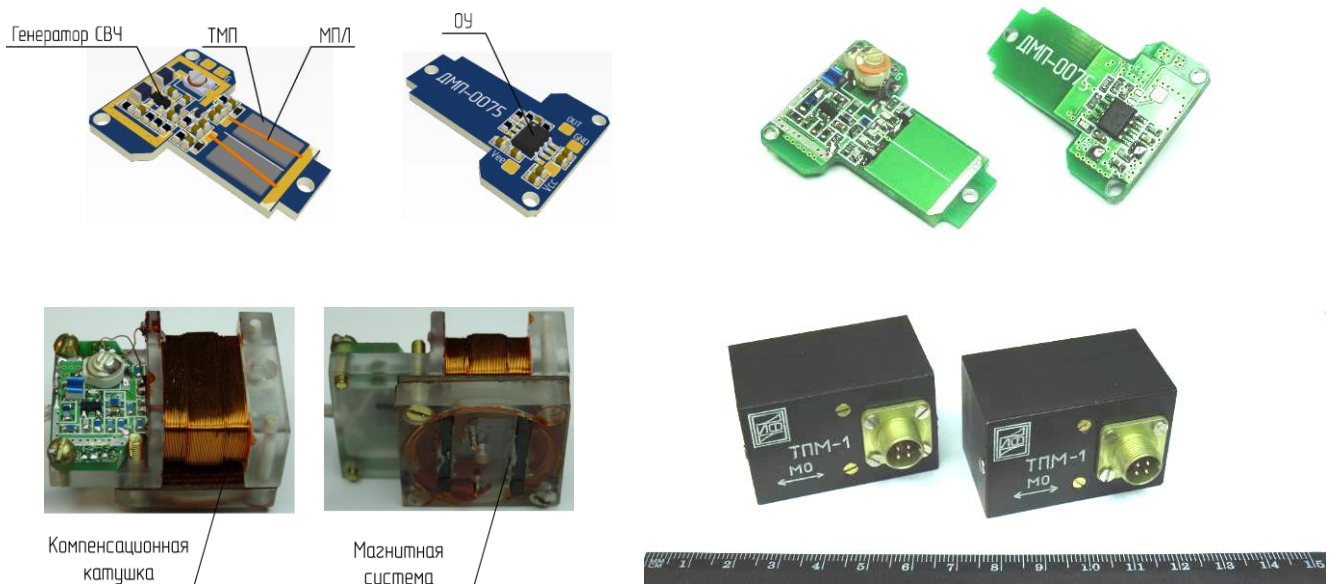


Рисунок 2.6 – Конструкция разработанного датчика слабых магнитных полей с двумя резонаторами и двумя ТМП

Электрическая принципиальная схема (рисунок 2.7) и печатная плата (рисунок 2.6) разработаны согласно функциональной схеме, показанной на рисунке 2.5. На верхней стороне печатной платы размещаются: СВЧ-генератор, с возможностью монтажа экрана; амплитудные детекторы для двух резонаторов; микрополосковые резонаторы с ТМП. На нижней стороне печатной платы размещаются: ОУ с элементами ОС; контакты для пайки сигнальных проводов и выводы питания датчика.

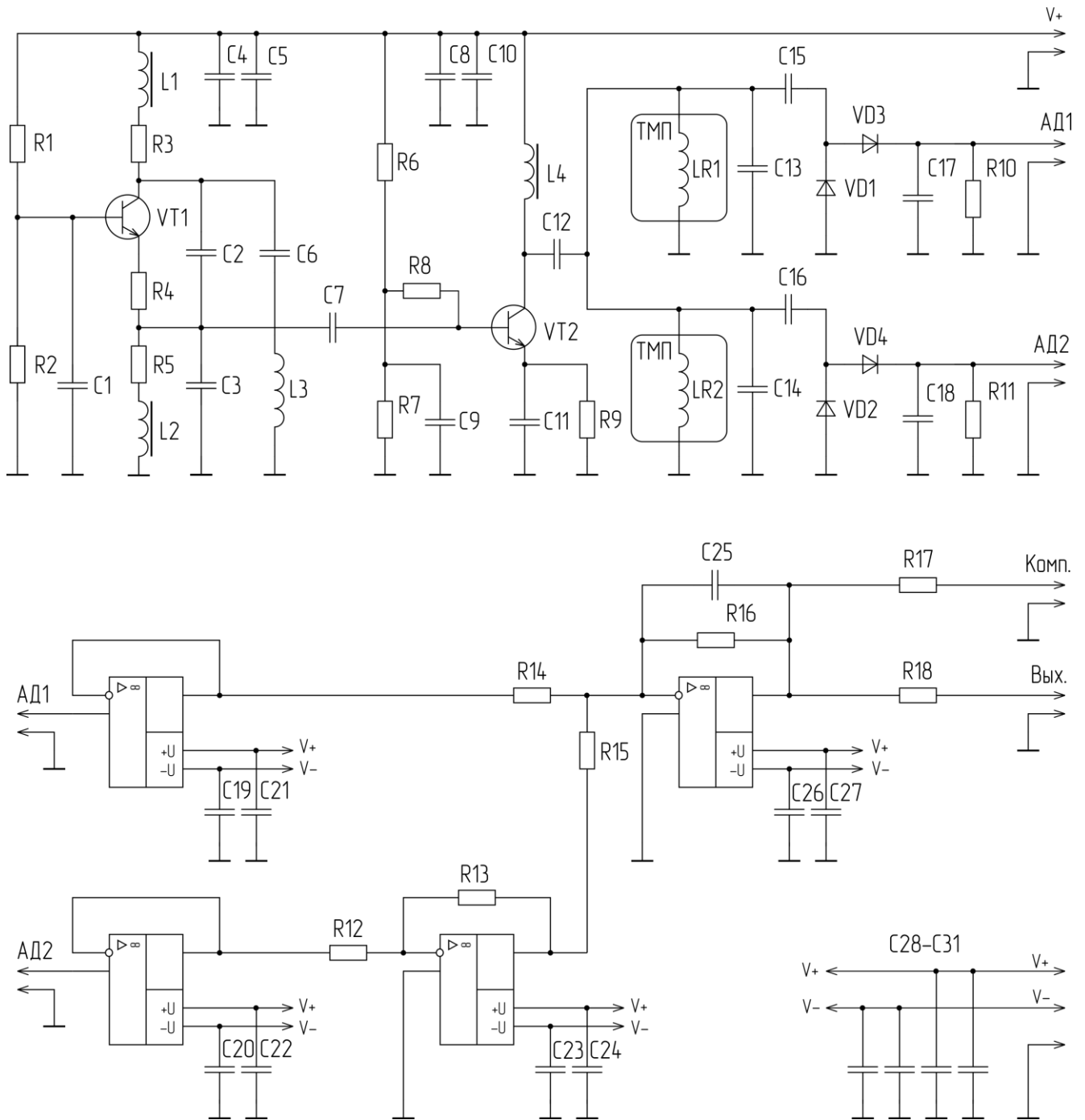


Рисунок 2.7 – Электрическая принципиальная схема датчика на основе двух микрополосковых резонаторов с двумя тонкими магнитными пленками (однополупериодные выпрямители двух АД работают в одном направлении, инверсия сигнала выполняется с помощью дополнительного ОУ)

В целях минимизации итоговых размеров датчиков при разработке используются только малогабаритные компоненты поверхностного монтажа. Печатная плата закрепляется в каркасе с установленной компенсационной катушкой и магнитной системой, выполненной на основе постоянных магнитов и магнитопроводов. Компенсационная катушка (катушка ОС) состоит из трех секций: две крайние секции с одинаковым числом витков; средняя секция с меньшим числом витков. Неравномерный профиль катушки ОС позволяет создать равномерное компенсационное поле в области размещения ТМП. Конструкция помещается в пластиковый корпус с немагнитными разъемом и крепежом.

Режим удвоения частоты (рисунок 2.3, а) используется в разработанной конструкции модуляционных датчиков (рисунок 2.8).

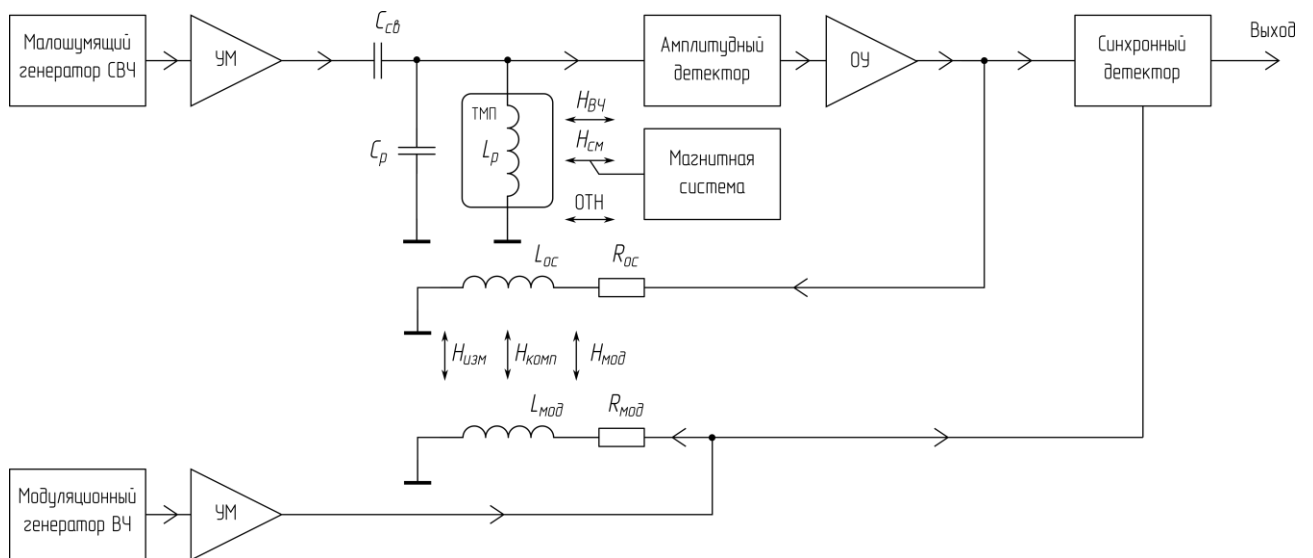


Рисунок 2.8 – Функциональная схема модуляционного датчика магнитных полей на основе ТМП

Рассмотрим принцип действия модуляционного датчика. Генератор высокой частоты через усилитель мощности модулирует магнитное поле в преобразователе. Амплитуда модулирующего поля  $H_{mod}$  должна быть выше максимальной напряженности измеряемого поля  $H_{изм}$ , частота модулирующего поля выше максимальной частоты  $H_{изм}$ . Поле смещения  $H_{см}$  направлено строго вдоль  $OТН$ , поэтому устройство работает в режиме удвоения частоты (рисунок 2.3, а) и на выходе СД сигнал отсутствует, так как в спектре сигнала нет составляющей с частотой  $H_{mod}$ . При появлении  $H_{изм}$  происходит смещение рабочей точки датчика и изменение составляющих спектра выходного сигнала – появляется составляющая с частотой  $H_{mod}$ , которая детектируется СД. Основным достоинством введения схемы модуляции и синхронного детектирования является ослабление эффекта дрейфа нулевого уровня (дрейф



нуля) на выходе датчика, который выражается в самопроизвольном отклонении выходного напряжения при отсутствии изменений в измеряемом сигнале. Ослабление эффекта дрейфа нуля необходимо при измерениях постоянной составляющей поля, например, при геофизических исследованиях. На практике для формирования модулирующего и компенсационных полей удается использовать одну общую катушку.

К недостаткам модуляционной схемы можно отнести значительное усложнение конструкции: к цепям формирования модулирующего поля и синхронного детектирования предъявляются требования по низким шумам; на практике частота модуляции выбирается как минимум на порядок большей верхней рабочей частоты датчика, что приводит к необходимости уменьшения индуктивности модуляционной катушки и увеличения тока при сохранении рабочих напряжений; высокие частоты модуляции накладывают дополнительные требования к схеме синхронного детектирования и значительно ее усложняют; усложняется процесс настройки датчика.

При решении ряда геофизических задач, связанных с измерением естественного поля Земли, как правило, интересует не абсолютное значение магнитного поля, а разница относительно некоторого опорного уровня или между двумя точками измерений. В последнем случае используют градиентометры – магнитометрические преобразователи, измеряющие разницу магнитных полей между двумя точками, т. е. пространственную производную. Расстояние между этими двумя точками называется базой градиентометра. Датчики на основе ТМП могут быть основой при построении компактного широкополосного градиентометра (рисунок 2.9) [93].

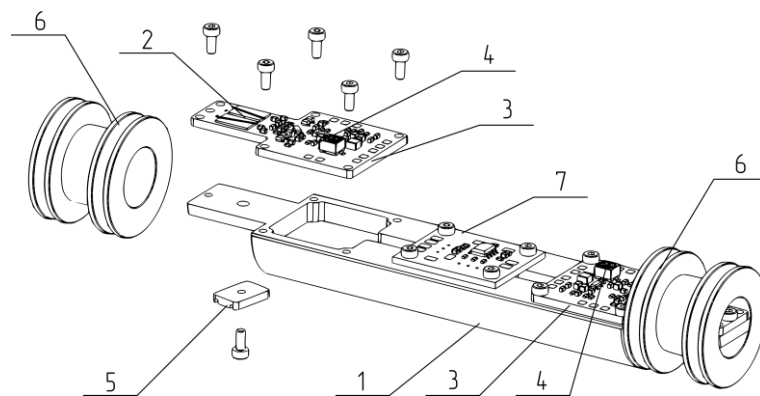


Рисунок 2.9 – Конструкция разработанного градиентометра на основе датчиков на ТМП:

- 1 – основание градиентометра; 2 – чувствительный элемент; 3 – печатная плата датчика;
- 4 – СВЧ-генератор возбуждения чувствительного элемента;
- 5 – магнитная система формирования постоянного поля смещения;
- 6 – кольца Гельмгольца компенсационной системы; 7 – вычитающий блок градиентометра

Датчики (рисунок 2.9) закрепляются на общем жестком основании, выходные сигналы подаются на вычитающее устройство на базе ОУ, предусматривающее возможность регулировки коэффициентов усиления и постоянной составляющей для каждого канала. При необходимости для стабилизации осей чувствительности датчиков применяют специальные стабилизирующие устройства на основе магнитопроводов из магнитомягких материалов [98].

Уменьшить уровень шумов градиентометра удалось при использовании одного общего СВЧ-генератора возбуждения для двух чувствительных элементов (рисунок 2.10).

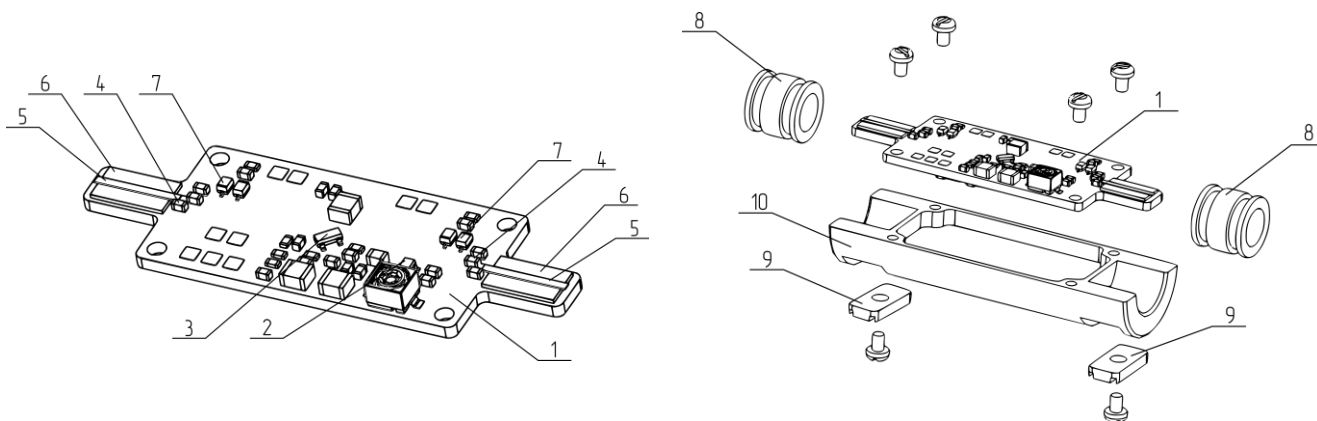


Рисунок 2.10 – Конструкция разработанного градиентометра с одним общим СВЧ-генератором возбуждения:

- 1 – печатная плата градиентометра; 2 – СВЧ-генератор возбуждения;
- 3 – усилитель мощности; 4 – конденсатор резонатора чувствительного элемента;
- 5 – полосковая линия резонатора чувствительного элемента;
- 6 – ТМП; 7 – АД; 8 – кольца Гельмгольца компенсационной системы;
- 9 – магнитные системы формирования постоянного поля смещения;
- 10 – основание градиентометра

Сигнал с размещенного на печатной плате (рисунок 2.10) общего для двух датчиков СВЧ-генератора возбуждения поступает на усилитель мощности, а затем разделяется и подается на два отдельных чувствительных элемента градиентометра. Каждый чувствительный элемент выполнен по схеме с одной ТМП (функциональная схема показана на рисунке 2.2). Сигналы двух магнитометров поступают на вычитающий элемент градиентометра, выходной сигнал которого передается потребителю. Поскольку значительный вклад в общий выходной шум чувствительных элементов вносят амплитудные шумы общего генератора возбуждения, на вычитающем блоке градиентометра происходит их частичная компенсация.

## **2.2 Теоретическое исследование датчика слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой**

Для исследования возможности улучшения параметров разработанного датчика на основе микрополоскового резонатора с ТМП разработана его численная модель. В основе разработанной модели лежит квазистатический расчет электромагнитных волн, распространяющихся в планарной микрополосковой линии с ТМП [99]. Проведен математический анализ численной модели, что позволило теоретически изучить закономерности поведения характеристик датчика при варьировании параметров как микрополосковой структуры, так и магнитной пленки. На основе численного анализа установлены некоторые закономерности, в частности, поведения коэффициента преобразования датчика при изменении величины и направления постоянного поля смещения. Конструкция датчика оптимизирована на основе полученных закономерностей для улучшения его характеристик.

### **2.2.1 Модель микрополоскового датчика слабых магнитных полей**

Моделируемый датчик построен на микрополосковом нерегулярном четвертьволновом резонаторе [79]. Этот резонатор состоит из двух отрезков полосковых линий передачи (рисунок 2.11). Один из них – широкий; изготовленный на подложке с высокой относительной диэлектрической проницаемостью. Данный отрезок имеет низкое волновое сопротивление. Один его конец свободен, а другой соединен со вторым, узким отрезком, имеющим высокое волновое сопротивление. Противоположный конец узкого проводника замкнут на экран. ТМП расположена под узким проводником в пучности высокочастотного магнитного поля. Резонатор подключается к входному и выходному портам посредством емкостной связи (рисунок 2.11, *а*).

Для расчета рассматриваемую микрополосковую структуру можно представить в виде одномерной модели, изображенной на рисунке 2.11, *б*. Модель содержит отрезки микрополосковых проводников с волновыми сопротивлениями  $Z_C$  и  $Z_L$  ( $Z_C < Z_L$ ), при этом подключение МПР к входному и выходному портам с волновыми сопротивлениями  $Z_1$  и  $Z_2$  осуществляется через емкости связи  $C_1$  и  $C_2$ . Отрезок низкоомной линии передачи имеет длину полоскового проводника  $l_C$  и его ширину  $w_C$ . Отрезок высокоомной полосковой линии передачи имеет ширину  $w_L$ , при этом он разделен точкой подключения выходного порта на два отрезка с длинами  $l_1$  и  $l_0$ . Цифры на схеме нумеруют амплитуды падающих и отраженных волн на регулярных участках резонатора, а также во входной и выходной линиях передачи,

возбуждаемых первичной падающей волной  $a_1$  на входной порт. Стрелки указывают направления распространения этих волн.

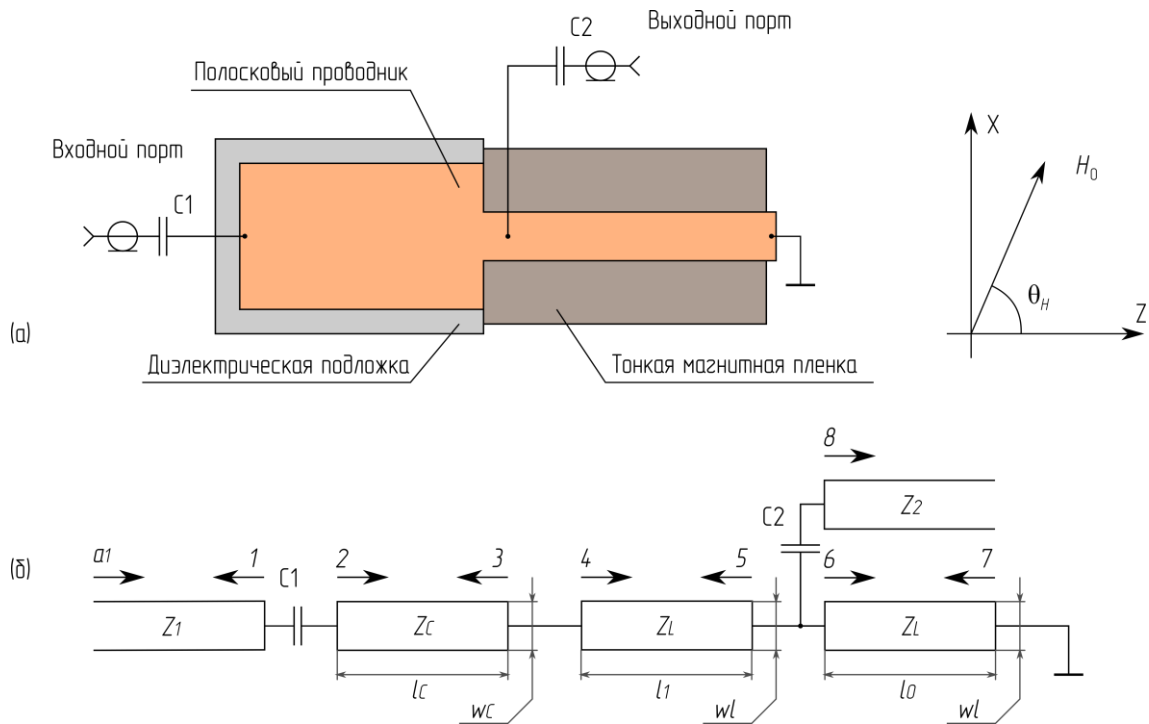


Рисунок 2.11 – Конструкция датчика на нерегулярном четвертьволновом полосковом резонаторе с тонкой магнитной пленкой – *a* и его одномерная модель – *б*

Расчет частотной характеристики рассматриваемой микрополосковой структуры проведен в рамках одномерной модели, в которой набег фазы колебаний происходит только вдоль полосковых проводников [100]. В явном виде учитываются только бегущие волны основного типа. Их амплитуды находятся из решения уравнений Кирхгофа, записанных для всех узловых точек схемы. Влияние волн высшего типа, локализующихся на нерегулярностях, моделируется введением эффективных конечных емкостей. Наличие емкости разомкнутого конца отрезка низкоомной линии учитывается эффективным удлинением ее полоскового проводника на величину  $\Delta l$ , которую можно вычислить по приближенной формуле [101]

$$\Delta l = 0.412 h_d \left( \frac{\epsilon_{re} + 0.3}{\epsilon_{re} - 0.258} \right) \left( \frac{w/h_d + 0.264}{w/h_d + 0.8} \right), \quad (2.1)$$

где  $h_d$  – толщина диэлектрической подложки полосковой линии,  $w$  – ширина ее проводника,  $\epsilon_{re} = c^2 L_C C_C$  – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость подложки ( $L_C$  – погонная индуктивность,  $C_C$  – погонная емкость микрополосковой линии,  $c$  – скорость света).

Пусть на входной порт резонатора падает волна с круговой частотой  $\omega$  и заданной нормированной амплитудой  $a_1 = 1\sqrt{\text{Вт}}$ . Этой нормированной амплитуде отвечают на входном порте амплитуда напряжения  $U_1$  и амплитуда тока  $I_1$ , выражаемые формулами

$$U_1 = a_1\sqrt{Z_1}, \quad I_1 = a_1/\sqrt{Z_1}. \quad (2.2)$$

Вторичные падающие и отраженные волны, образующиеся на границах соединения регулярных отрезков линий передачи, распространяются в противоположных направлениях. При этом на любом регулярном отрезке линий передачи учитывается разность фаз между падающей и отраженной волной, которая определяется электрической длиной отрезка. Например, для волн 2 и 3 (рисунок 2.11) электрическая длина соответствующего отрезка равна  $kcl_C$ , где  $k_C$  – волновое число. Для амплитуд токов  $X_j$ , где  $j$  – номер вторичной волны, запишем систему линейных уравнений, выражающих непрерывность напряжений и токов на всех узловых точках расчетной схемы.

$$\begin{aligned} Z_1^{-1/2} - X_1 &= X_2 - X_3 \exp(ik_C l_C), \\ Z_1^{1/2} + Z_1 X_1 &= Z_C X_2 + Z_C X_3 \exp(ik_C l_C) + \frac{i}{\omega C_1} (Z_1^{-1/2} - X_1), \\ X_2 \exp(ik_C l_C) - X_3 &= X_4 - X_5 \exp(ik_L l_1), \\ Z_C X_2 \exp(ik_C l_C) + Z_C X_3 &= Z_L X_4 + Z_L X_5 \exp(ik_L l_1), \\ X_4 \exp(ik_L l_1) - X_5 &= X_8 + X_6 - X_7 \exp(ik_L l_0), \\ Z_L X_4 \exp(ik_L l_1) + Z_L X_5 &= Z_L X_6 + Z_L X_7 \exp(ik_L l_0), \\ Z_L X_4 \exp(ik_L l_1) + Z_L X_5 &= Z_2 X_8 + \frac{i}{\omega C_2} X_8, \\ Z_L X_6 \exp(ik_L l_0) + Z_L X_7 &= 0, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где волновые числа отрезков полосковых линий определяются выражениями

$$k_C = \omega L_C C_C, \quad k_L = \omega L_L C_L, \quad (2.4)$$

а их волновые сопротивления определяются выражениями

$$Z_C = \sqrt{L_C/C_C}, \quad Z_L = \sqrt{L_L/C_L}. \quad (2.5)$$

Численно решив данную систему линейных уравнений, можно найти все неизвестные токи  $X_j$ . Расчет погонных емкостей и индуктивностей микрополосковых линий передачи выполнен в квазистатическом приближении. Детали расчета описаны в [100], а его обобщение на случай наличия ферромагнитной пленки с одноосной магнитной анизотропией сделано в [99]. В расчете предполагалось, что полосковый проводник резонатора направлен вдоль оси  $z$ , а ТМП находится в однодоменном состоянии и намагничена под углом  $\theta_M$  к оси  $z$  (рисунок 2.12). Одноосная магнитная анизотропия в плоскости ТМП характеризуется полем анизотропии  $H_k$  и углом направления оси легкого намагничивания  $\theta_k$ . ТМП находится в постоянном

подмагничивающем поле  $H_0$  (поле смещения) и в измеряемом поле сигнала  $h_s$ , направленных в плоскости пленки под углами  $\theta_H$  и  $\theta_s$  к оси  $z$ , соответственно.

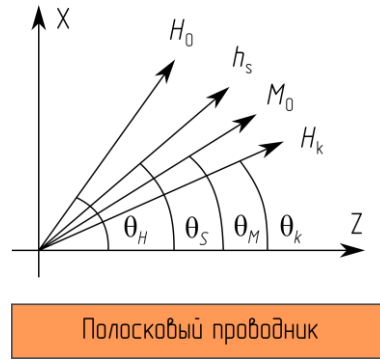


Рисунок 2.12 – Модель магнитной пленки с одноосной анизотропией в плоскости

Выражение, определяющее направление вектора равновесной намагниченности имеет вид

$$\theta_M = \arctg \left( \frac{H_0 \sin \theta_H + h_s \sin \theta_s + H_k \cos(\theta_M - \theta_k) \sin \theta_k}{H_0 \cos \theta_H + h_s \cos \theta_s + H_k \cos(\theta_M - \theta_k) \cos \theta_k} \right). \quad (2.6)$$

Для рассмотренной модели магнитная проницаемость пленки определяется выражением [99]

$$\mu_{\perp} = \frac{(\Omega_1 + \Omega_M)(\Omega_2 + \Omega_M) - \omega^2}{\Omega_1(\Omega_2 + \Omega_M) - \omega^2}, \quad (2.7)$$

$$\Omega_1 = \gamma [H_0 \cos(\theta_H - \theta_M) + h_s \cos(\theta_s - \theta_M) + H_k \cos 2(\theta_k - \theta_M)] - i\alpha\omega,$$

$$\Omega_2 = \gamma [H_0 \cos(\theta_H - \theta_M) + h_s \cos(\theta_s - \theta_M) + H_k \cos^2(\theta_k - \theta_M)] - i\alpha\omega,$$

$$\Omega_M = \gamma 4\pi M,$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $\alpha$  – параметр затухания,  $M$  – намагниченность насыщения. Следует отметить, что выражения (2.6) и (2.7) получаются решением уравнения Ландау-Лифшица [102].

Для рассматриваемой микрополосковой конструкции (рисунок 2.11) формула для вычисления погонной индуктивности ее проводников имеет вид [99]

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \sum_{l, m=0}^{\infty} A_m^H A_l^H w_{ml}^H, \quad (2.8)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $A_m^H$  – коэффициенты разложения тока на полосковом проводнике по многочленам Чебышева, и  $w_{ml}^H$  – элементы магнитно-полевой матрицы интегралов. Данная матрица определяется выражением

$$w_{ml}^H = (-1)^{m-l} \int_{\beta=0}^{\infty} \psi(\beta) \cdot J_{2m}\left(\frac{\beta w}{2}\right) \cdot J_{2l}\left(\frac{\beta w}{2}\right) \cdot d\beta, \quad (2.9)$$

где  $J_m(\beta w/2)$  – функция Бесселя первого рода  $m$ -го порядка ( $m, l = 0, 1, 2, \dots$ ),  $w$  – ширина микрополоскового проводника, и  $\psi(\beta)$  – магнитно-полевая функция вещественного аргумента  $\beta$ , возникающая при нахождении фурье-трансформанты векторного потенциала магнитного поля на уровне полосковых проводников. Магнитно-полевая функция определяется формулой

$$\psi(\beta) = \frac{\text{sh}(|\beta|h_d)/|\beta| + C_m \text{ch}(|\beta|h_d)}{(1 + C_m |\beta| \exp(|\beta|h_d))}, \quad (2.10)$$

где  $h_d$  – толщина диэлектрической подложки тонкой магнитной пленки.

Входящий в формулу (2.10) комплексный параметр  $C_m$  является единственным параметром, который полностью описывает влияние ТМП на распространение квазиперечных электромагнитных волн в микрополосковой линии [99]

$$C_m = h_m \left[ \frac{\text{tg}(k_{\parallel} h_m)}{k_{\parallel} h_m} \sin^2 \theta_M + \frac{\mu_{\perp} \text{tg}(k_{\perp} h_m)}{k_{\perp} h_m} \cos^2 \theta_M \right], \quad (2.11)$$

$$k_{\parallel} = \sqrt{i \omega \sigma \mu_0}, \quad k_{\perp} = k_{\parallel} \sqrt{\mu_{\perp}}.$$

Здесь  $h_m$  – толщина магнитной пленки,  $\sigma$  – ее проводимость,  $k_{\parallel}$  и  $k_{\perp}$  – волновые вектора волн в пленке, магнитные поля которых направлены соответственно параллельно и ортогонально равновесной намагниченности.

В тоже время погонная емкость полосковых отрезков микрополосковой структуры определяется выражением

$$C = \pi \varepsilon_0 \left/ \sum_{l,m=0}^{\infty} w_{ml}^E A_m^E A_l^E \right., \quad (2.12)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $A_m^E$  – коэффициенты разложения заряда на полосковом проводнике по многочленам Чебышева, и  $w_{ml}^E$  – элементы электрополевой матрицы интегралов.

Элементы матрицы рассеяния рассматриваемого резонатора, являющегося взаимным четырехполюсником, связаны с амплитудами токов  $X_1$  и  $X_8$  формулами

$$\begin{aligned} S_{11} &= X_1 \sqrt{Z_1}, \\ S_{21} &= X_8 \sqrt{Z_2}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

а  $|S_{21}|^2$  является коэффициентом прохождения, или, другими словами, амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) рассмотренной структуры. Поэтому величина  $\Delta |S_{21}|^2$ , равная разности значений  $|S_{21}|^2$ , рассчитанных при фиксированной частоте накачки для двух различных магнитных полей сигнала  $h_s$ , позволяет определить коэффициент преобразования датчика  $K_{np}$ , разделив эту разность на величину измеряемого сигнала  $h_s$ .

### 2.2.2 Результаты исследования микрополоскового датчика слабых магнитных полей

Рассчитаем АЧХ микрополоскового датчика с ТМП. Для возможности сравнения результатов представленного расчета с экспериментальными результатами исследований реального датчика, описанного в работе [79], параметры разработанной модели исследуемой микрополосковой структуры были взяты близкими к конструктивным параметрам исследованного датчика. Длина и ширина полоскового проводника низкоомного отрезка микрополосковой линии (рисунок 2.11) составляли  $l_C = 5$  мм и  $w_C = 4$  мм, толщина подложки  $h_{d1} = 0,5$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_{d1} = 80$ . Длина и ширина полоскового проводника высокоомного отрезка полосковой линии составляли  $l_1 = 0,4$  мм,  $l_0 = 5,6$  мм,  $w_L = 0,5$  мм. В качестве магнитной пленки была выбрана пленка из пермаллоя ( $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ ), осажденная на диэлектрическую подложку толщиной  $h_{d2} = 0,5$  мм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{d2} = 8,5$ . Пленка обладает одноосной магнитной анизотропией и имеет следующие параметры: намагниченность насыщения  $M = 1100$  Гс, поле анизотропии  $H_k = 8$  Э, параметр затухания  $\alpha = 0,01$ , проводимость  $\sigma = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  и толщина пленки  $h_m = 0,15$  мкм. Волновые сопротивления входного и выходного портов  $Z_1 = 50$  Ом и  $Z_2 = 10$  Ом. В результате рассчитанная резонансная частота рассмотренной микрополосковой структуры в отсутствие магнитной пленки  $f_0 = 0,48$  ГГц совпала с резонансной частотой датчика, исследованного в [79] при величинах емкостей связи на входе и выходе  $C1 = 4$  пФ и  $C2 = 9,3$  пФ.

На рисунке 2.12 показаны нормированные амплитудно-частотные характеристики резонатора, построенные при постоянном подмагничивающем поле  $H_0 = 9,6$  Э и для нескольких различных углов  $\theta_H$  его ориентации. Ось легкого намагничивания ТМП установлена параллельно полосковому проводнику, т. е.  $\theta_k = 0^\circ$ . Видно, что максимальная добротность, как и максимальное прохождение СВЧ мощности на резонансной частоте, наблюдается при  $\theta_H = 90^\circ$ , когда отсутствует взаимодействие магнитного момента ТМП с высокочастотным полем возбуждения, т. к. в этом случае они ориентированы параллельно друг другу. При ориентации магнитного момента ортогонально направлению поля возбуждения  $\theta_H = 0^\circ$  (кривая 4 на рисунке 2.13) наблюдается максимальное понижение резонансной частоты за счет увеличения магнитной проницаемости ТМП, однако добротность резонатора остается сравнительно высокой. Наибольшее уменьшение добротности наблюдается при  $\theta_H = 85^\circ$ , когда сказываются потери, связанные с ФМР в ТМП.



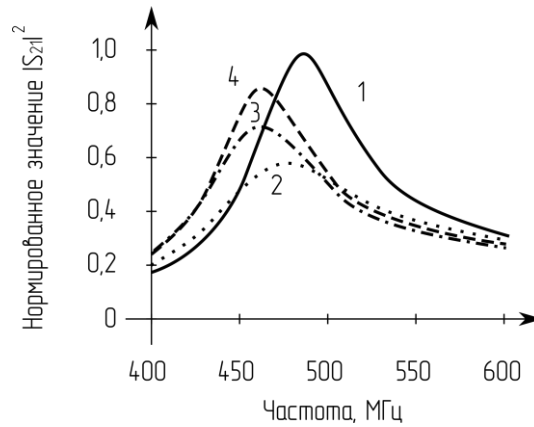


Рисунок 2.13 – Амплитудно-частотные характеристики микрополоскового датчика для различных углов ориентации подмагничивающего поля  $H_0 = 9,6$  Э:

$$1 - \theta_H = 90^\circ, 2 - 85^\circ, 3 - 70^\circ, 4 - 0^\circ$$

Для определения коэффициента преобразования исследуемого датчика магнитное поле сигнала  $h_s$  направлено вдоль проводника ( $\theta_s = 0^\circ$ ). На рисунке 2.14 представлена зависимость нормированного на максимальную величину коэффициента преобразования от постоянного подмагничивающего поля  $H_0$ , приложенного под углом  $\theta_H = 90,5^\circ$ . Видно, что положение максимума коэффициента преобразования соответствует полю анизотропии ТМП  $H_k = 8$  Э, и это хорошо согласуется с установленным экспериментально фактом в работе [79]. Важно отметить, что для уменьшения шумов в реальном датчике смещающее магнитное поле должно быть больше поля анизотропии примерно на 20% [79].

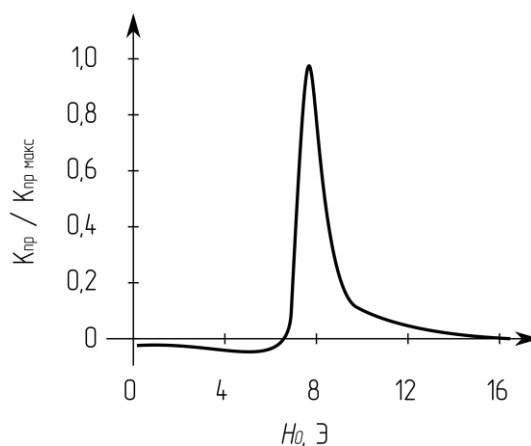


Рисунок 2.14 – Зависимость коэффициента преобразования от величины поля подмагничивания  $H_0$  для  $\theta_H = 90,5^\circ$

Поведение амплитудно-частотных характеристик, представленных на рисунке 2.14, позволяет предположить, что под действием измеряемого магнитного поля  $h_s$  изменение магнитной проницаемости ТМП приведет к одновременному сдвигу резонансной частоты и изменению добротности резонатора. Поэтому коэффициент преобразования датчика будет существенно зависеть от выбранной частоты возбуждения чувствительного элемента датчика.

На рисунке 2.15 (кривая 1) представлена зависимость нормированного на максимальную величину коэффициента преобразования датчика  $K_{np} / K_{max}$ , построенная от угла направления поля подмагничивания  $\theta_H$ , при его величине  $H_0 = 10$  Э и частоте возбуждения  $f = 510$  МГц. Видно, что на зависимости существуют два ярко выраженных экстремума при определенных углах направления подмагничивающего поля. Этот результат также хорошо согласуется с результатами измерений датчика слабых магнитных полей, представленных в работе [79].

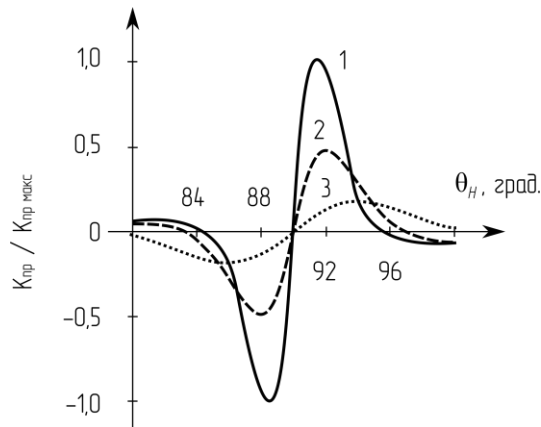


Рисунок 2.15 – Зависимости нормированных коэффициентов преобразования датчика от угла направления поля подмагничивания, построенные при  $H_0 = 10$  Э для различных значений угловой дисперсии одноосной магнитной анизотропии  $\delta\theta_k$ :

$$1 - \delta\theta_k = 0^\circ, 2 - 2^\circ, 3 - 5^\circ$$

Как известно, в ТМП наблюдаются неоднородности магнитных характеристик по их площади, связанные с неоднородностями поверхности подложек и технологическими особенностями получения пленок [41–44]. Представленный в работе расчет позволяет проводить исследования влияния неоднородностей магнитных параметров пленок на характеристики датчика. В частности, проведены исследования влияния амплитудной и угловой дисперсии поля одноосной магнитной анизотропии, характеризуемой нормальным законом распределения, на коэффициент преобразования датчика. Как и следовало ожидать, с ростом амплитудной и угловой дисперсии поля анизотропии коэффициент преобразования датчика монотонно уменьшается, причем угловая дисперсия оказывает более сильное влияние на  $K_{np}$ .

Увеличение угловой дисперсии анизотропии  $\delta\theta_k$  от  $0^\circ$  до  $1^\circ$  уменьшает максимальное значение коэффициента преобразования более чем в два раза (рисунок 2.15), а при  $\delta\theta_k = 5^\circ$  коэффициент преобразования уменьшается более чем в пять раз. Необходимо отметить, что амплитудная дисперсия одноосной магнитной анизотропии сравнительно большой величины  $\delta H_k = 2 \text{ Э}$  приводит к уменьшению коэффициента преобразования меньше, чем на 20%.

### **2.2.3 Заключение по результатам теоретического исследования модели микрополоскового датчика слабых магнитных полей**

Разработана одномерная модель миниатюрного датчика слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП, которая позволила в квазистатическом приближении получить необходимые формулы для численного расчета рассмотренной конструкции. Расчет позволяет теоретически проводить исследования влияния различных конструктивных параметров датчика, в том числе и параметров магнитной пленки, на характеристики устройства. Учитывая большое количество параметров микрополосковой структуры и магнитной пленки, влияющих на характеристики датчика, такие исследования необходимы для оптимизации его конструкции с целью достижения предельно высоких характеристик.

Правомерность использования квазистатического приближения при расчете одномерной модели датчика доказывается, во-первых, совпадением резонансной частоты рассмотренной конструкции с измеренной резонансной частотой на экспериментальном образце с идентичными конструктивными параметрами [79]. Во-вторых, рассчитанной зависимостью коэффициента преобразования датчика, построенной от угла направления постоянного поля подмагничивания, показывающей два ярко выраженных экстремума при определенных углах, что также хорошо согласуется с результатами измерений, представленных в работе [79]. В-третьих, экспериментально установленным фактом в работе [79] о том, что максимальный коэффициент преобразования наблюдается в подмагничивающем поле, близком к полю одноосной магнитной анизотропии, что и подтверждено теоретически.

Теоретический расчет позволил исследовать влияние угловой и амплитудной дисперсии одноосной магнитной анизотропии ТМП, характеризуемой нормальным законом распределения, на характеристики датчика. Показано, что с ростом амплитудной и угловой дисперсии поля анизотропии коэффициент преобразования датчика монотонно уменьшается, причем угловая дисперсия оказывает более сильное влияние на  $K$ . Увеличение угловой дисперсии анизотропии  $\delta\theta_k$  от  $0^\circ$  до  $1^\circ$  уменьшает максимальное значение коэффициента

преобразования более чем в два раза (рисунок 2.15), а при  $\delta\theta_k = 5^\circ$  коэффициент преобразования уменьшается более чем в пять раз. Амплитудная дисперсия одноосной магнитной анизотропии сравнительно большой величины  $\delta H_k = 2 \text{ Э}$  приводит к уменьшению коэффициента преобразования меньше, чем на 20%.

### 2.3 Характеристики разработанных датчиков слабых магнитных полей

К наиболее значимым характеристикам датчиков на основе микрополоскового резонатора с ТМП могут быть отнесены: диапазон измеряемых полей; линейность датчика, наличие гистерезиса; дрейф нуля, кратковременная и долговременная стабильность нуля; частотный диапазон работы датчика; спектральная плотность амплитуды шумов на выходе датчика, приведенная к единицам измерения магнитного поля; зависимости основных параметров датчика от температуры, влажности, ударных и вибрационных воздействий, радиации; стойкость к внешним постоянным и импульсным магнитным воздействиям, в том числе с амплитудой, превышающей максимально измеряемую; стойкость к воздействию полей, направленных ортогонально оси чувствительности датчика; стойкость к воздействию полей с большим градиентом; стойкость к внешним электромагнитным воздействиям – влияние электростатических полей и радиочастотных помех; создаваемые датчиком электромагнитные помехи; рабочий диапазон температур; габариты и масса; энергопотребление, требования к источнику питания; надежность; стоимость.

Верхняя граница *диапазона измеряемых полей* датчиков находится около  $10^{-4}$  Тл, что обусловлено малыми величинами поля анизотропии наиболее часто используемых ТМП, как правило,  $H_k$  лежит в диапазоне от 4 до 15 Э. При необходимости могут быть использованы ТМП с более высокими значениями  $H_k$ , реализуемое на практике увеличение верхнего предела измерений ограничивается  $10^{-3}$  Тл. Таким образом, датчики не предназначены для измерения сильных и сверхсильных магнитных полей, но могут быть использованы для измерения слабых магнитных полей в геофизическом поле. Нижний предел диапазона измеряемых полей ограничен *шумами измерительного преобразователя*. На низких частотах в спектре выходного сигнала присутствует фликкер-шум (шум вида  $1/f$ ), на частотах более  $10^4$  Гц – тепловой шум с равномерным спектром. Спектральная плотность амплитуды шума лучших преобразователей на высоких частотах не превышает  $10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>. Теоретический предел чувствительности ограничен шумами ТМП. Необходимо отметить, что применение корреляционных алгоритмов обработки сигналов позволяет проводить измерения сигналов с уровнем ниже собственных шумов датчиков.

*Линейность датчика* определяется по уровню интермодуляционных искажений. При реализации датчика с компенсационным методом измерений уровень побочных составляющих не превышает минус 60 дБн. На практике уровень искажений определяют по уровню интермодуляционных искажений третьего порядка двухчастотным методом. *Гистерезис* может быть вызван перемагничиванием радиоэлементов или составляющих магнитной системы датчика (например, если в составе системы формирования постоянного магнитного поля смещения  $H_{см}$  присутствуют магнитомягкие материалы).

*Дрейф нулевого значения* на выходе измерительного преобразователя в краткосрочной перспективе вызван низкочастотными шумами электрорадиоизделий (ЭРИ): фликкер-шумом сопротивлений; равновесным и неравновесным шумом полупроводниковых элементов. На долговременную стабильность нулевого значения влияют следующие факторы: стабильность параметров ЭРИ в зависимости от внешних факторов (температура, влажность, механические воздействия) и временная деградация их характеристик; наличие магнитных материалов в конструкции. Большинство современных радиоэлементов – резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов – содержат в своем составе магнитные материалы, которые перемагничиваются под воздействием геофизического и других полей, что может быть причиной изменения основных параметров датчиков, в том числе и дрейфа нуля. Кроме этого, наличие магнитных компонентов в составе датчиков значительно ухудшает *стойкость к внешним постоянным и импульсным магнитным воздействиям*. При разработке низкочастотных датчиков слабых магнитных полей по возможности используют ЭРИ, изготовленные без применения магнитных материалов.

Верхняя граница *частотного диапазона* работы датчиков определяется следующими факторами: частотой поля возбуждения  $H_{ВЧ}$  и АЧХ компенсационной цепи. Оптимальное значение частоты  $H_{ВЧ}$  пропорционально величине поля анизотропии ТМП, поэтому для датчиков с верхней граничной частотой выше 100 МГц необходимо выбирать ТМП с большими значениями  $H_k$  – более 20 Э. Высокочастотные датчики изготавливаются без цепей компенсации. На практике реализация датчиков на частоты до 100 МГц не представляет сложности. Нижняя граница частотного диапазона датчиков – 0 Гц, т. е. данные измерительные преобразователи могут использоваться для измерения квазистационарных магнитных полей. Существенным отличием датчиков от индукционных преобразователей является возможность измерения слабых низкочастотных полей частотного диапазона  $10^{-3}$ – $10^4$  Гц при меньших габаритных размерах и массе.

В конструкции датчиков отсутствуют движущиеся механические устройства и трущиеся детали, что позволяет осуществлять заливку приборов эпоксидными компаундами в целях

создания монолитной конструкции и защиты от внешних воздействий. На практике возможно создание датчиков, выдерживающих *ударные перегрузки* не менее 1000 g и долговременные *статические перегрузки* не менее 1 тс с полным сохранением работоспособности во время и после воздействий. Малые размеры монолитной конструкции позволяют получить высокие показатели *виброустойчивости* и *вибропрочности* датчиков. Границы *температурного диапазона* работы датчиков на ТМП главным образом определяются используемой элементной базой и достигают значений от минус 40 до 85 °С.

Вопросы *электромагнитной совместимости* датчиков разделяются на две части: электромагнитная чувствительность элементов измерительного преобразователя и создаваемое датчиками электромагнитное излучение. Так как активный элемент датчика помещается в резонатор, внешнее электромагнитное воздействие на частоте резонанса приводит к модуляции сигнала возбуждения. Частоты возбуждения датчиков выбирают в том числе по критерию отсутствия внешних источников помех в рабочем диапазоне. Мощность СВЧ-возбуждения датчиков может достигать 30 дБм, в этом случае датчик является мощным источником помех для окружающей аппаратуры, что необходимо учитывать при проектировании измерительного комплекса в целом. Например, при частоте возбуждения датчика в диапазоне 400–800 МГц кратные гармоники сигнала возбуждения могут попадать в диапазоны работы высокочувствительных приемников спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Излучение СВЧ-сигнала датчиком является демаскирующим фактором в системах специального применения. При необходимости датчик помещают в электромагнитный экран, частотная зависимость степени затухания которого рассчитывается исходя из требований пропускания сигналов в рабочем диапазоне частот датчика и ослабления высокочастотных сигналов.

*Габаритные размеры и масса* датчиков могут быть значительно уменьшены при реализации в едином цикле технологии создания многослойной структуры, состоящей из ТМП, компенсационной катушки и элементов магнитной системы. Практический предел уменьшения размеров датчика определяется минимальными требованиями к коэффициенту преобразования датчика и, соответственно, к рабочему объему активного элемента. Возможна реализация датчика в виде микросборки или интегральной схемы. Размеры разработанных малогабаритных датчиков не превышают 20x30x15 мм при массе не более 10 г.

К *источникам питания* датчиков предъявляются особые требования по низким шумам, так как в простейшем случае напряжение питания напрямую подается на СВЧ-генератор возбуждения, амплитудно-фазовые шумы на выходе которого существенно зависят от чистоты питающего напряжения. При питании от батарей допустимо подавать нестабилизированное

напряжение напрямую на датчик. В случае наличия в измерительном комплексе линейных и особенно импульсных преобразователей напряжения, питающее напряжение датчика необходимо фильтровать активными и пассивными ФНЧ. Для специализированных применений существует возможность создания датчиков с *энергопотреблением* менее 10 мВт.

Дополнительная *надежность* датчиков обеспечивается минимизацией числа используемых ЭРИ: минимальное число активных компонентов – один транзистор генератора СВЧ; пассивных компонентов – около десяти (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диод АД). Единичный отказ любого компонента приводит к неработоспособности датчика, что при необходимости может быть компенсировано введением в измерительную систему нагруженных или ненагруженных резервных измерительных элементов, в зависимости от требований к непрерывности процесса измерений.

Низкая *стоимость* датчиков обусловлена простотой конструкции, малым количеством ЭРИ, отсутствием дорогостоящих материалов и простотой массового серийного производства чувствительных элементов – ТМП и резонаторов.

В таблице 2.1 приведены характеристики разработанного однокомпонентного магнитометра на основе микрополоскового резонатора с ТМП. Для сравнения приводятся характеристики одного из лучших феррозондовых магнитометров Bartington Mag-13MCL100 [66].

Таблица 2.1 – Характеристики разработанного магнитометра на основе микрополоскового преобразователя с ТМП

Характеристика	Магнитометр на ТМП (однокомпонентный)	Феррозонд Mag-13MCL100 (трехкомпонентный)
Диапазон полей – нижняя граница – верхняя граница	$10^{-13}$ Тл $10^{-4}$ Тл	$10^{-12}$ Тл $10^{-4}$ Тл
Частотный диапазон – нижняя частота – верхняя частота	$10^2$ Гц $10^6$ Гц	0 Гц $10^3$ Гц
Собственные шумы на частотах – $10^0$ Гц – $10^1$ Гц – $10^2$ Гц – $10^4$ Гц и выше	$10^{-11}$ Тл/Гц <sup>1/2</sup> $3 \cdot 10^{-12}$ Тл/Гц <sup>1/2</sup> $10^{-12}$ Тл/Гц <sup>1/2</sup> $10^{-13}$ Тл/Гц <sup>1/2</sup>	$6 \cdot 10^{-12}$ Тл/Гц <sup>1/2</sup>
Рабочий диапазон температур	от минус 40 до 70 °С	от минус 40 до 70 °С
Напряжение питания	$\pm 12$ В $\pm 10\%$	от $\pm 12$ В до $\pm 17$ В
Энергопотребление	менее 1 Вт	менее 1,5 Вт
Габариты	60x40x40 мм	Ø 25x225 мм
Масса	менее 100 г	83 г

Стоит отметить, что максимально достижимые значения характеристик датчиков на основе ТМП не ограничиваются значениями, приведенными в таблице 2.1. В лаборатории ЭДСВЧЭ Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН налажен непрерывный процесс улучшения свойств ТМП и характеристик датчиков на их основе.

#### 2.4 Исследование и оптимизация параметров датчиков слабых магнитных полей

При практической реализации датчиков слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП возникает необходимость в их оптимальной настройке с точки зрения конкретной области применения, например, для получения максимального коэффициента преобразования чувствительного элемента  $K_{np}$  или широкой полосы частот. При настройке датчика для вывода его в рабочий режим необходимо зафиксировать следующие параметры:

- Частота возбуждения поля  $H_{BЧ}$ . Измерительный преобразователь с ТМП является резонансной системой, частота резонанса которой определяется емкостью резонатора и индуктивностью микрополосковой линии. Частоту СВЧ-генератора настраивают по максимуму постоянного напряжения на выходе АД (одного из АД, если их несколько). В датчиках с двумя резонаторами используют дополнительные подстроечные конденсаторы для точной индивидуальной подстройки резонаторов. Частотный диапазон СВЧ-генератора определяется на основе экспериментальных измерений характеристик ТМП, например, для ТМП нестрикционного состава  $Ni_{80}Fe_{20}$  – от 600 до 800 МГц. Элементы согласования генератора СВЧ с резонатором выбираются исходя из требования передачи максимальной мощности в резонатор.

- Мощность возбуждения резонатора. С увеличением мощности возбуждения  $K_{np}$ , как правило, возрастает (результаты исследований приведены в приложении А). На практике мощность возбуждения не превышает плюс 30 дБм, так как величина поля  $H_{BЧ}$  становится сравнимой с величиной поля анизотропии ТМП.

- Направление поля  $H_{см}$  (угол  $\alpha$ ) выбирают по максимуму  $K_{np}$  при фиксированных значениях амплитуды поля  $H_{см}$ , частоты и мощности возбуждения  $H_{BЧ}$  (результаты исследований приведены в приложении Б).

- Величина поля  $H_{см}$ . Максимальное значение  $K_{np}$  наблюдается при  $H_{см} \approx H_k$ , однако этот режим характеризуется высоким уровнем шума и явлением гистерезиса, поэтому на практике выбирают  $H_{см} \approx (1,1-1,2) \cdot H_k$  (результаты исследований приведены в приложении В).



– Угол  $\gamma$  между полем возбуждения  $H_{ВЧ}$  и ОТН. Как правило,  $\gamma = 0^\circ$  и зависимости  $K_{np}$  от угла  $\alpha$  симметричны (результаты исследований зависимости  $K_{np}$  от угла  $\gamma$  приведены в приложении Л).

В приложении А приведены результаты экспериментальных исследований зависимостей коэффициента преобразования датчика  $K_{np}$  от мощности возбуждения чувствительного элемента. На рисунке 2.16 показана нормированная зависимость значения  $K_{np}$  от мощности возбуждения резонатора с ТМП при постоянном поле смещения  $H_{см} \approx H_k$ . Как видно из результатов измерений, величина оптимального угла  $\alpha$  зависит от величины мощности возбуждения, что особенно сильно проявляется при полях  $H_{см}$  близких к  $H_k$ .

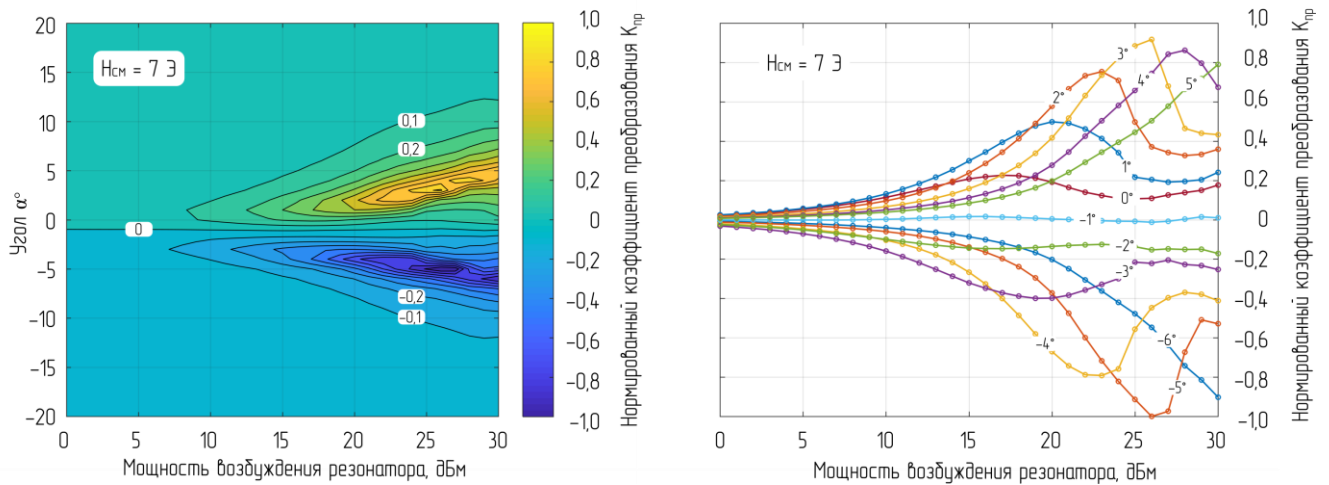


Рисунок 2.16 – Экспериментальная нормированная зависимость значения  $K_{np}$  от мощности возбуждения резонатора с ТМП при поле  $H_{см} \approx H_k$  (приложение А)

Необходимо отметить, что проведение измерений для мощности возбуждения более 20 дБм затруднительно, так как при изменении в широких диапазонах угла  $\alpha$  и величины поля  $H_{см}$  значительно изменяется комплексная магнитная проницаемость, вносимая в колебательный контур пленкой, что нарушает согласование измерительной системы с СВЧ-генератором. Эта особенность учитывается при проектировании СВЧ-генератора датчиков: условия самовозбуждения генератора и его устойчивая работа обеспечиваются при изменении вносимого комплексного сопротивления в рабочем диапазоне датчика.

На рисунке 2.17 показаны экспериментальные зависимости значения  $K_{np}$  от угла  $\alpha$  при различных значениях поля  $H_{см}$  (приложение Б). Как видно из рисунка, погрешность установки угла  $\alpha$  при настройке датчика для получения максимального значения  $K_{np}$  должна быть менее  $1^\circ$ , что учитывается при конструировании магнитной системы датчика: магнитная система размещается на вращающемся основании с возможностью плавного изменения угла и надежной фиксацией в необходимом положении.

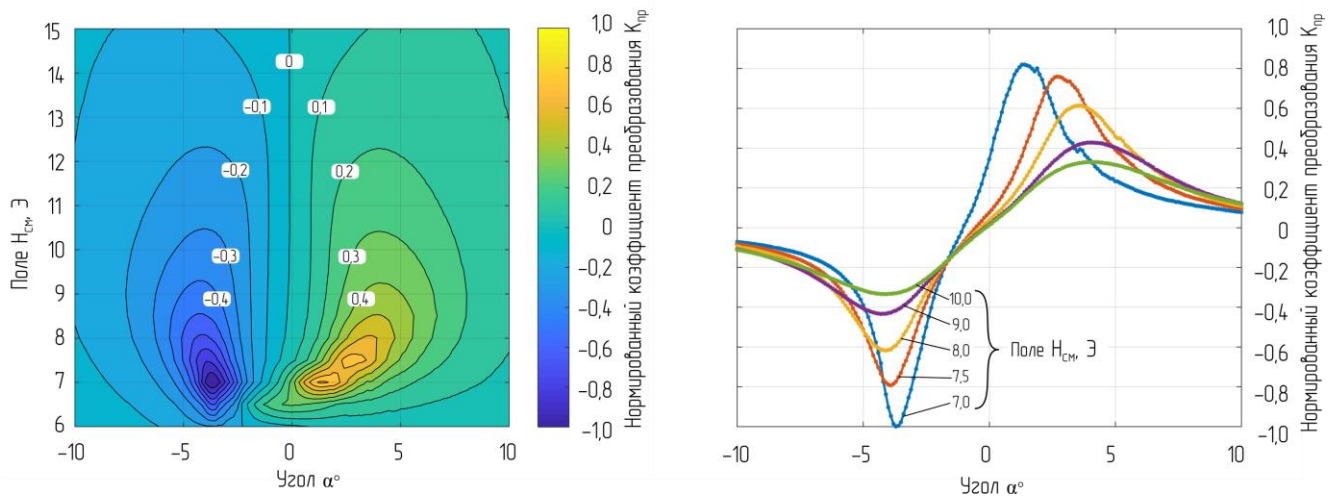


Рисунок 2.17 – Экспериментальные нормированные зависимости значения  $K_{пр}$  от угла  $\alpha$  при различных значениях поля  $H_{см}$  (приложение Б)

На рисунке 2.18 показаны результаты экспериментальных зависимостей значения  $K_{пр}$  от поля  $H_{см}$  при различных углах  $\alpha$  (приложение В). В конструкциях датчиков предусматривается возможность плавной регулировки величины постоянного поля смещения  $H_{см}$  путем изменения расстояния между магнитной системой и ТМП. Механизм регулировки обеспечивает изменение величины поля  $H_{см}$  в рамках разброса характеристик ТМП при напылении.

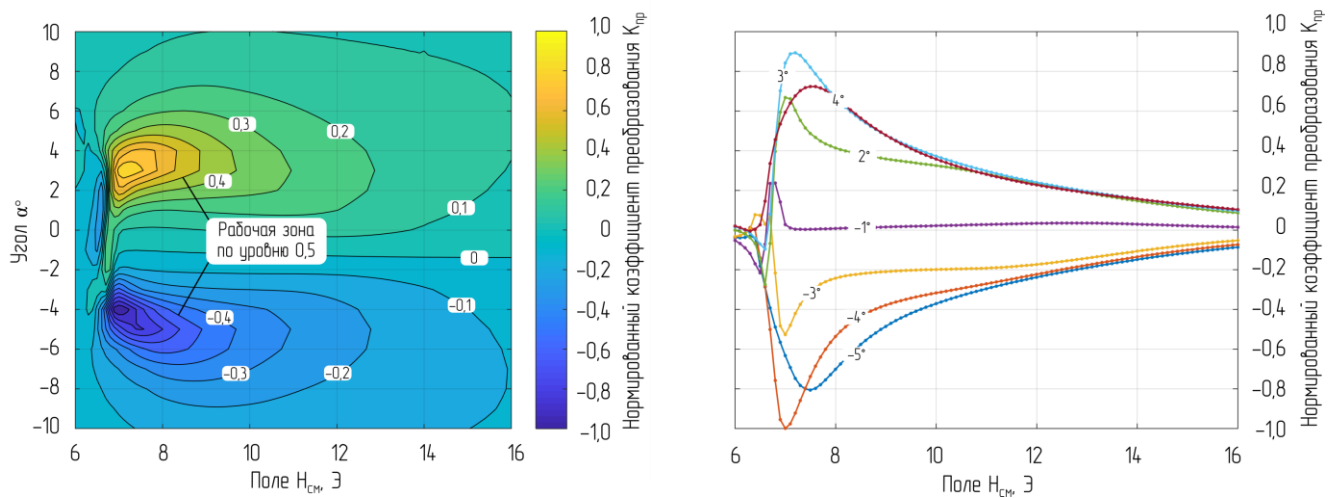


Рисунок 2.18 – Экспериментальные нормированные зависимости значения  $K_{пр}$  от величины поля  $H_{ВЧ}$  при различных углах  $\alpha$  (приложение В)

Одной из важных характеристик компонентного магнитометрического преобразователя является диаграмма направленности (рисунок 2.19). Направление максимальной чувствительности датчиков перпендикулярно положению магнитного момента, поэтому изменение параметров работы магнитометра (угла  $\alpha$ , величины поля  $H_{см}$ ) приводит к вращению диаграммы направленности.

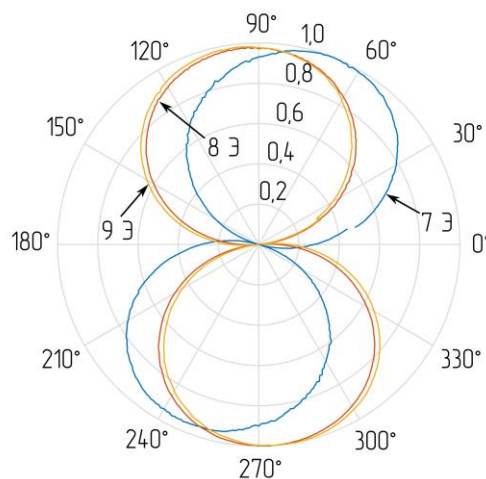


Рисунок 2.19 – Диаграмма направленности датчика на ТМП при различных величинах поля  $H_{см}$

При величинах поля  $H_{см} > H_k$  направление максимальной чувствительности датчиков примерно соответствует ОЛН ТМП.

Шумовые характеристики настроенных магнитометрических преобразователей подлежат обязательному измерению при проведении выходного контроля устройств. Зависимости получают с использованием низкочастотного высокочувствительного анализатора спектра в диапазоне частот от  $10^{-3}$  до  $10^5$  Гц и выше (в зависимости от требований ТЗ). Измерения проводятся в экранированной комнате, датчики и источники питания размещаются в многослойном магнитном экране из пермаллоя. На рисунке 2.20 показаны результаты измерений шумов разработанного магнитометра. Для сравнения приведены шумы трехкомпонентного малозумящего феррозондового магнитометра Bartington Mag-13MCL100 [66]. На частоте 1 Гц феррозондовый преобразователь имеет примерно вдвое меньшие шумы (около 5 пТл/Гц<sup>1/2</sup>); на частотах выше  $10^2$  Гц чувствительность разработанного магнитометра превышает чувствительность феррозонда. Верхняя граница диапазона частот феррозондового преобразователя – 3 кГц, на этой частоте шумы тонкопленочного магнитометра примерно на порядок меньше.

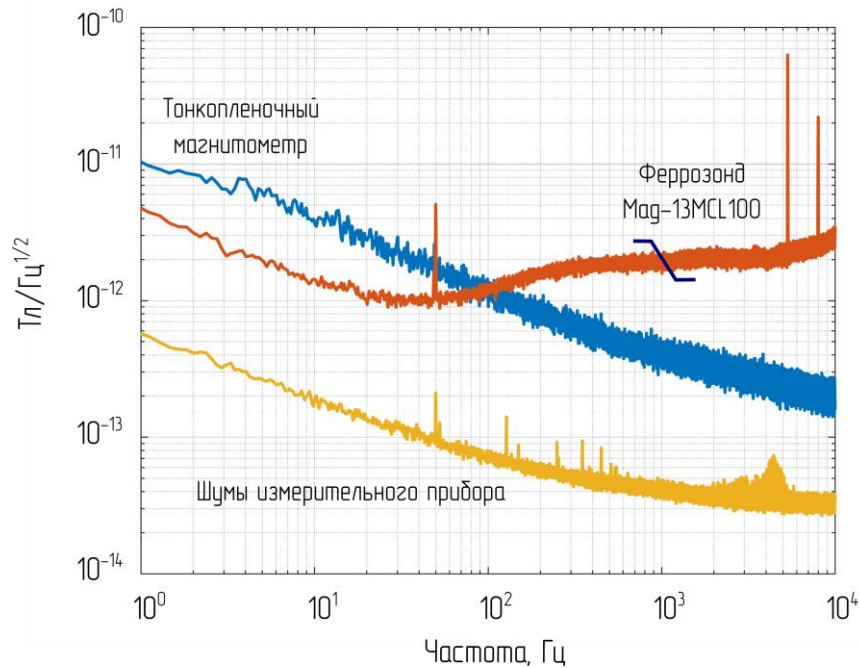


Рисунок 2.20 – Результаты экспериментальных измерений собственных шумов магнитометра на ТМП

Коэффициенты преобразования феррозондового магнитометра и разработанного магнитометра на ТМП одинаковые – 10 В/Э. На рисунке 2.20 кроме шумов магнитометрических преобразователей показаны собственные шумы измерительного прибора. На частотах от  $10^4$  до  $10^6$  Гц наблюдается равномерный спектр шумов тонкопленочного магнитометра с уровнем около  $10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>.

## 2.5 Аппаратное и программное обеспечение датчиков слабых магнитных полей

Для преобразования аналоговых сигналов с выходов датчиков разработана плата аналого-цифрового преобразования с сигма-дельта АЦП разрядностью 24 бита, управляющим микроконтроллером (МК) и набором интерфейсов (RS-232/422/485, USB, Ethernet). Программное обеспечение со стороны ПК написано с использованием кроссплатформенной программной платформы, позволяющей запускать ПО на различных операционных системах. На рисунке 2.21 показан внешний вид программы, принимающей данные от однокомпонентного магнитометра, вращаемого в поле Земли [103].

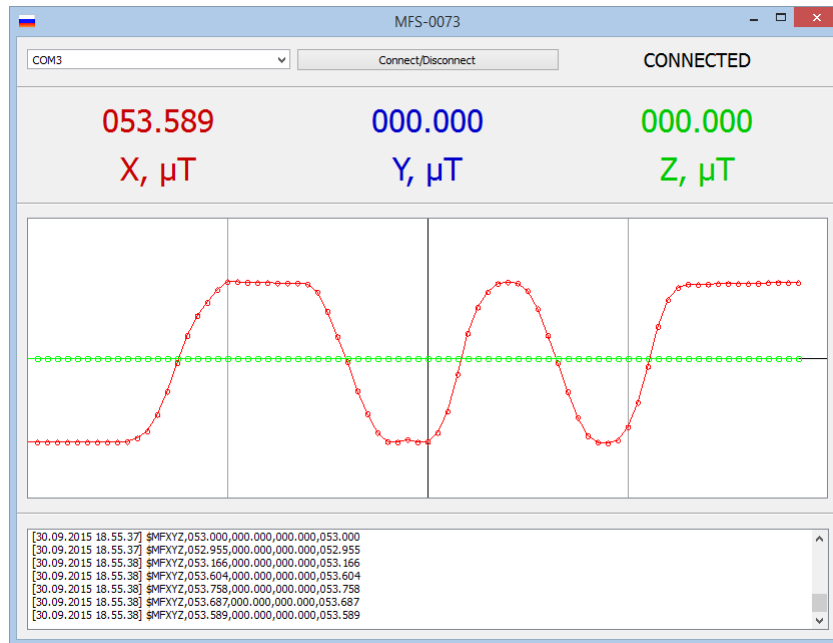


Рисунок 2.21 – Программное обеспечение приема и визуализации информации с датчиков магнитного поля на ТМП

В примере, показанном на рисунке 2.21, измерения передаются с частотой 5 Гц в текстовом формате. Формат передаваемого кадра в общем случае предусматривает возможность измерения трех компонент поля: « $\$MFXYZ,FX,FY,FZ,M$ », где  $FX$ ,  $FY$ ,  $FZ$  – составляющие поля вдоль осей датчика  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно;  $M$  – модуль вектора. В случае однокомпонентного датчика передается только составляющая  $FX$ . Встроенное программное обеспечение МК датчика позволяет производить калибровку нулевых значений и коэффициентов преобразования по осям, для этого датчик по специальным командам вводит в режим калибровки и вращают в однородном магнитном поле. Корректирующие коэффициенты рассчитываются внутри МК и заносятся в энергонезависимую память.

Для проведения полевых испытаний датчиков, в том числе трехкомпонентных, разработан специализированный автономный измерительный комплекс, в состав которого входят: система автономного питания от аккумуляторных батарей с возможностью формирования питающих напряжений измерительных преобразователей, устройств захвата, обработки, хранения и передачи сигналов; плата захвата сигналов (плата АЦП) с трехкомпонентных датчиков в режиме реального времени; плата цифровой обработки сигналов в режиме реального времени; вычислитель на базе UNIX-подобной операционной системы; приемник сигналов СРНС для автоматической фиксации времени и места проведения измерений; Ethernet маршрутизатор, коммутатор, точка доступа Wi-Fi.

На рисунке 2.22 показан вид автономного измерительного комплекса без верхней крышки.

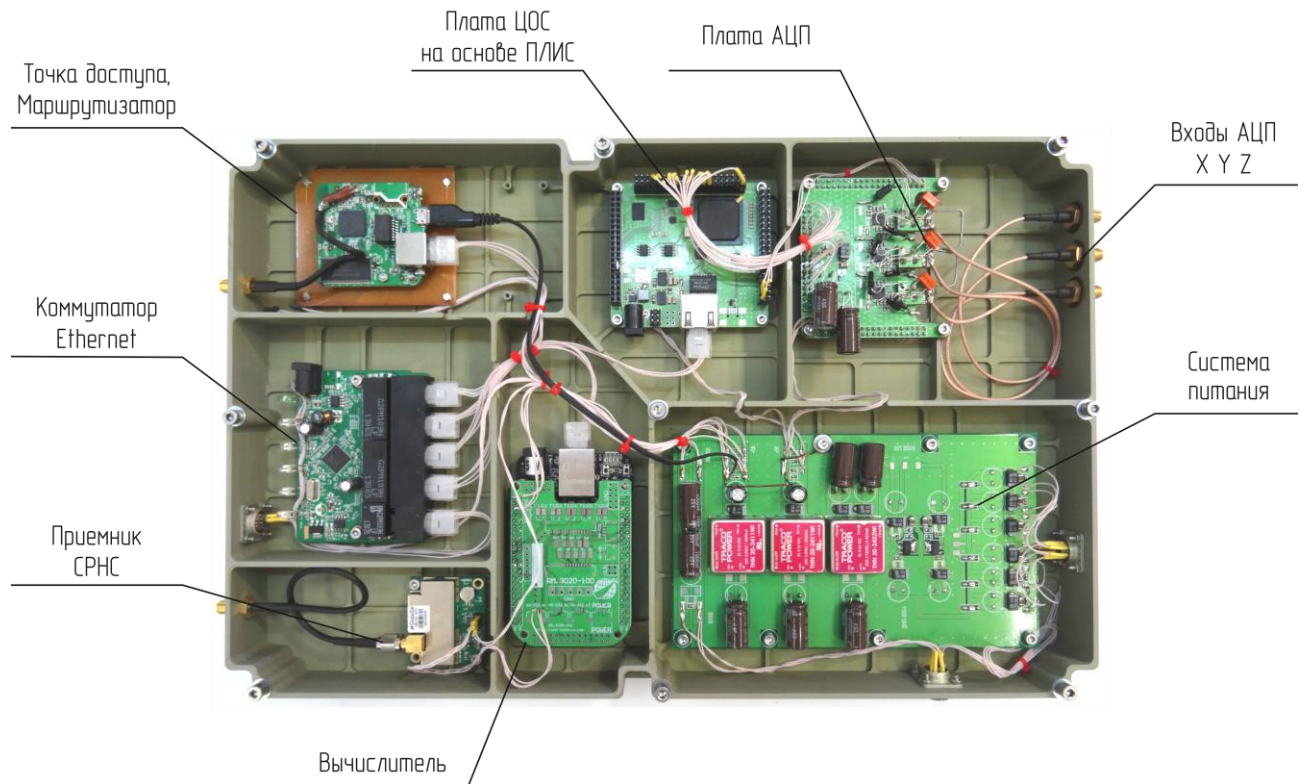


Рисунок 2.22 – Автономный измерительный комплекс

Обмен данными между платой ЦОС и вычислителем осуществляется по интерфейсу Ethernet. Наличие точки доступа Wi-Fi позволяет контролировать работу измерительного комплекса на расстояниях до 50 м, не оказывая влияния на результаты измерений. Работа системы в режиме реального времени дает возможность автоматической привязки измерений по координатам и времени с использованием приемника сигналов СРНС.

## 2.6 Применение датчиков слабых магнитных полей

Датчики слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП являются универсальными магнитометрическими устройствами, которые могут использоваться при решении самых разнообразных научно-технических задач как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Высокая чувствительность датчиков дает возможность использования их в задачах геомагнитометрии при изучении геологического строения Земли и для поиска полезных ископаемых. Широкая полоса пропускания датчиков позволяет регистрировать



широкополосные отклики на ступенчатые воздействия при реализации индуктивных методов электроразведки, например, различных модификаций метода переходных процессов. Малые габариты и масса, а также низкая стоимость позволяют устанавливать внутри магнитной петли большое количество трехкомпонентных датчиков и одновременно снимать показания, что значительно повышает качество измерений.

Возможность измерения высокочастотных магнитных полей и широкополосных сигналов, а также линейная АЧХ датчиков на ТМП позволяют использовать их в качестве малогабаритных высокочувствительных приемных устройств систем магнитной передачи информации.

В таблице 2.2 приведены возможные сферы применений датчиков и предъявляемые к ним требования.

Таблица 2.2 – Сферы применений датчиков на основе микрополоскового резонатора с ТМП и предъявляемые к ним требования

Тип датчика	Сфера применения	Предъявляемые требования
Прецизионный	Лабораторные измерения Навигационно-измерительные системы Бесконтактные датчики тока	Высокая линейность Долговременная стабильность параметров
Высокочувствительный	Геофизические измерения Биомагнетизм	Низкий уровень шума
Высокочастотный	Системы локации, навигации и связи	Работа на высоких частотах
Широкополосный	Устройства импульсной локации Системы широкополосной локации, навигации и связи	Стабильность параметров в широкой полосе частот
Высоконадежный	Системы специального назначения Космические системы	Высокая надежность Простое исполнение
Малопотребляющий	Устройства с батарейным питанием Системы большой автономности Охранные системы	Малая мощность потребления Низкое напряжение питания Однополярное питание
Малогабаритный	Охранные системы N-мерные измерительные решетки Магнитная томография	Малые габариты и масса

### 2.6.1 Электромагнитные геофизические исследования

Измерение естественного магнитного поля Земли (магнитная съемка, магнитная разведка) позволяет установить геологическую природу областей с аномальными отклонениями намагниченности по отношению к вмещающим породам [7, 8]. Магнитная разведка (магниторазведка) – это геофизический метод решения геологических задач, основанный на изучении магнитного поля Земли и его изменений в пространстве, возникающих вследствие разной намагниченности горных пород. Качественная интерпретация результатов магнитных измерений возможна при проведении максимально доступного объема измерений и наличии

информации о геологическом строении местности, магнитных и плотностных свойствах пород. Магнитная съемка может быть наземной, в этом случае она проводится с помощью пешеходных магнитометров; при наличии водоемов и рек магнитометрическое оборудование устанавливается на немагнитном буксируемом судне (рисунок 2.23, а).



Рисунок 2.23 – Использование магнитометров на ТМП в задачах магнитной разведки:

а – немагнитная буксируемая лодка для измерений на воде,

в которой установлены квантовый магнитометр и разработанный магнитометр на ТМП;

б – малый БПЛА мультироторного типа с штангой градиентометра на ТМП

Быстрое покрытие больших территорий возможно при установке магнитометров на борт летательного аппарата. Аэромагнитометрия позволяет производить комплекс измерений на различных высотах, что дает дополнительную информацию для анализа магнитных аномалий. Интересующая область при площадной съемке разбивается на сеть профилей с точками наблюдения. В каждой точке измеряется модуль или компоненты вектора магнитной индукции. Расстояние между профилями и точками определяется предполагаемыми размерами рудных тел и магнитных аномалий. При картировочно-поисковых магнитных съемках расстояние между профилями выбирается в диапазоне 200–500 м, расстояние между точками – не менее 50 м, что позволяет решать задачи крупномасштабного геологического картирования. Проведение поисково-разведочных работ позволяет детализировать аномалии картировочно-поисковых работ, профили удаляются на расстояния 50–200 м, а шаг наблюдений составляет 10–50 м. Дальнейшее уточнение данных магнитометрической съемки происходит при проведении детальных (разведочных) магнитных съемок, расстояния между профилями в этом случае может составлять 10–100 м, а между точками измерений – 5–20 м. Конкретные значения расстояний выбираются исходя из предполагаемых размеров рудных тел, глубины их залегания и намагниченности. Таким образом, наиболее информативным видом съемки является детальная съемка, но охват больших территорий в этом случае затрудняется большими



материальными и временными затратами. Значительно ускорить процесс измерений и снизить себестоимость магниторазведочных работ удастся при использовании малой беспилотной авиации (рисунок 2.23, б).

К магнитометрам, размещаемым на борту судна или БПЛА, предъявляются особые требования, например, широкий диапазон частот, необходимый для корректной цифровой обработки сигналов датчиков компонент магнитного поля. В процессе передвижения носителя возникают вибрации, передаваемые на корпус магнитометрического преобразователя. Ширина полосы пропускания датчика и частота дискретизации АЦП должны выбираться исходя из условий отсутствия явления наложения высокочастотных спектральных составляющих магнитного поля, вызванных вибрационными эффектами, согласно теореме отсчетов Котельникова. Невыполнение условий теоремы приведет к переносу высокочастотных спектральных составляющих в низкочастотную область, искажению данных и повышению уровня шумов. Фильтрация в аналоговом виде сигнала узкополосными ФНЧ от составляющих, вызванных вибрацией носителя, также нежелательна, так как в этом случае рассчитать корректно значение модуля и углов вектора магнитного поля по составляющим затруднительно в силу разной аналоговой реализации трех каналов ФНЧ. Отличительной особенностью разработанных датчиков в отличие, например, от индукционных преобразователей, является нечувствительность к электрическим полям и помехам, что особенно важно при компактной интеграции магнитометров в конструкцию БПЛА. Особое внимание при разработке магнитометрического комплекса уделяется калибровке магнитометра в составе носителя. В случае малогабаритных БПЛА разрабатывается калибровочный стенд, в котором размещается летательный аппарат с интегрированной магнитометрической системой. Калибровке подлежат: неортогональность осей векторного датчика; смещения нулевых значений по осям; коэффициенты преобразования.

Проведение электроразведочных работ с искусственным возбуждением среды позволяет осуществлять поиск и разведку рудных месторождений, прогнозировать месторождения углеводородов, а также решать разные задачи инженерной геологии, гидрогеологии, археологии и др. Одним из высокоинформативных методов электромагнитной разведки является метод переходных процессов [6].

Метод переходных процессов – это один из основных геофизических методов, в основе которого лежит изучение неустановившегося электромагнитного поля, являющегося откликом на искусственное импульсное электромагнитное поле, создаваемое импульсно изменяющимся током. Для исследования больших глубин с помощью этого метода необходимо увеличивать мощность накачки источника тока и увеличивать время наблюдения, повышать

чувствительность магнитометров. Метод зондирования становлением поля в ближней зоне основывается на методе переходных процессов и отличается большим временем наблюдения переходного процесса. Для возбуждения переходных процессов в среде необходимо сформировать импульсный сигнал в передающей (генераторной) петле.

В качестве импульса возбуждения могут использоваться дельта-импульс или чаще всего используемое на практике ступенчатое воздействие. Отклик среды на широкополосное воздействие регистрируется приемной петлей или специализированными высокочувствительными широкополосными магнитометрами. С течением времени после импульсного воздействия токи, затухая, проникают во все более глубокие слои – этот процесс называется становлением поля, а зависимость выходного сигнала магнитометра от времени – кривой становления поля. Использование классической приемной петли не позволяет регистрировать составляющие вектора магнитного поля, тогда как для повышения информативности метода необходимо регистрировать векторное значение магнитного поля во многих точках как внутри генераторной петли, так и снаружи. Приемники должны быть достаточно малогабаритными и иметь низкое энергопотребление для обеспечения высокой автономности при питании от батарей. К магнитометрическому преобразователю предъявляются следующие требования: широкий диапазон частот, не менее  $10^{-2}$ – $10^5$  Гц; уровень собственных шумов не более  $10^{-12}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> на частотах выше  $10^2$  Гц; малые габаритные размеры и масса; малое энергопотребление; низкая стоимость при серийном изготовлении.

Указанным требованиям в полной мере удовлетворяют разработанные датчики, главным отличием которых от других типов магнитометров является широкая полоса частот, в которой обеспечиваются низкий уровень собственных шумов и стабильный коэффициент преобразования. Проведенные геофизические измерения подтвердили на практике возможность широкого применения разработанных датчиков в области электромагнитных геофизических исследований.

### **2.6.2 Ближнепольные магнитные системы связи**

В большинстве практических применений для передачи информации через окружающее пространство используют электромагнитные колебания различных диапазонов длин волн. Для обеспечения связи с подземными и подводными объектами электромагнитные волны использовать затруднительно по следующим причинам [9–18]:

– Высокое затухание сигнала на трассе, вызванное сильными отражениями от неоднородностей и поглощением в грунте, горной породе, воде.

– Резкое изменение параметров канала связи при перемещении в пространстве и с течением времени, что вызвано значительным изменением состава грунта даже при малых перемещениях, а также связано с изменением погодных условий, например, с выпадением осадков. Как следствие, вероятность битовой ошибки может значительно изменяться при пространственных перемещениях объектов связи и с течением времени.

– Большие габаритные размеры антенн для низкочастотных диапазонов, так как эффективное излучение возможно только при создании полноразмерных антенн, что не соответствует современным требованиям к размерам и мобильности аппаратуры связи.

Ближнепольная магнитная связь (магнитно-индуктивная связь) позволяет решить проблемы, обусловленные изменениями параметров канала связи и большими размерами антенн. Коэффициент затухания магнитного поля в грунте или воде практически не отличается от значения для окружающего пространства, что позволяет использовать магнитное поле для передачи информации через эти среды без значительного изменения уровня сигнала при передвижении в пространстве и с течением времени. Магнитно-индуктивная связь не накладывает ограничений на размеры антенн, прием может осуществляться с использованием миниатюрных катушек индуктивности или специализированных датчиков магнитного поля. Габаритные размеры передающей катушки и чувствительность приемного датчика магнитного поля выбираются исходя из расчета бюджета канала связи.

Несмотря на слабое затухание магнитного поля в грунте и воде, общее затухание сигнала на трассе остается выше, чем затухание электромагнитной волны в свободном пространстве – мощность сигнала обратно пропорциональна шестой степени расстояния, что существенно ограничивает максимальную дальность связи. На рисунке 2.24 показана разработанная структурная схема цифровой системы ближнепольной магнитной связи [16].

При работе передатчика системы ближнепольной магнитной связи (рисунок 2.24) информация от источника данных в цифровом виде поступает через интерфейс на каналный кодер для повышения помехоустойчивости канала связи. Выходной сигнал с каналного кодера поступает на модулятор, формирующий комплексную огибающую сигнала с многочастотной модуляцией, которая переносится на несущую частоту квадратурным смесителем. Выходной сигнал квадратурного смесителя преобразуется в аналоговый вид цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП), после чего сигнал поступает на усилитель мощности (УМ). УМ [104, 105] формирует сигнал для передающей антенны [106–109], которая создает модулированное переменное магнитное поле в канале связи. Переменное магнитное поле регистрируется антенной приемника системы связи. Сигнал с выхода приемной антенны поступает на каскад автоматической регулировки усиления (АРУ), после чего аналого-

цифровым преобразователем (АЦП) выполняется преобразование сигнала в цифровой вид. Далее с выхода АЦП цифровой сигнал поступает на квадратурный смеситель, который переносит спектр сигнала на промежуточную частоту (ПЧ). Выходной сигнал квадратурного смесителя подается на демодулятор, выполняющий функции синхронизации и демодулирования сигнала с многочастотной модуляцией (МЧМ, OFDM). Выходной сигнал демодулятора поступает на каналный декодер, выходные данные которого посредством интерфейса в цифровом виде передаются потребителю (получателю информации). Сигнально-кодовая конструкция системы связи адаптивно изменяется в процессе работы системы связи, что в условиях большого динамического диапазона позволяет эффективно использовать спектральный и энергетический ресурс канала связи.

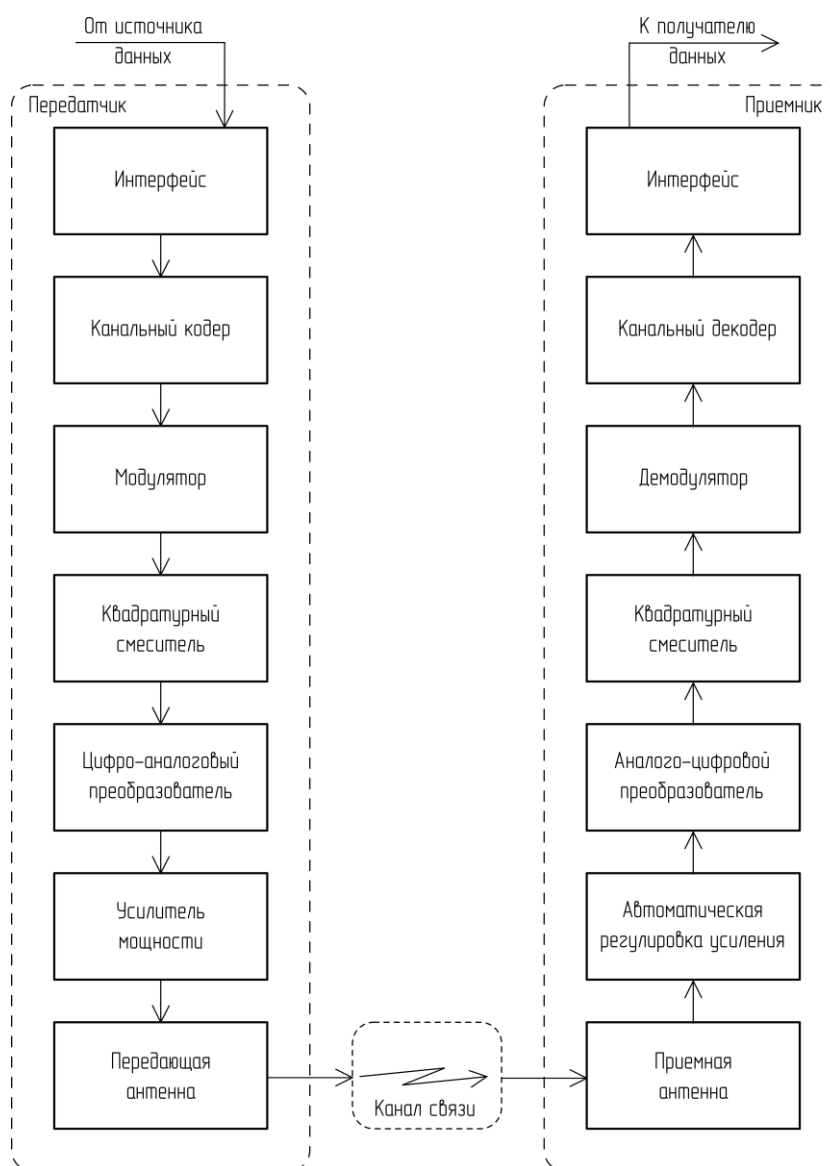


Рисунок 2.24 – Структурная схема ближнепольной магнитной системы связи

В целях подтверждения преимуществ ближнепольных магнитных систем связи для передачи информации в различных средах разработаны макеты передатчиков и приемников. Одной из задач при проведении испытаний было формирование точных требований к разрабатываемым датчикам на ТМП, используемым в качестве приемной антенны. Испытания систем связи проводились в промышленной зоне; лесном массиве; в пресном водоеме (рисунок 2.25); в морской воде (рисунок 2.26).

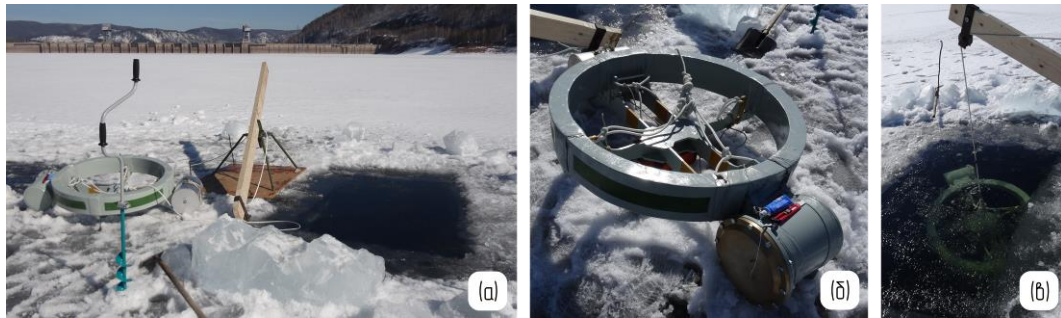


Рисунок 2.25 – Испытания ближнепольной магнитной системы связи в пресной воде (приложение Г): *а* – общий вид; *б* – передающая катушка перед включением питания и герметизацией; *в* – погружение передатчика системы связи в прорубь

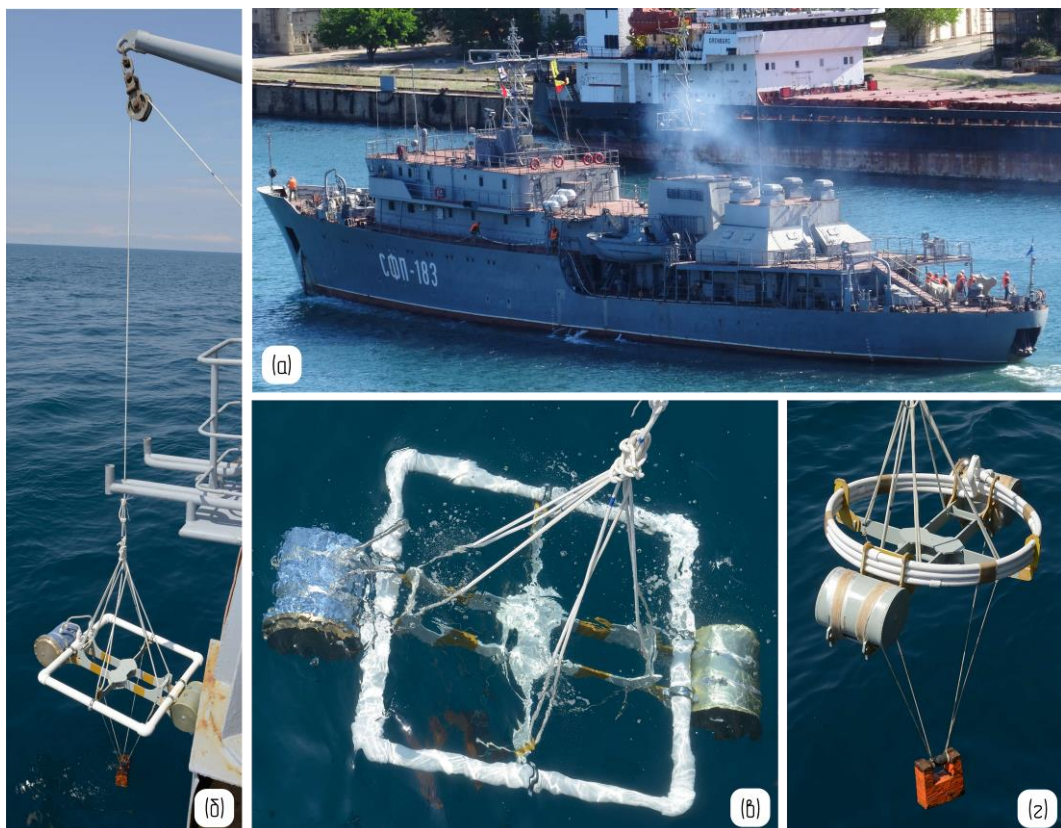


Рисунок 2.26 – Проведение испытаний системы ближнепольной магнитной связи в морской воде: *а* – судно «СФП-183» ЧФ; *б*, *в*, *г* – спуск и погружение передатчиков

По результатам испытаний сделаны следующие выводы. Ближнепольные магнитные системы связи могут быть использованы для передачи информации между мобильными абонентами в наземных, подземных и подводных условиях (пресная вода), например, при организации канала связи между спасательными группами в промышленной зоне; в пещерах; между водолазами. Практически реализуемая и оправданная дальность связи подобных мобильных систем – 100–200 м. При отсутствии жестких ограничений на размеры передающей антенны и потребляемую мощность передатчиком дальность связи может быть увеличена до 1 км, например, для передачи информации в шахты сверху вниз. Возможна передача информации на небольшие расстояния и в водоемах с высокой проводимостью, для этого следует использовать как можно более низкие частоты для уменьшения затухания сигнала на трассе.

Наиболее сложные условия эксплуатации ближнепольных магнитных систем связи наблюдаются в промышленной зоне и городских условиях. Большинство современных электроприборов имеют в своем составе импульсные преобразователи напряжения, которые являются мощными источниками широкополосных помех в диапазоне частот от единиц килоггерц до единиц мегагерц, т. е. в диапазоне работы ближнепольных систем связи. Данные помехи эффективно распространяются по линиям электрических сетей и излучаются в окружающее пространство. Важным преимуществом при использовании разработанных датчиков в качестве приемных антенн является нечувствительность к электрической составляющей электромагнитного поля, что значительно повышает помехозащищенность приемника системы связи. Кроме того, датчики имеют широкий диапазон частот, позволяя системе связи адаптивно перестраиваться по частоте в условиях изменяющейся помеховой обстановки, что совместно с режимом адаптивного изменения сигнально-кодовой конструкции значительно повышает эффективность системы в целом. Проведенные полевые испытания показали на практике, что разработанные конструкции магнитометров отвечают всем заявленным требованиям.

## **Выводы по главе 2**

### **Научная новизна:**

– Разработана и исследована новая конструкция магнитометра, содержащего малошумящий СВЧ-генератор, усилитель мощности, резонатор с ТМП, амплитудный детектор, операционный усилитель, компенсационную систему и магнитную систему формирования постоянного поля смещения. Особенностью конструкции является ориентация магнитных

полей: высокочастотное поле возбуждения направлено вдоль ОН магнитной пленки; постоянное поле смещения направлено под некоторым небольшим оптимальным углом  $\alpha$  к ОН; компенсационное поле направлено вдоль ОЛН; максимум чувствительности к измеряемому полю направлен примерно вдоль ОЛН. Принцип работы датчика существенно отличается от известных [86] конструкций: воздействие измеряемого поля приводит к изменению условий возбуждения ФМР в ТМП, что изменяет добротность резонатора и регистрируется амплитудным детектором.

– Разработана новая конструкция магнитометра, содержащего два резонатора с ТМП. Особенностью конструкции является включение резонаторов, позволяющее суммировать полезный сигнал с двух чувствительных элементов на операционном усилителе при частичной компенсации амплитудных шумов СВЧ-генератора.

– Разработана новая конструкция модуляционного магнитометра, предназначенного для измерения сигналов с постоянной составляющей. Особенности конструкции модуляционного датчика являются наличие модулирующего поля и ориентация магнитных полей: высокочастотное поле возбуждения направлено вдоль ОН ТМП; постоянное поле смещения направлено вдоль ОН; модулирующее поле направлено вдоль ОЛН; компенсационное поле направлено вдоль ОЛН; максимум чувствительности к измеряемому полю направлен вдоль ОЛН. При отсутствии измеряемого сигнала устройство работает в режиме удвоения частоты и в спектре сигнала амплитудного детектора отсутствует составляющая с частотой модулирующего поля. При появлении измеряемого поля рабочая точка датчика смещается, появляется составляющая с частотой модулирующего поля и на выходе схемы синхронного детектирования формируется сигнал.

– Разработана новая конструкция градиентометра, включающего два чувствительных элемента на основе ТМП. Отличительной особенностью градиентометра является использование одного общего СВЧ-генератора для возбуждения двух чувствительных элементов, что позволяет компенсировать амплитудные шумы генератора на вычитающем блоке устройства.

– Разработана и исследована математическая модель тонкопленочного датчика, предназначенная для теоретического изучения его работы и оптимизации его конструкции с целью достижения в нем предельно высоких характеристик.

**Практическая значимость:**

– Разработаны и исследованы новые конструкции магнитометров, которые являются универсальными магнитометрическими устройствами и могут использоваться при решении многих научно-технических и исследовательских задач. За счет снижения собственных шумов датчика до уровня  $10^{-11}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> на частоте 1 Гц, магнитометры могут эффективно применяться при реализации различных методов электромагнитной разведки. Одновременно с низким уровнем собственных шумов на высоких частотах – около  $10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> – датчики обеспечивают широкую полосу частот, например, от  $10^{-2}$  до  $10^6$  Гц, т. е. могут использоваться в качестве магнитных антенн в системах связи. На частотах более  $10^2$  Гц чувствительность разработанных магнитометров превосходит чувствительность лучших доступных коммерческих феррозондовых преобразователей [66]. Верхняя граница частотного диапазона может быть расширена до  $10^8$  Гц, т. к. частоты возбуждения чувствительных элементов датчиков лежат в области  $10^9$  Гц. Датчики на ТМП обладают малыми габаритами и массой, а также низкой стоимостью при серийном изготовлении. Проведенные испытания разработанных магнитометров для геофизических исследований и для систем ближнепольной магнитной связи подтвердили их высокую эффективность.



### **3 Автоматизированный комплекс для проведения измерений характеристик тонких магнитных пленок и чувствительных элементов датчиков**

Автоматизированный комплекс предназначен для измерения характеристик ТМП, применяемых в датчиках. В процессе измерений исследуемый образец ТМП размещается в измерительном устройстве, конструкция которого сходна с конструкцией чувствительного элемента датчика на ТМП. Известны методы измерения различных параметров ТМП [95–97], которые модифицированы для измерения параметров, позволяющих непосредственно судить о достижимой чувствительности датчика на основе конкретных образцов ТМП. В чувствительном элементе датчика пленка находится под воздействием следующих магнитных полей (см. Глава 2, рисунок 2.1):  $H_{см}$  – постоянное поле смещения;  $H_{ВЧ}$  – высокочастотное поле возбуждения;  $H_{изм}$  – измеряемое поле. Основным требованием является возможность формирования этих полей в произвольных направлениях, в широком амплитудном диапазоне и в широком частотном диапазоне поля  $H_{ВЧ}$ .

#### **3.1 Методы измерения параметров тонких магнитных пленок и чувствительных элементов датчиков**

Можно выделить два варианта реализации измерительной системы: резонансная система (резонатор СВЧ); нерезонансная система (в заданной полосе частот). Параметры резонансной и нерезонансной систем могут быть измерены различными способами, например:

- возбуждение измерительной системы осуществляется от синусоидального генератора СВЧ, ТМП находится под воздействием низкочастотного модулирующего магнитного поля, полезный сигнал формируется схемой синхронного детектирования;

- измерение параметров резонансной или нерезонансной системы осуществляется с помощью измерителя параметров матрицы рассеяния многополюсника (измерителя S-параметров), для этой цели может использоваться классический векторный анализатор цепей, работающий в режиме пропускания непрерывного гармонического сигнала, или импульсный измеритель S-параметров.

На рисунке 3.1 отображены методы измерения интегральных магнитных характеристик ТМП (а) и показаны разработанные конструкции резонансной измерительной системы (б) и нерезонансной (в).

При резонансном методе измерений ТМП помещается внутрь СВЧ-резонатора. Индуктивная часть резонатора может быть выполнена в виде микрополосковой линии или в

виде нескольких витков обмоточного провода (для низких частот возбуждения). Емкостная часть резонатора, как правило, выполняется на основе сосредоточенной электрической емкости, что позволяет подстраивать резонансную частоту резонатора путем замены постоянной емкости или подстройки переменной емкости.

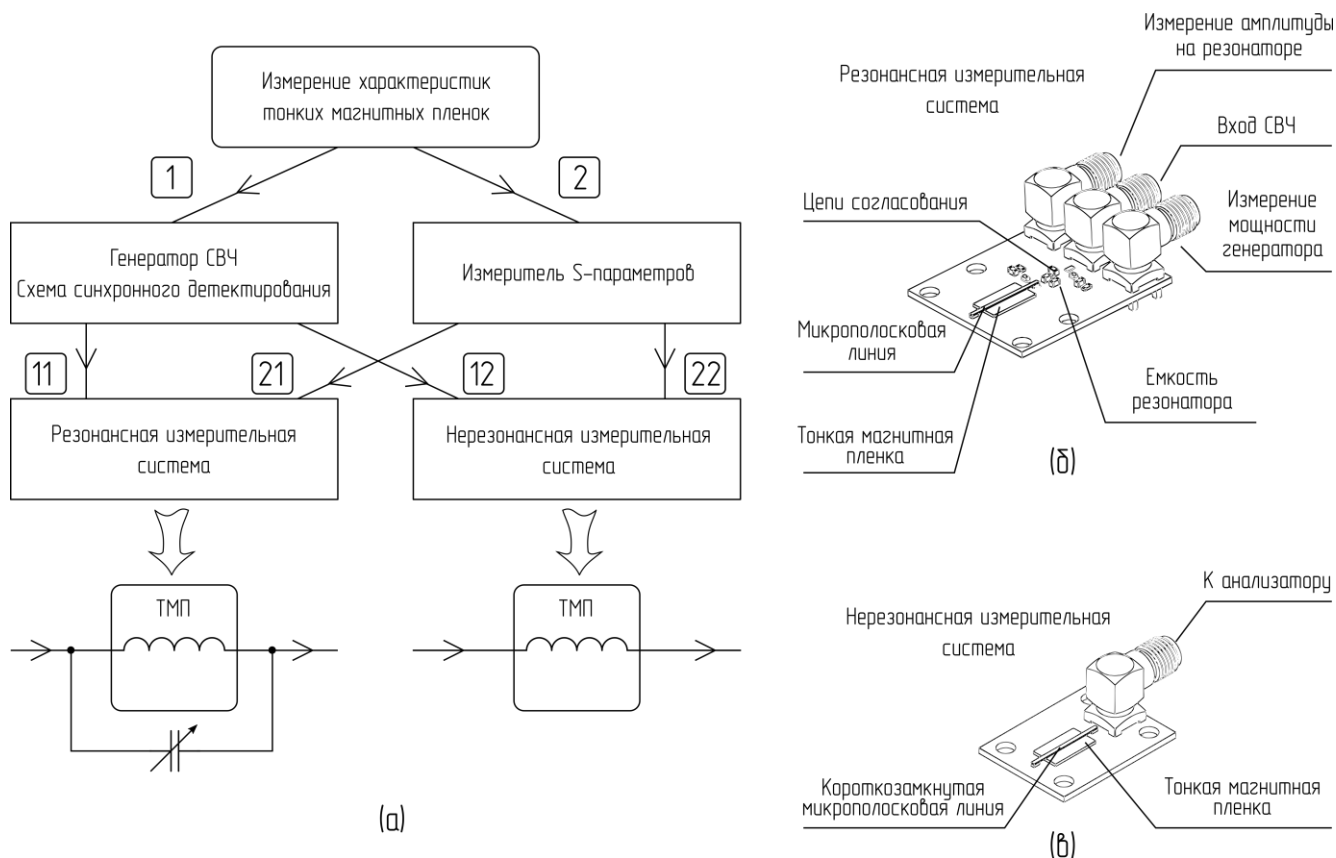


Рисунок 3.1 – Методы измерения интегральных магнитных характеристик ТМП:

*а* – методы измерения; *б* – конструкция резонансной измерительной системы;

*в* – конструкция нерезонансной измерительной системы

Возбуждение резонатора осуществляется от генератора СВЧ, требуемая мощность на согласованной нагрузке должна соответствовать мощности возбуждения чувствительных элементов датчиков – в диапазоне от минус 10 до 20 дБм. Полезный сигнал, как и в конструкции датчика на ТМП, снимается с резонатора с помощью амплитудного детектора. Контроль выходной мощности генератора СВЧ осуществляется дополнительным амплитудным детектором (рисунок 3.2).

Существенным преимуществом резонансного метода измерений является высокий уровень выходного сигнала и, как следствие, высокое отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе измерительной системы, чувствительность которой прямо пропорциональна добротности  $Q$  колебательного контура. В большинстве случаев возможна прямая работа измерительной системы – без синхронного детектирования полезного сигнала, что значительно упрощает

конструкцию измерительной установки. Параметры резонансной системы могут быть аналогичны резонансной системе разрабатываемого чувствительного элемента датчика, что позволяет измерять не только характеристики ТМП, но и итоговые характеристики ТМП в резонаторе (например, шумовые параметры чувствительного элемента). Главным недостатком резонансной системы является невозможность организации автоматической (со стороны управляющего ПО на ПК) перестройки частоты в широких пределах, тогда как частотные параметры ТМП значительно изменяются при развертке по постоянному полю смещения, и одной из важнейших задач является определение оптимальной частоты поля возбуждения  $H_{ВЧ}$ . На основе резонансного метода с СВЧ-генератором сделаны измерения, описанные в приложениях Д и Е.

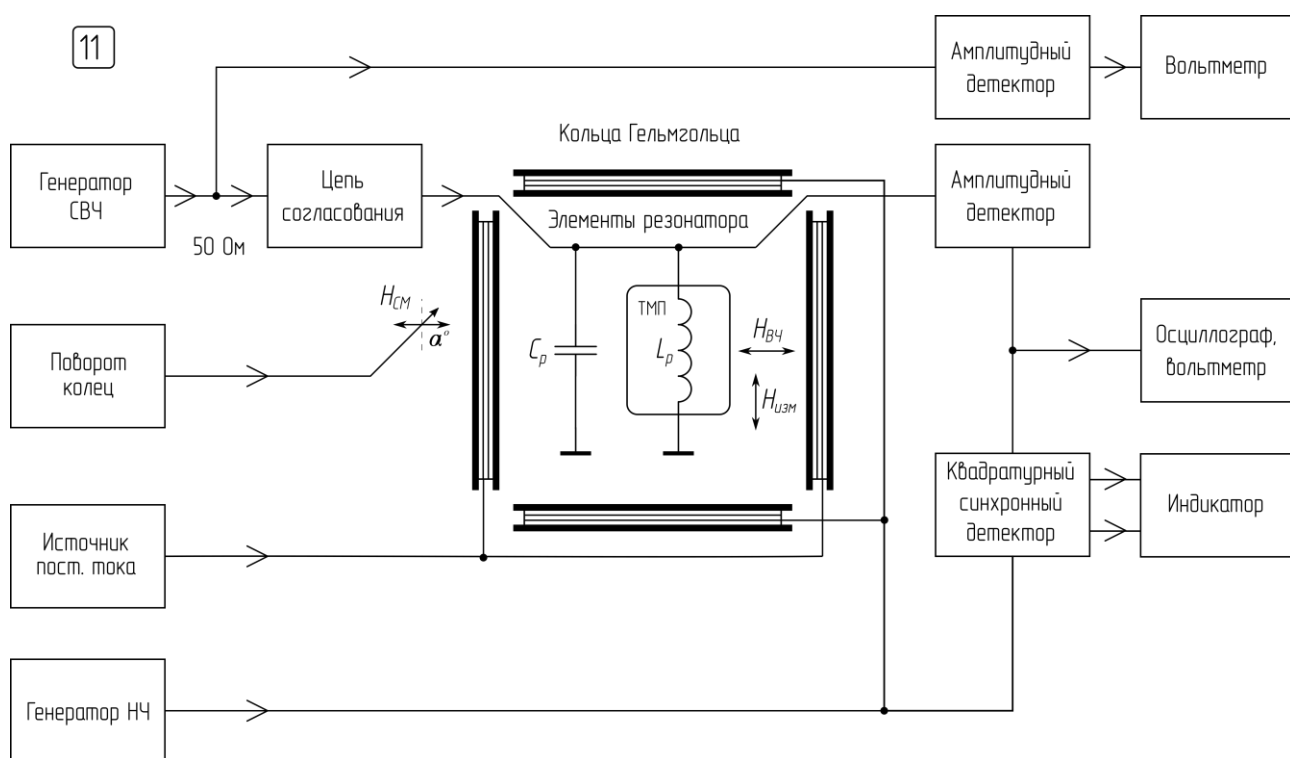


Рисунок 3.2 – Блок-схема установки с резонансной измерительной системой и управляемым СВЧ-генератором возбуждения поля  $H_{ВЧ}$

Резонансная измерительная система может быть построена на основе прибора, измеряющего S-параметры – векторного анализатора цепей, в этом случае удастся значительно упростить структурную схему установки (рисунок 3.3).

Исключение схемы синхронного детектирования и понижение мощности возбуждения резонатора снижают чувствительность резонансной измерительной системы, но использование векторного анализатора цепей позволяет значительно ускорить процесс проведения измерений – развертка современного анализатора в полосе, например, 2 ГГц занимает не более 5 с при числе точек измерений –  $4 \cdot 10^3$ . На практике число точек выбирают около  $10^3$ , что позволяет

провести измерения и получить данные по высокоскоростному интерфейсу Ethernet за время не более 1 с. Измерение комплексного коэффициента отражения  $S_{11}$  дает возможность оценки резонансной частоты и добротности резонатора, которые зависят от вносимых ТМП в колебательный контур потерь и реактивности. На основе резонансного метода с измерителем S-параметров сделаны измерения, описанные в приложении Ж.

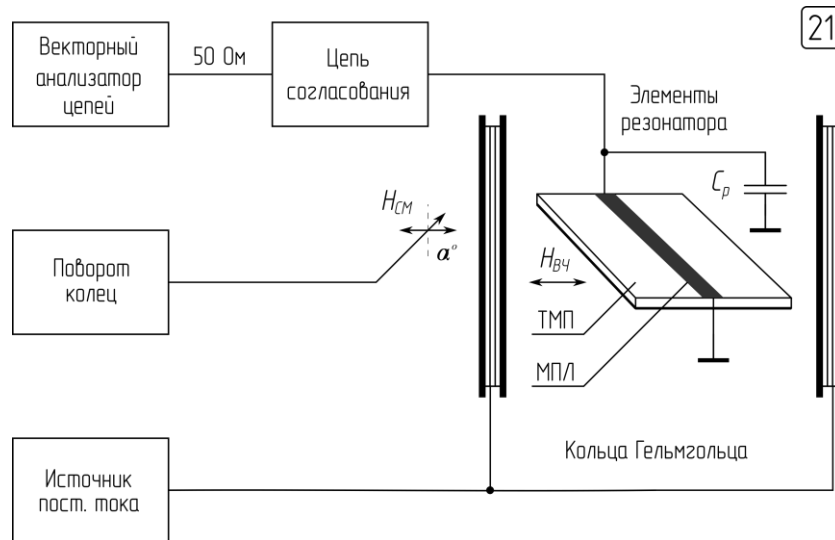


Рисунок 3.3 – Блок-схема установки с резонансной измерительной системой и векторным анализатором цепей

Нерезонансный метод подразумевает размещение образца ТМП в нерезонансной системе, т. е. в системе, резонансные частоты которой на порядок и более выше области интересующих частот (рисунок 3.4). В качестве индуктивного элемента измерительной системы используется микрополосковая линия или проволочная индуктивность.

Возбуждение измерительной линии осуществляется от генератора СВЧ с мощным оконечным каскадом, в силу малой чувствительности измерительной системы выходная мощность генератора на согласованной нагрузке должна быть максимальной. Так же, как и в резонансном методе измерений, для контроля выходной мощности генератора и измерения полезного сигнала используются амплитудные детекторы.

Основным преимуществом нерезонансного метода измерения параметров ТМП является возможность перестройки генератора СВЧ в широком диапазоне частот: от единиц мегагерц до единиц гигагерц. Использование схемы синхронного детектирования дает возможность измерения коэффициента преобразования ТМП. Существенным недостатком данного подхода является низкая чувствительность, во многих случаях проведение качественных измерений возможно только при наличии синхронного детектора полезного сигнала. На основе нерезонансного метода с СВЧ-генератором сделаны измерения, описанные в приложении И.

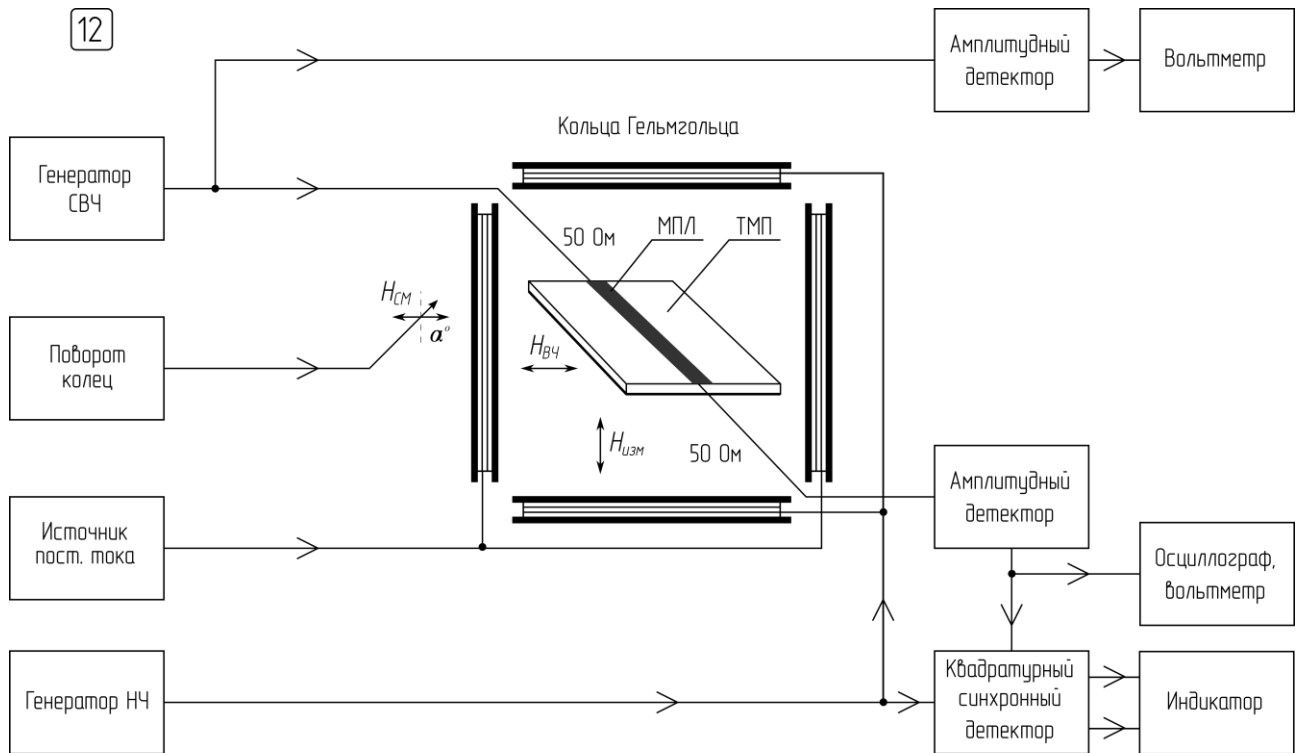


Рисунок 3.4 – Блок-схема установки с нерезонансной измерительной системой и управляемым СВЧ-генератором возбуждения поля  $H_{ВЧ}$

Значительно упростить конструкцию измерительного стенда удастся при использовании векторного анализатора цепей (рисунок 3.5). Короткозамкнутая измерительная микрополосковая линия с ТМП подключается к широкополосному векторному анализатору цепей.

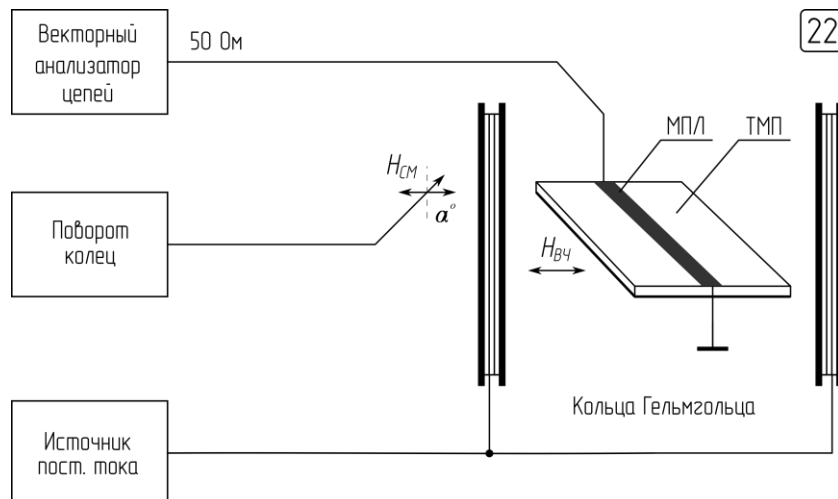


Рисунок 3.5 – Блок-схема установки с нерезонансной измерительной системой и векторным анализатором цепей

Пересчет комплексного коэффициента отражения  $S_{11}$  в параметр комплексного входного сопротивления  $Z_{11}$  дает возможность оценить значение реальной части относительной магнитной проницаемости  $\mu'$  по мнимой (индуктивной) части  $Z_{11}$ ; мнимой части относительной магнитной проницаемости  $\mu''$  по реальной части (активные потери)  $Z_{11}$ .

Достоинствами метода с использованием векторного анализатора цепей являются: простой приборный состав, отсутствие схемы синхронного детектирования сигнала; развертка в широком диапазоне частот с регулируемыми начальной и конечной частотой, числом точек на проход; большой динамический диапазон измерителя; измерение комплексного коэффициента отражения, что дает возможность оценки комплексного значения относительной магнитной проницаемости; простота управления измерительной системой со стороны ПК. Главным недостатком метода является низкая чувствительность: отсутствие схемы синхронного детектирования приводит к низким отношениям сигнал/шум на выходе измерительной системы. На основе нерезонансного метода с измерителем S-параметров сделаны измерения, описанные в приложениях К, Л, М и Н.

Достоинства и недостатки описываемых методов построения измерительных систем приводят к необходимости построения универсального измерительного комплекса, способного проводить измерения разными методами, только в этом случае возможно добиться полноты охвата измерений, требуемой для непрерывного совершенствования датчиков.

### **3.2 Состав оборудования автоматизированного измерительного комплекса**

На рисунке 3.6 отражен состав оборудования автоматизированного измерительного комплекса.

*Генератор СВЧ* используется для возбуждения резонансных и нерезонансных измерительных систем, к прибору предъявляются требования: работа в широком диапазоне частот, полоса частот – не менее 1 МГц – 2 ГГц; выходная мощность – не менее 20 дБм; возможность управления со стороны ПК посредством интерфейсов Ethernet, USB, GPIB, RS-232 или др.

*Векторный анализатор цепей* должен обеспечивать возможность измерения комплексного коэффициента отражения  $S_{11}$  в рабочем диапазоне частот – не менее 1 МГц – 2 ГГц; с максимальной мощностью возбуждения резонатора – не менее минус 10 дБм. В приборе должны быть предусмотрены функции калибровки измерительного тракта. В силу необходимости передачи большого объема данных при проведении измерений обязательным условием является наличие интерфейса Ethernet.

Генератор низких частот (НЧ) предназначен для формирования модулирующего (измеряемого, пробного) поля. Основной нагрузкой прибора являются низкоомные кольца Гельмгольца, выходной сигнал также является опорным для синхронного детектора. Требования к генератору НЧ: работа на низкоомную реактивную нагрузку, выходное сопротивление – не более 10 Ом; диапазон частот – не менее 1 Гц – 1 МГц; выходная мощность – не менее 10 Вт; наличие интерфейсов удаленного управления (Ethernet, USB, GPIB, RS-232 или др.).

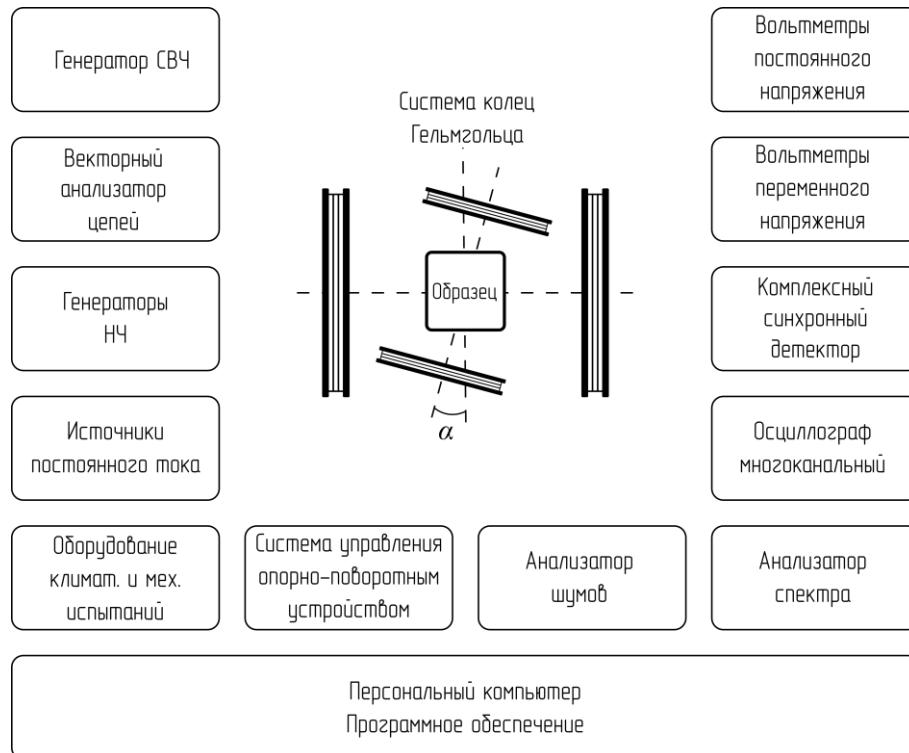


Рисунок 3.6 – Состав оборудования автоматизированного измерительного комплекса

Источники постоянного тока используются для создания постоянных полей в кольцах Гельмгольца: постоянное поле смещения  $H_{см}$ ; поле в компенсационных катушках – компенсация поля Земли. Требования к источникам главным образом определяются постоянными колец Гельмгольца и активными сопротивлениями обмоток, можно лишь сформулировать общие требования: наличие режимов стабилизации по напряжению/току (CC/CV); рабочий диапазон по току – не менее 0,01–10 А; регулировка по току с шагом – не более 10 мА; защита от перегрузок и возможность работы на реактивную нагрузку; наличие интерфейсов удаленного управления (Ethernet, USB, GPIB, RS-232 или др.). При развертке по полю диапазон изменения  $H_{см}$  – не менее 0–100 Э. Напряженность поля в компенсационных

катушках – не менее 0–1 Э. При необходимости изучения явлений, связанных с гистерезисом, источник питания должен иметь возможность изменения полярности выходного напряжения для импульсного перемангничивания пленки.

*Климатическая камера* предназначена для моделирования воздействий окружающей среды – измерения параметров датчиков при различных температурах и различном уровне влажности. Проведение испытаний с использованием климатической камеры позволяет оценить зависимости от температуры и влажности основных параметров датчиков – коэффициента преобразования; шумов измерительного преобразователя; диаграммы направленности и ортогональности осей, и др. Диапазон температур – от минус 65 до 150 °С. При необходимости проводят испытания на механические воздействия: вибрационные испытания; ударные испытания и др.

*Система управления опорно-поворотным устройством* позволяет производить измерения различных характеристик ТМП и параметров работы датчиков от направления поля смещения  $H_{см}$  или измеряемого поля  $H_{изм}$ .

*Анализатор шумов и анализатор спектра* используются для измерения параметров генераторов датчиков как одного из основных источников шума измерительных преобразователей. В процессе работы измеряются частотные зависимости амплитудных и фазовых шумов: амплитудные и фазовые шумы генератора (на отстройках от несущего колебания от  $10^{-3}$  до  $10^8$  Гц); шумы генератора, нагруженного на резонатор без ТМП; шумы генератора, нагруженного на резонатор с ТМП; шумы на выходе амплитудного детектора датчика; шумы на выходе датчика. Спектральная плотность мощности шумов датчиков приводится к единицам измерения магнитного поля – Тл/Гц<sup>1/2</sup>. Анализатор спектра также необходим при разработке и исследовании нелинейных эффектов в ТМП, в частности при работе в параметрическом режиме. Передача информации на ПК осуществляется посредством высокоскоростного интерфейса Ethernet.

*Многоканальный осциллограф* предназначен для фиксации формы измеряемых сигналов и сигналов на выходе датчика, что дает возможность определения режима работы датчика. Отображение наиболее важных сигналов измерительной системы на экране осциллографа в режиме реального времени позволяет оператору контролировать работу комплекса и своевременно предпринимать меры по устранению проблем. Для передачи осциллограмм на ПК в режиме реального времени должен быть предусмотрен высокоскоростной интерфейс Ethernet.

*Квадратурный синхронный детектор* используется для детектирования слабых сигналов на фоне шумов. Квадратурная обработка сигналов в комплексном виде дает возможность



измерять не только амплитуду полезного сигнала, но и фазу. Использование квадратурной обработки сигналов позволяет отказаться от аналоговой компенсации фазовых набегов в измерительных цепях и дает возможность измерений фазового сдвига сигнала при различных воздействиях на ТМП. Реализация квадратурного демодулятора должна быть цифровой. Низкие рабочие частоты позволяют использовать низкоскоростные сигма-дельта АЦП с разрядностью 24 бит и более. Цифровая обработка сигналов выполняется на ПЛИС, генератор сигнала промежуточной частоты реализуется по схеме прямого цифрового синтеза с высокой разрядностью опорного синусоидального сигнала.

*Вольтметры переменного напряжения* используются для измерений амплитудных и действующих значений модулирующего напряжения и напряжения на выходе измерительного преобразователя. Результаты измерений передаются в ПК и пересчитываются в единицы измерений индукции магнитного поля. Обязательным требованием к приборам является наличие интерфейсов передачи данных в ПК (Ethernet, USB, GPIB, RS-232 или др.).

*Вольтметры постоянного напряжения* необходимы для измерений уровней постоянных составляющих на выходах амплитудных детекторов. Результаты измерений передаются в ПК и пересчитываются в единицы измерения мощности и индукции магнитного поля. Наличие интерфейсов передачи данных в ПК является обязательным требованием (Ethernet, USB, GPIB, RS-232 или др.).

*Система колец Гельмгольца* разрабатывается исходя из требований к величинам создаваемых полей и рабочим частотам. В общем случае необходимо наличие двух пар колец: фиксированных и поворотных (рисунок 3.7). При необходимости компенсации поля Земли поворотные кольца размещаются внутри компенсационного куба. При измерении основных параметров ТМП и датчиков на их основе чаще всего на фиксированные кольца подается переменное измеряемое (модулирующее) поле  $H_{изм}$ , на поворотные кольца подается постоянное поле смещения  $H_{см}$ . Для высокочастотных датчиков магнитного поля модулирующее воздействие подается на кольца Гельмгольца, состоящие, в целях снижения индуктивности, из двух одновитковых колец.

На платформе внутренних поворотных колец Гельмгольца закрепляется ведомая шестерня, приводимая во вращение через редуктор от шагового двигателя. Редуктор позволяет отнести двигатель, содержащий магнитные материалы, от измерительного столика и задать минимальный шаг вращения платформы – не более  $0,1^\circ$ . Управление драйвером шагового двигателя осуществляется по командам со стороны ПК с использованием интерфейсов USB, RS-232 или др.

Перечислим общие требования к измерительным приборам и источникам сигналов: наличие подходящих интерфейсов передачи данных – Ethernet, USB, GPIB, RS-232/422/485; поддержка набора команд SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments, набор универсальных команд для программируемых/управляемых приборов); доступность подробной документации и описания команд SCPI; скорость измерений и выдачи результата по интерфейсу; стоимость и доступность приборов.

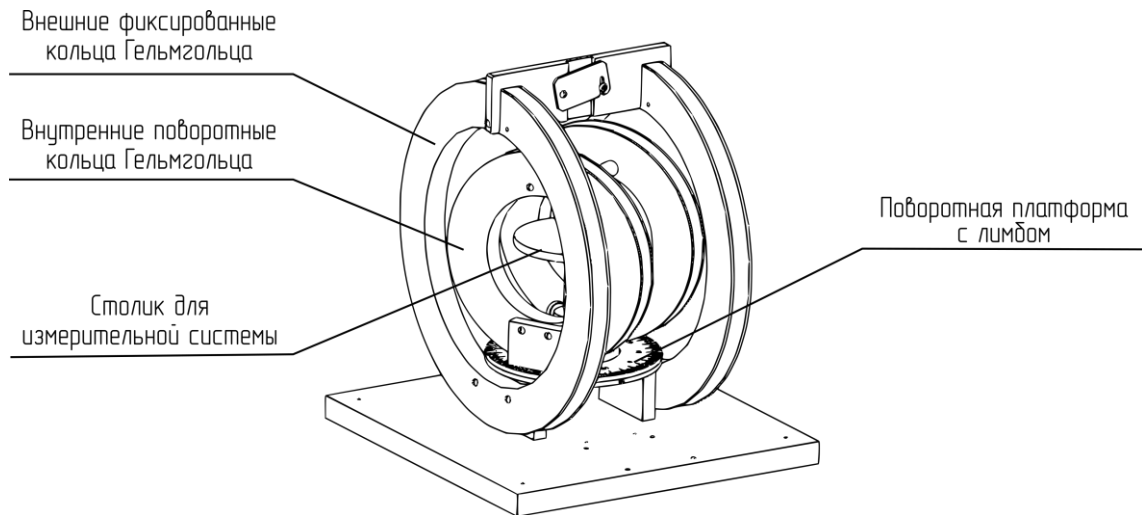


Рисунок 3.7 – Система колец Гельмгольца с возможностью вращения внутренних колец

Наиболее подходящим стандартом для обмена данными с приборами является Ethernet, позволяющий с помощью маршрутизатора и коммутатора объединить в одну общую сеть группу приборов и достаточно просто осуществлять высокоскоростной обмен данными посредством системных вызовов (обращений прикладной программы к ядру операционной системы).

### 3.3 Программно-аппаратная реализация автоматизированного измерительного комплекса

На основе сформулированных требований к программно-аппаратному составу в лаборатории ЭДСВЧЭ ИФ СО РАН был реализован автоматизированный измерительный комплекс (рисунок 3.8).

Сбор данных и управление приборами осуществляется через интерфейсы Ethernet и RS-232/422, подключаемые к ПК через сетевой коммутатор и плату расширения соответственно. Программное обеспечение взаимодействия с приборами написано на высокоуровневом

интерпретируемом языке MATLAB [110–113], что позволяет исследователю в короткие сроки освоить программирование измерительного комплекса под разнообразные задачи. Широкий спектр встроенных функций и наборов библиотек в MATLAB дает возможность обработки получаемых данных, позволяет визуализировать результаты измерений при полной автоматизации: от процесса измерений до формирования отчета. Пользователю необходимо лишь менять исследуемые образцы.

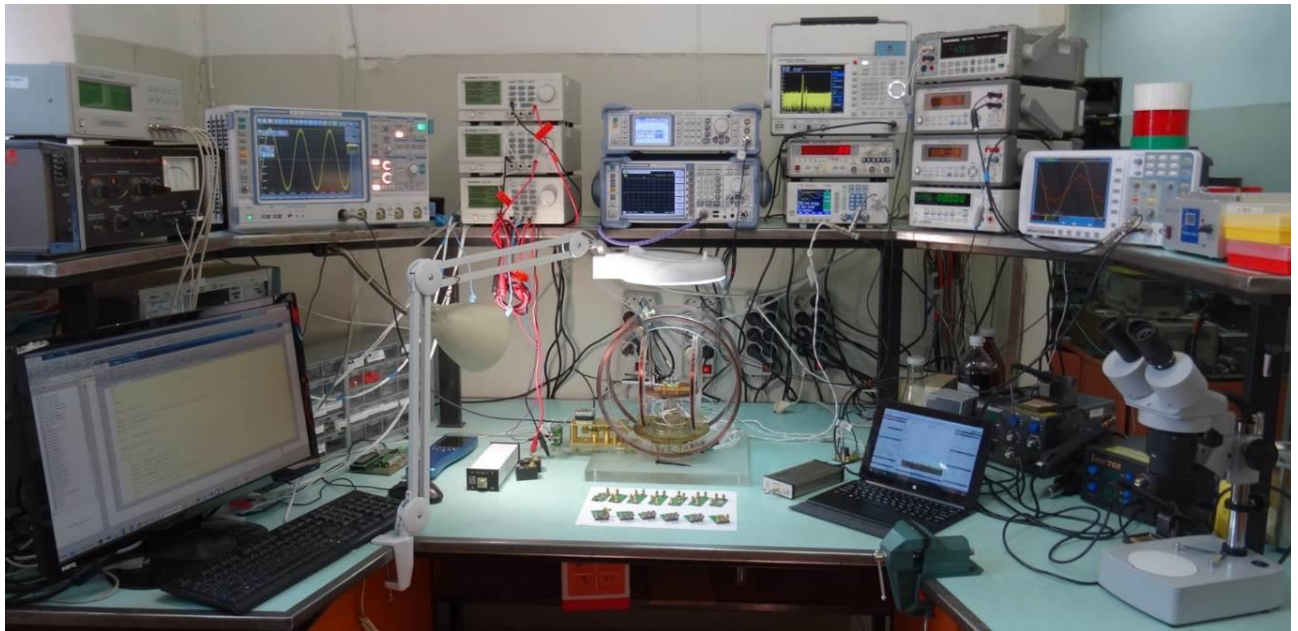


Рисунок 3.8 – Оборудование автоматизированного измерительного комплекса

Для размещения ТМП в измерительной системе разработано более десятка различных конструкций резонансных и нерезонансных измерительных систем (рисунок 3.9, *a*). В зависимости от решаемой задачи выбирается подходящая измерительная система, закрепляется на измерительном столике системы колец Гельмгольца (рисунок 3.9, *б*), после чего устанавливается исследуемый образец. На поворотной платформе внутренних колец Гельмгольца закреплено зубчатое колесо из немагнитного материала, которое приводится во вращение через двухступенчатый цилиндрический вертикальный редуктор от шагового двигателя. Для управления шаговым двигателем разработан электронный блок, позволяющий по командам с ПК выставлять заданное угловое положение с шагом  $0,1^\circ$ . Обмен данными с ПК осуществляется посредством интерфейса USB, драйвер управления приводом написан на языке MATLAB. Начальное абсолютное положение поворотной платформы перед проведением измерений может быть установлено двумя способами: установкой угла на  $0^\circ$  вручную; автоматической установкой по сигналу обратной связи с немагнитного дискретного датчика положения.

Типовая программа для проведения измерений на языке MATLAB состоит из следующих блоков: определение начальных условий измерений и измерительных интервалов; инициализация измерительного оборудования и источников сигналов; запуск цикла измерений, на каждой итерации которого происходит управление источниками сигналов и получение данных от измерителей; завершение измерений – выключение измерительного оборудования, сохранение полученных данных, вызов функций обработчиков измерений.

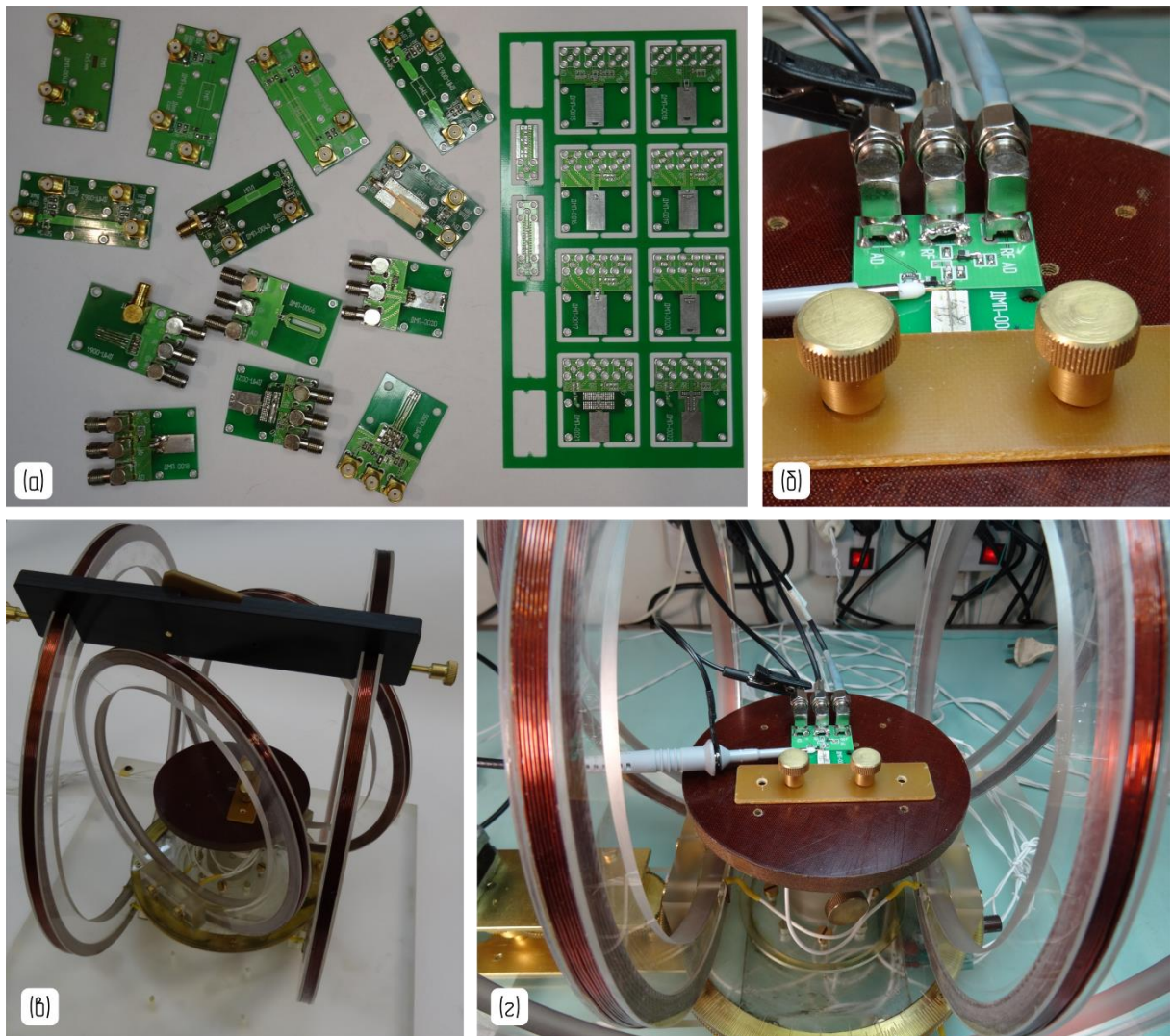


Рисунок 3.9 – Разработанные измерительные системы различного типа – *а*; *б* – резонансная измерительная система с ТМР, закрепленная на столике системы колец Гельмгольца; *в*, *г* – система колец Гельмгольца, малые кольца вращающиеся

Одним из наиболее важных этапов выходного контроля датчиков является измерение собственных шумов измерительного преобразователя. Для этих целей в комплексе предусмотрено наличие следующих приборов (рисунок 3.10, *а*): анализатор спектра с



частотным диапазоном от 1 Гц до 4,4 ГГц, собственные шумы которого на низких частотах не превышают минус 140 дБм/Гц; цифровой анализатор низкочастотных сигналов, позволяющий проводить измерения спектрального состава шумов в диапазоне от 1 мГц до 250 кГц с низким уровнем собственных шумов, гальванической развязкой входа и отсутствием собственных составляющих в спектре.

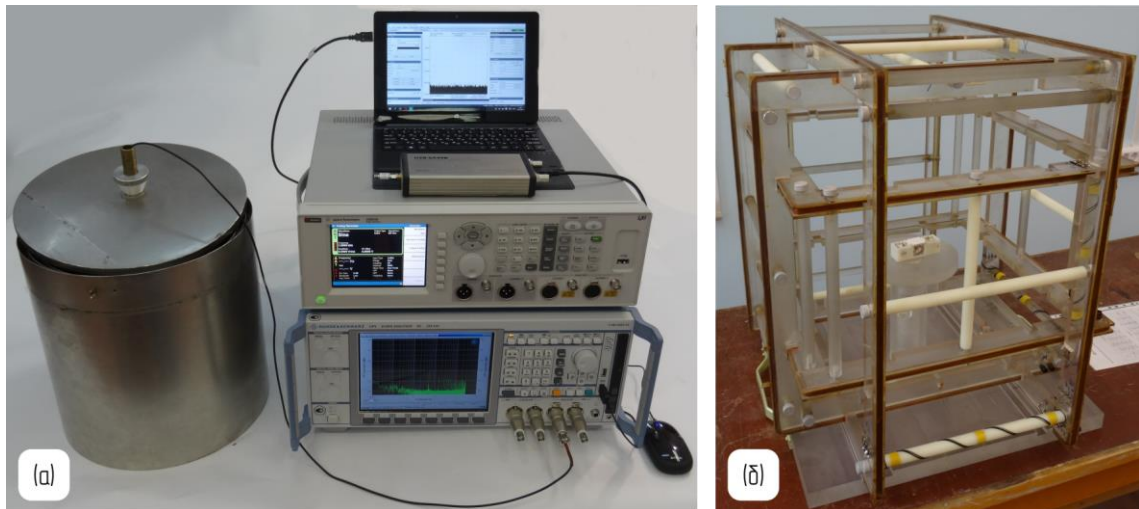


Рисунок 3.10 – Оборудование выходного контроля датчиков:

*a* – экранированная камера, анализаторы спектра;

*б* – система колец Гельмгольца для калибровки осей векторных магнитометров

Анализатор низкочастотных сигналов (рисунок 3.10, *a*) имеет встроенный генератор, который используется для формирования полигармонических сигналов в кольцах Гельмгольца при измерении характеристик линейности датчиков (измерение уровня интермодуляционных искажений).

Обязательным условием проведения измерений шумов магнитометрических преобразователей является наличие электромагнитного экрана. Применяемая система электромагнитного экранирования состоит из четырех экранирующих слоев, изготовленных из отожженного в вакууме пермаллоя с толщиной стенок 1 мм. Ослабление внешнего постоянного магнитного поля – не менее трех порядков на частоте 50 Гц. При измерении уровня собственных шумов магнитометрического преобразователя в качестве источника питания используют батареи с низким уровнем шумов (например, щелочные) или аккумуляторные батареи с низким сопротивлением. Батарея размещается внутри электромагнитного экрана вместе с датчиком. В некоторых случаях возможно питание магнитометрического преобразователя от лабораторного источника питания, тогда уровень шумов источника должен

быть заранее измерен (как на холостом ходу, так и при нагрузке) и учтен при проведении измерений.

При настройке и калибровке трехкомпонентных датчиков магнитных полей используется система колец Гельмгольца (рисунок 3.10, б), позволяющая выставить углы установки осей компонентных датчиков (ортогональность элементов базиса), калибровать коэффициенты преобразования датчиков (ортонормированность) и уровень нулевого значения (уровень постоянной составляющей напряжения на выходе магнитометра при отсутствии измеряемых сигналов).

Основные характеристики автоматизированного измерительного комплекса отражены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики разработанного автоматизированного измерительного комплекса

Характеристика	Значение
Диапазон частот поля возбуждения $H_{ВЧ}$	$10^6$ – $2 \cdot 10^9$ Гц
Мощность генератора СВЧ на согласованной нагрузке	от минус 30 дБм до 30 дБм
Диапазон частот измерения комплексного параметра $S_{11}$	$10^6$ – $2 \cdot 10^9$ Гц
Диапазон частот измеряемого поля $H_{изм}$	$10^{-3}$ – $3 \cdot 10^6$ Гц
Напряженность измеряемого поля $H_{изм}$	$10^{-4}$ – $10^0$ Э
Напряженность постоянного поля смещения $H_{см}$	до $3 \cdot 10^2$ Э
Угол поворота внутренних колец (ограничен кабелем)	$720^\circ$
Шаг углового перемещения платформы внутренних колец	$0,1^\circ$

Необходимо отметить, что модульность построения измерительного комплекса позволяет при необходимости быстро заменять приборы и тем самым изменять характеристики стенда для решения конкретных, наиболее актуальных задач.

### 3.4 Результаты измерений с использованием автоматизированного измерительного комплекса

Результаты различных измерений с использованием автоматизированного измерительного комплекса приведены в приложениях А–В и Д–Н. При серийном изготовлении ТМП для чувствительных элементов датчиков отбор наиболее подходящих образцов основывается на зависимости коэффициента преобразования  $K_{пр}$  чувствительного элемента от частоты поля возбуждения  $H_{ВЧ}$  и величины постоянного поля смещения  $H_{см}$ . На рисунке 3.11 показан пример такой зависимости для образца ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , состоящего из 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_k \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ . Каждому значению  $K_{пр}$  на графике соответствует некоторый оптимальный угол  $\alpha$ .

Максимальное значение  $K_{np}$  для каждого измеряемого образца нормируется по эталонному образцу ТМП, что позволило создать базу данных, содержащую подробное описание технологии получения ТМП и информацию об условиях получения максимального значения коэффициента преобразования чувствительного элемента с этим образцом.

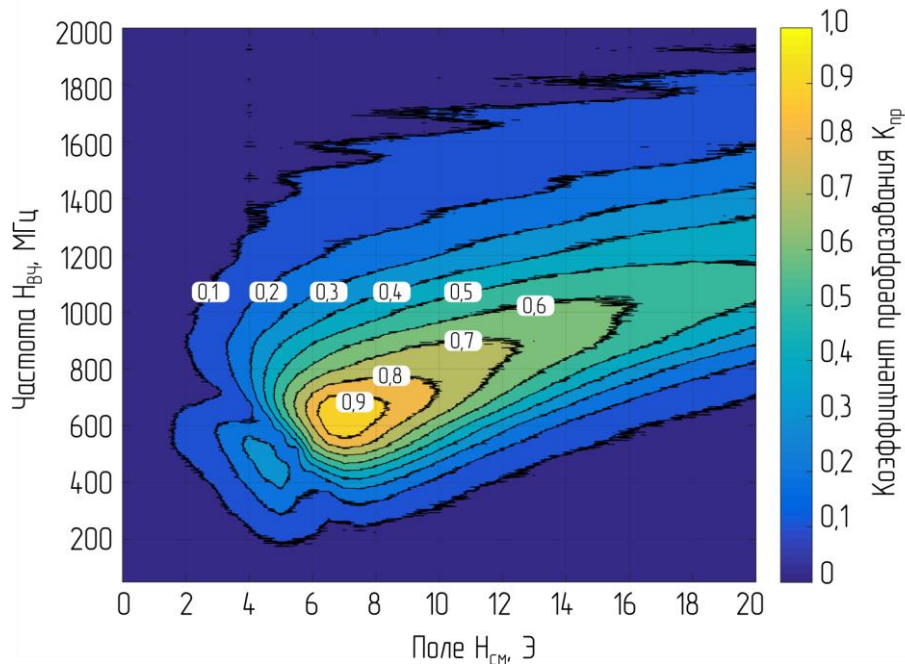


Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от частоты поля возбуждения  $H_{ВЧ}$  и величины постоянного поля смещения  $H_{см}$

В приложении Н приведены зависимости  $K_{np}$  от частоты поля возбуждения  $H_{ВЧ}$  и величины постоянного поля смещения  $H_{см}$  для ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$  с числом слоев от одного до пяти и для двухслойной ТМП состава  $Ni_{75}Fe_{25}$ .

### Выводы по главе 3

#### Научная новизна:

– Разработан автоматизированный измерительный комплекс, позволяющий проводить измерение магнитных характеристик ТМП и характеристик чувствительных элементов разрабатываемых магнитометров. В измерительном комплексе реализованы различные методы измерений: резонансный и нерезонансный методы; с использованием СВЧ-генератора для возбуждения чувствительного элемента и с использованием измерителя S-параметров. Отличительной особенностью комплекса является возможность формирования произвольной ориентации полей, например, соответствующей рабочей в датчиках: поле возбуждения  $H_{ВЧ}$

направлено вдоль ОТН; направление постоянного поля смещения  $H_{см}$  изменяется в широких пределах для поиска оптимального угла  $\alpha$  к ОТН. Процесс измерений определяется на программном уровне и полностью автоматизирован; оператору необходимо лишь менять исследуемые образцы.

**Практическая значимость:**

– Разработанный автоматизированный измерительный комплекс позволяет значительно ускорить процесс измерений. Например, при измерении нерезонансным методом с применением измерителя S-параметров в диапазоне частот поля возбуждения  $H_{вч}$  от 100 до 2000 МГц с шагом 1 МГц; при развертке по постоянному полю смещения  $H_{см}$  в диапазоне от 0 до 20 Э с шагом 0,5 Э; при развертке по углу  $\alpha$  от минус 90° до 90° с шагом 1°; количество точек измерений составляет  $\sim 1,4 \cdot 10^7$ , что требует около 4 часов автоматической работы комплекса. Измерение такого большого количества точек в ручном режиме труднореализуемо. Измерения параметров чувствительных элементов датчиков с различными образцами пленок позволили повысить чувствительность магнитометров на порядок (см. заключение Главы 2). Разработанный комплекс состоит из широко используемых измерительных приборов и источников сигналов, что дает возможность быстро переориентировать его на программном уровне для проведения требуемых измерений и решения актуальных задач.



#### 4 Измерительные головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса

Достоинством конструкции СВЧ-головки [40, 45, 46] локального спектрометра ФМР является возможность работы в широком диапазоне частот – в зависимости от рабочей частоты изменяются конфигурация МПР и тип используемого транзистора в СВЧ-генераторе. Оснащение спектрометра большим количеством сменных головок, покрывающих диапазон частот от 0,1 до 6 ГГц и имеющих различный диаметр измерительного отверстия, делают прибор универсальным и применимым при исследовании параметров различных магнитных материалов. Недостатком такой конструкции СВЧ-головки является низкая чувствительность при измерении параметров пленок толщиной менее 100 Å. При работе со слабыми сигналами с отношением сигнал/шум (ОСШ) менее 10 дБ требуется накопление сигнала, что значительно увеличивает время измерений. Кроме этого, при производстве серии СВЧ-головок на различные частоты, требуется изготовление серии микрополосковых резонаторов на соответствующие частоты, что особенно затруднительно для низких частот и что не позволяет уменьшить габариты головки. Процесс изготовления и настройки СВЧ-головок спектрометра является сложным, трудоемким и требует ручной настройки. Производство СВЧ-головок не может быть автоматизировано с использованием современных средств производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Одной из ключевых задач диссертационной работы являлась разработка новой конструкции головок сканирующего спектрометра ФМР, отличающейся от известного образца [46] следующими особенностями: как минимум на порядок более высокая чувствительность; более простая конструкция головки для получения возможности максимальной автоматизации процесса производства головок; использование современной широкодоступной базы электрорадиоизделий (ЭРИ); отсутствие элементов, изготавливаемых ручным трудом; минимальные требования к ручной настройке головки.

Для решения поставленной задачи проведен анализ возможностей повышения чувствительности головок; разработана новая конструкция чувствительного элемента – СВЧ-резонатора с возможностью изготовления в виде печатной платы (ПП); разработана новая конструкция СВЧ-генератора на современной элементной базе; разработана оптимальная конструкции корпуса головки, удовлетворяющая требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС) и пригодная для серийного изготовления на современном оборудовании.

#### 4.1 Разработка новой конструкции головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса

Чувствительность СВЧ-головки спектрометра ФМР определяется соотношением мощности, поглощенной исследуемым образцом в результате магнитного резонанса, к мощности, теряемой в резонаторе по другим причинам. Относительная потеря мощности при магнитном резонансе [114]:

$$\frac{P_R}{P_L} = \frac{4\pi\chi''Q_0}{V}, \quad (4.1)$$

где  $P_R$  – поглощаемая образцом мощность в результате магнитного резонанса;

$P_L$  – прочие немагнитные потери в резонаторе;

$\chi''$  – мнимая часть комплексной восприимчивости образца;

$Q_0$  – добротность ненагруженного резонатора;

$V$  – эффективный объем резонансной полости, определяемый из условия, что полная энергия, запасенная в резонаторе, равна  $V(H^2 / 8\pi)$ , где  $H$  – амплитуда высокочастотного магнитного поля.

Для максимизации соотношения (4.1) необходимо увеличивать добротность резонатора  $Q_0$  и уменьшать эффективный объем  $V$ . Наибольшие значения отношения  $Q_0/V$  получают при использовании резонаторов с малыми размерами, что может быть достигнуто при заполнении резонатора диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью. Например, типовой полый волноводный резонатор с центральной частотой 10 ГГц (длина волны 3 см), используемый в спектрометре магнитного резонанса [114], имеет  $Q_0 = 5000$  и  $V = 3 \text{ см}^3$ , отношение  $Q_0/V \sim 1,7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Собственная добротность микрополоскового резонатора на эту же частоту 10 ГГц, изготовленного на подложке из поликора толщиной 1 мм, существенно меньше –  $Q_0 = 250$  [46]. Однако благодаря диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r = 9,8$  резонатор имеет меньшие размеры полоски – 4,9x2 мм. В результате отношение  $Q_0/V \sim 2,6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , что как минимум на порядок больше, чем отношение  $Q_0/V$  для объемного резонатора. Микрополосковые резонаторы на меньшие частоты, например на 3 ГГц, изготавливают на подложке толщиной 1 мм из керамики ТБНС с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 80$ , что при добротности  $Q_0 = 400$  и размерах полоски 6,6x2 мм позволяет получить отношение  $Q_0/V \sim 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  [46]. Дальнейшее существенное повышение чувствительности головок спектрометра путем значительного увеличения добротности микрополоскового резонатора  $Q_0$  или уменьшения эффективного объема  $V$  затруднительно.

Перечислим возможные пути увеличения чувствительности спектрометра ФМР: максимизация отношения  $Q_0/V$  путем значительного снижения эффективного объема  $V$  при допустимом небольшом уменьшении добротности резонатора  $Q_0$ ; конструктивное расположение исследуемого образца как можно ближе к области максимума поля  $H$ ; схемотехническое построение СВЧ-генератора с возможностью тонкой настройки режима работы. Все перечисленные возможности были учтены при проектировании новой конструкции.

Как и любой автогенератор, СВЧ-генератор головки состоит из активного элемента (усилительного прибора), колебательной системы и цепи положительной обратной связи [115]. Выделяют следующие схемы автогенераторов (и различные их модификации): трансформаторная (генератор Мейснера); индуктивная трехточка (автотрансформаторная, генератор Хартли); емкостная трехточка (генератор Колпитца и его модификация – генератор Клаппа). Основные параметры работы автогенераторов не зависят от схемы включения активного элемента, поэтому выбор конкретной схемы определяется спецификой нагрузки генератора, технологическими требованиями к его элементам, а также паразитными параметрами используемых радиоэлементов. При разработке СВЧ-генератора особое внимание уделено блокировочным, развязывающим и другим фильтрующим элементам, так как их собственные резонансные частоты могут существенно влиять на работу устройства. На рисунке 4.1 показана разработанная электрическая принципиальная схема СВЧ-головки спектрометра ФМР на диапазон частот 1–3 ГГц.

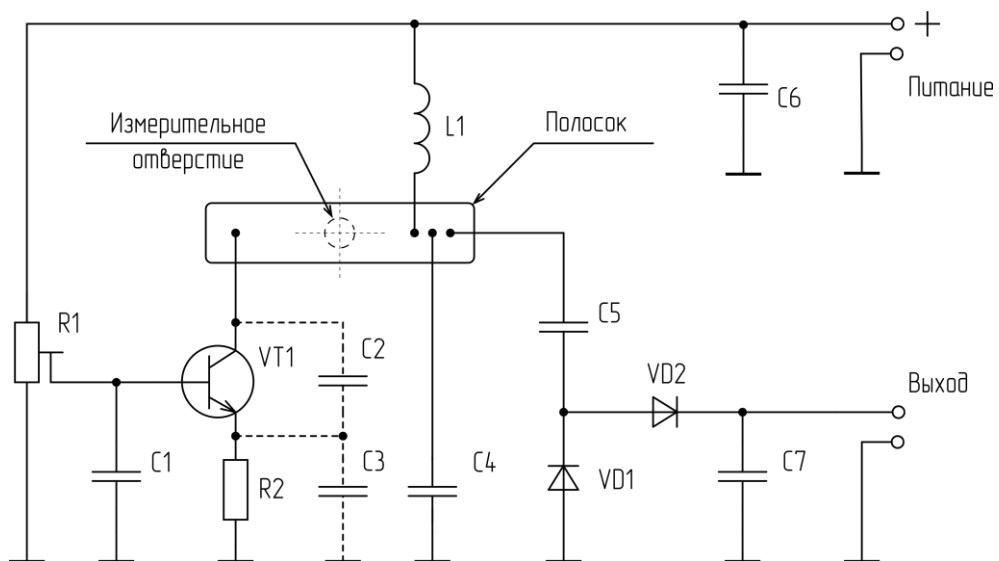


Рисунок 4.1 – Электрическая принципиальная схема разработанной СВЧ-головки локального спектрометра ФМР на диапазон частот 1–3 ГГц

Схема автогенератора (рисунок 4.1) представляет собой емкостную трехточку с биполярным транзистором, включенным по схеме с общей базой. Использование параллельного колебательного контура третьего вида в схеме генератора позволяет отказаться от изготовления отводов от индуктивности (полоска) и, кроме этого, в этом случае емкости резонатора  $C_2$  и  $C_3$  могут быть частично или полностью образованы паразитными емкостями транзистора и монтажа. Включение транзистора по схеме с общей базой позволяет минимизировать число компонентов и упростить разводку печатной платы (ПП) головки, однако, по причине существенного влияния паразитных емкостей, диапазон частот головки такой конструкции ограничен сверху частотами 3–4 ГГц. Для более высоких частот применяется схема емкостной трехточки с общим эмиттером. Рабочий режим автогенератора настраивается делителем напряжения в базе транзистора (подстроечным резистором  $R_1$ ).

Большинство современных ЭРИ изготавливаются с применением магнитных материалов. Среди элементов конструкции СВЧ-головки наибольший объем магнитных материалов содержится в керамических конденсаторах большой емкости и транзисторах. По этой причине в конструкции головки не используются керамические конденсаторы емкостью более 1 нФ. Процессы перемагничивания материала подложки транзистора могут быть заметны при исследовании особо тонких пленок. В этом случае предварительно измеряют собственный спектр перемагничивания СВЧ-головки, а в последующем его вычитают из спектра сигнала с исследуемым образцом. Элементная база СВЧ-генератора и детектора головки выбрана с минимальным содержанием магнитных материалов.

Увеличить чувствительность СВЧ-головки спектрометра можно путем расположения образца в максимуме поля  $H$  резонатора. Для этого индуктивную часть резонатора (полосок) необходимо разместить максимально близко к измерительному отверстию. Серийное изготовление головок существенно упрощается при использовании стандартных технологий производства ПП и выборе стандартного фольгированного стеклотекстолита в качестве основания. Предложены и исследованы три конструкции ПП (рисунки 4.2–4.4).

На рисунке 4.2 показан чертеж ПП с двумя слоями металлизации. На верхнем слое ПП размещается СВЧ-генератор, а на нижнем – земляной экран с измерительным отверстием. Так как требуемую жесткость ПП можно обеспечить лишь при толщинах более 0,5 мм, для уменьшения расстояния между измерительным отверстием и полоском последний помещают в паз, предварительно профрезерованный на заданную глубину. Концы полоска выводят на верхний слой ПП и пайкой соединяют с контактными площадками. Достоинством такой конструкции чувствительного элемента головки является низкая стоимость и простота изготовления двухслойной ПП. Недостатками конструкции являются необходимость в

дополнительной фрезерной обработке ПП после изготовления и в отдельном изготовлении полоска, а также сложность обеспечения углов размещения полоска относительно измерительного отверстия ПП при пайке. Угловая ошибка в расположении полоска относительно центра отверстия приводит к неортогональности направлений формируемого резонатором поля  $H$  и постоянного поля развертки спектрометра.

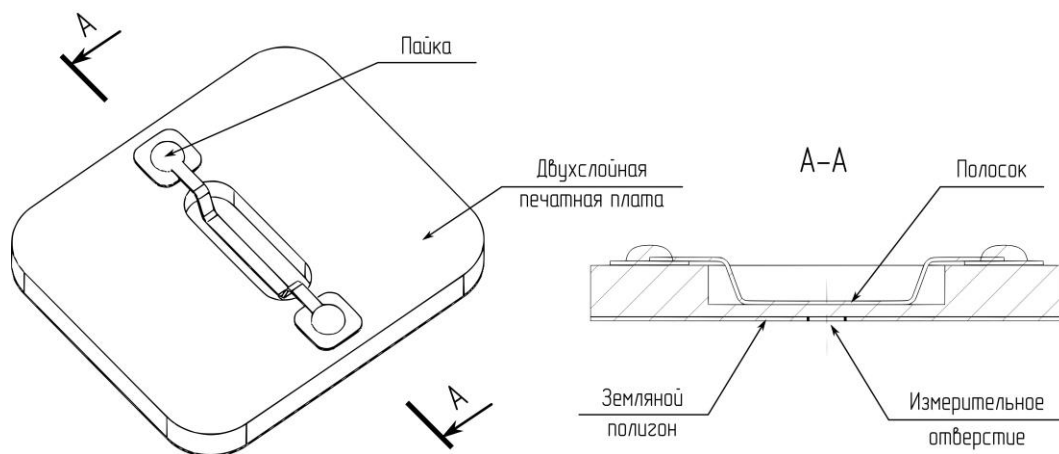


Рисунок 4.2 – Двухслойная ПП СВЧ-головки спектрометра ФМР: полосок размещен в профрезерованном на заданную глубину пазу, концы полоска выводятся на верхний слой ПП и пайкой соединяются с контактными площадками

Данного недостатка лишена конструкция многослойной печатной платы (МПП) головки, в которой полосок изготавливается по стандартной технологии производства МПП на дополнительном промежуточном слое (рисунок 4.3). Для доступа к полоску при производстве МПП изготавливается несквозной фрезерованный паз. Концы полоска соединяют проводниками при помощи пайки с контактами на верхней стороне МПП, где размещаются СВЧ-генератор головки и амплитудный детектор. Достоинствами такой конструкции является точность изготовления полоска на промежуточном слое МПП. Недостатком конструкции является необходимость в пайке соединительных проводников между полоском на промежуточном слое и контактами на верхнем слое МПП. Кроме этого, для обеспечения качественной пайки проводника к полоску необходимо на его концах сформировать контактные площадки площадью не менее  $1 \text{ мм}^2$ . Однако эти площадки образуют паразитную емкость на земляной полигон, что ограничивает верхнюю частоту резонатора. Например, для стандартного материала МПП FR4 (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r \sim 4$ ) и расстояния между земляным полигоном и полоском  $h = 0,3 \text{ мм}$ , паразитная емкость составит  $\sim 0,12 \text{ пФ}$ .

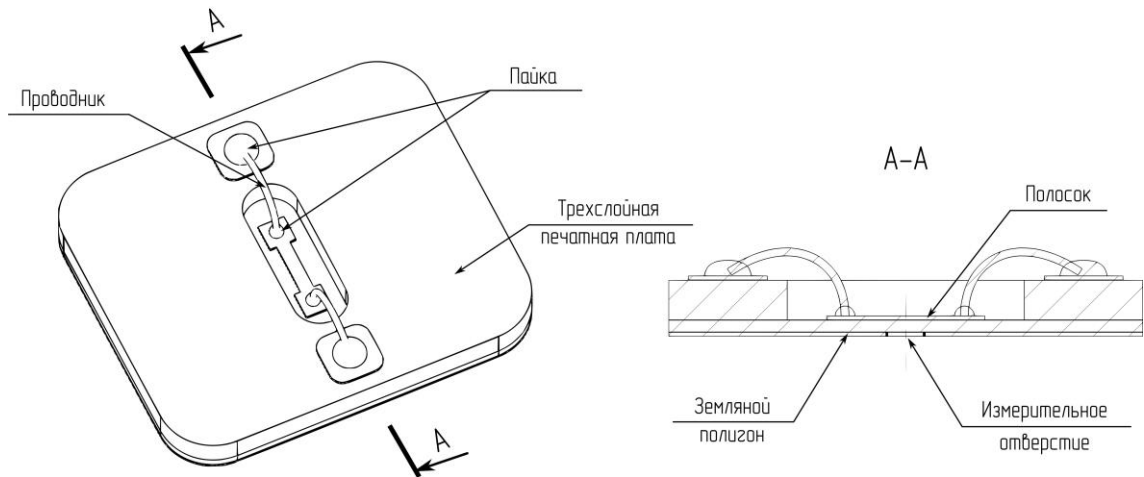


Рисунок 4.3 – Многослойная ПП СВЧ-головки спектрометра ФМР: полосок изготавливается на промежуточном слое МПП и соединяется с контактными площадками на верхней стороне МПП проводниками

Данных недостатков лишена конструкция МПП СВЧ-головки, в которой соединения между промежуточным слоем с полоском и контактами на верхнем слое выполняются с использованием несквозных переходных отверстий (рисунок 4.4).

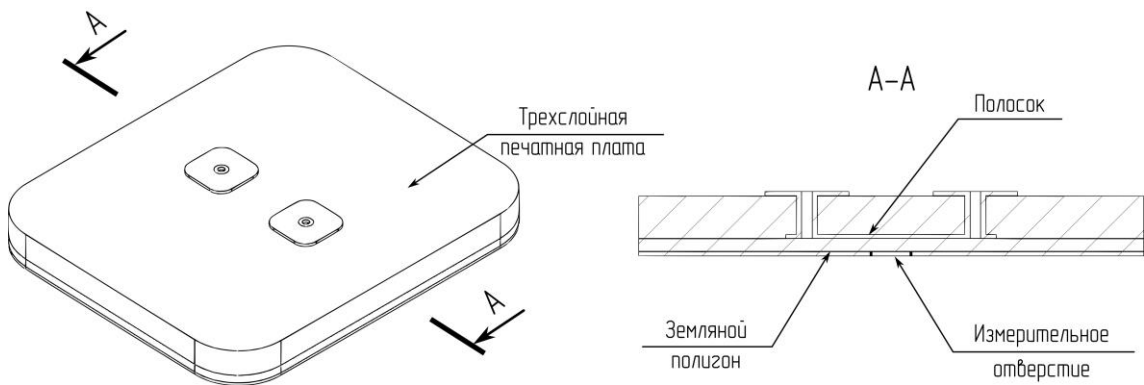


Рисунок 4.4 – Многослойная ПП СВЧ-головки спектрометра ФМР: полосок изготавливается на промежуточном слое МПП и соединяется с контактными площадками на верхней стороне МПП несквозными переходными отверстиями

Использование переходного отверстия позволяет уменьшить паразитную емкость путем уменьшения площади контактной площадки. Например, для стандартного размера переходного отверстия 0,2/0,4 мм площадь составит  $\sim 0,13 \text{ мм}^2$ , тогда при  $\epsilon_r = 4$  и  $h = 0,3 \text{ мм}$  паразитная емкость тентированного отверстия (заполненное компаундом и закрытое слоем меди

переходное отверстие) составит менее 0,02 пФ. Достоинством конструкции является полное отсутствие ручных операций в процессе изготовления МПП с полоском резонатора.

К недостаткам последних двух конструкций следует отнести их более высокую стоимость изготовления в сравнении с первой конструкцией. Несмотря на то, что в сборке МПП присутствуют только три слоя металлизации, при изготовлении на производстве используется сборка из 5–6 слоев. Это вызвано несимметричностью сборки МПП относительно плоскости, проходящей через центр ПП, как по слоям, так и по переходным отверстиям. Изготовление несквозного паза в МПП требует использования низкотекучего препрега, что также усложняет сборку и повышает стоимость производства.

Три описанных выше конструкции были изготовлены и испытаны. На рисунке 4.5 показаны фотографии плат с установленными ЭРИ.

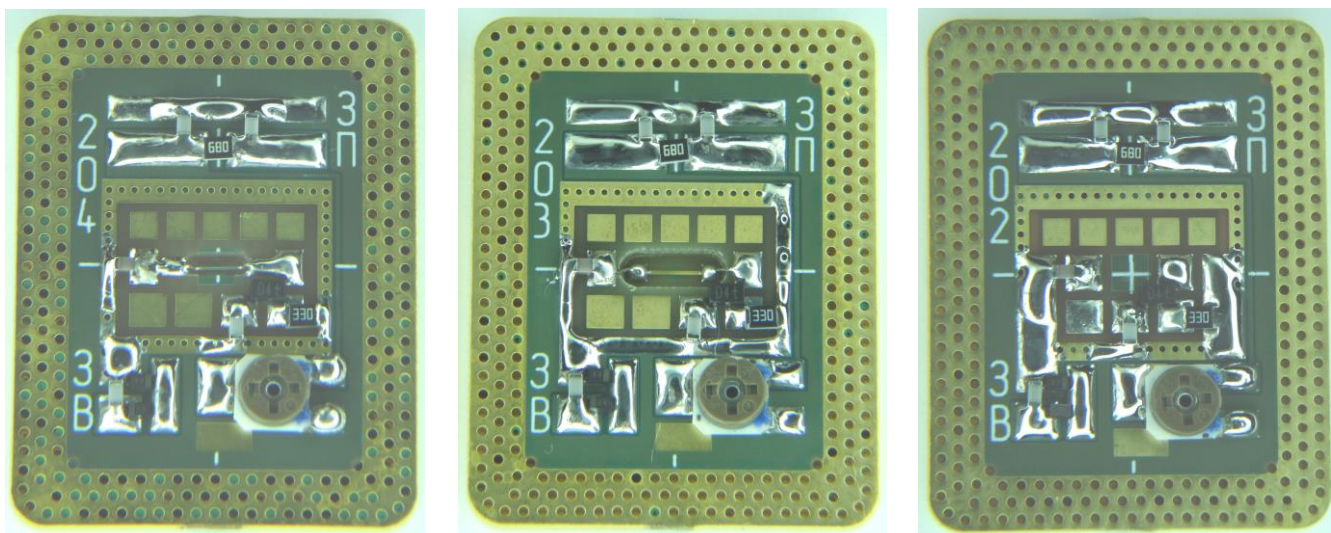


Рисунок 4.5 – Фотографии трех конструкций печатных плат СВЧ-головок спектрометра ФМР

Печатная плата с СВЧ-генератором и полоском размещается в корпусе, изготавливаемом из немагнитной латуни. Напряжение питания головки поступает через немагнитный разъем РСГ4ТВ, через него же выходной сигнал с детектора головки передается к измерительному блоку спектрометра. На рисунке 4.6 показан чертеж с разнесенными частями и габаритный чертеж СВЧ-головки.

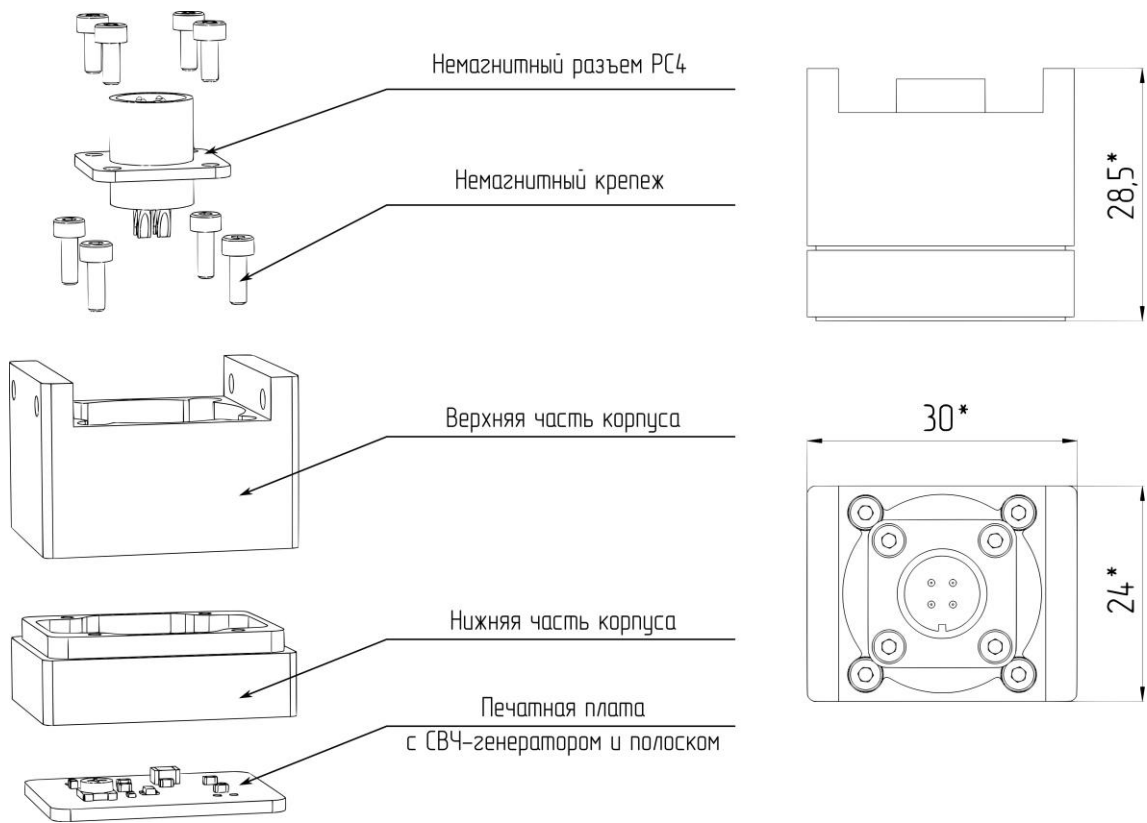


Рисунок 4.6 – Чертеж с разнесенными частями и габаритный чертеж СВЧ-головки спектрометра ФМР

При сборке частей СВЧ-головки места соединения ПП с корпусом и частей корпуса между собой паяются низкотемпературным сплавом для обеспечения электромагнитной герметичности корпуса. Для этого ПП головки изготавливается с краевой металлизацией. Электромагнитное экранирование позволяет избежать вредного воздействия внешних электромагнитных шумов, а также снизить влияние оператора на ход процесса при ручном режиме измерений. Верхняя и нижняя части корпуса изготавливаются на вертикально-фрезерных станках с ЧПУ, производственная точность которых позволяет изготавливать изделия с допусками класса точности  $f$  согласно ГОСТ 30893.1–2002. Так как корпус изготавливается по точному классу  $f$ , а измерительное отверстие размещено на изготавливаемой с достаточно высокой точностью ПП, ось измерительного отверстия после сборки находится точно на оси крепления головки. Это обстоятельство значительно сокращает время, необходимое на точную установку и настройку положения СВЧ-головки в спектрометре.

Настройка стабильного режима работы автогенератора СВЧ-головки при фиксированной конфигурации полоска заключается в экспериментальном подборе величин емкостей  $C2$ ,  $C3$  и  $C4$ . После чего делителем напряжения  $R1$  устанавливается ток базы транзистора  $VT1$  по



максимуму полезного сигнала. Экспериментально подтверждена высокая повторяемость параметров СВЧ-головок при серийном изготовлении. В некоторых случаях в индивидуальной подстройке нуждается ток базы, что проще всего реализуется при использовании в качестве R1 подстроечного резистора поверхностного монтажа, размещаемого непосредственно на ПП возле транзистора.

#### 4.2 Разработка автоматизированной установки для исследования режимов работы головок спектрометра ферромагнитного резонанса

Для исследования различных режимов работы СВЧ-головок спектрометра ФМР разработана автоматизированная измерительная установка (рисунок 4.7).

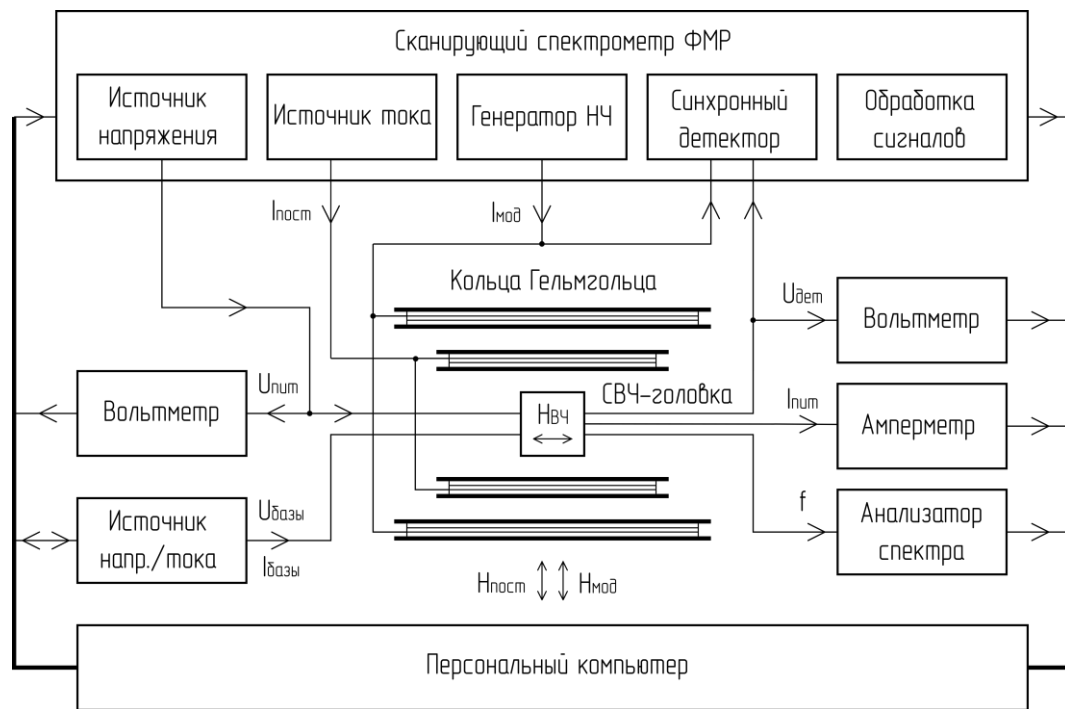


Рисунок 4.7 – Автоматизированная измерительная установка для исследования различных режимов работы СВЧ-головок спектрометра ФМР

Макет СВЧ-головки, собранный согласно электрической принципиальной схеме, показанной на рисунке 4.1, размещается внутри двух пар колец Гельмгольца (рисунок 4.7). Малые кольца предназначены для формирования постоянного магнитного поля; большие кольца – для формирования модулирующего поля. Кольца Гельмгольца подключены к управляемому источнику тока и генератору НЧ соответственно. Напряжение питания

электрической схемы и напряжение на базе транзистора СВЧ-головки формируются управляемыми источниками напряжения, что позволяет изменять режим работы головки со стороны программного обеспечения ПК. После изменения режима работы происходит автоматическая запись спектров ФМР и оценка ОСШ головки. Потребляемый электрической схемой ток регистрируется цифровым амперметром. Сигнал с детектора СВЧ-головки поступает на цифровой вольтметр, измеряющий постоянную и переменную составляющие напряжения. Частота работы СВЧ-генератора головки фиксируется анализатором спектра. Для детектирования слабых сигналов на фоне шумов используется схема синхронного детектирования. Все источники сигналов и измерительные приборы подключены к ПК.

Использование автоматизированной измерительной установки позволило настроить режим работы СВЧ-головки путем подбора оптимального режима работы СВЧ-генератора по критерию сигнал/шум. На рисунке 4.8 показаны результаты измерения спектров ФМР для образца ТМП толщиной  $500 \text{ \AA}$  и результаты измерения собственных шумов СВЧ-головки. Спектр ФМР и шумы СВЧ-головки нормированы на максимальное значение (соответствует максимуму спектра ФМР при обратном проходе).

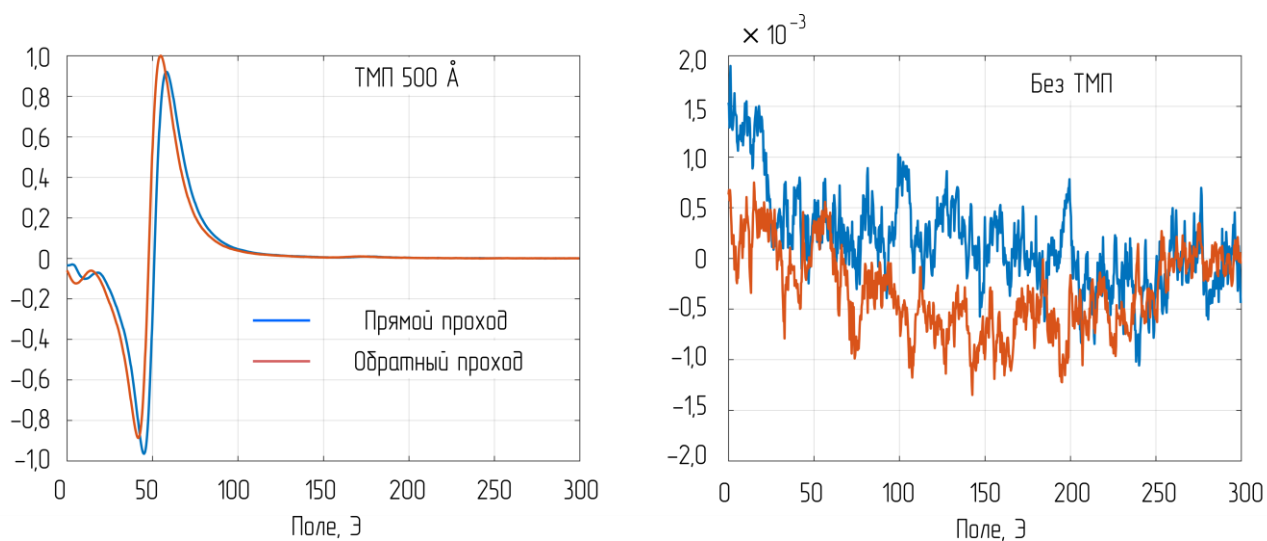


Рисунок 4.8 – Результаты измерения спектров ФМР ТМП толщиной  $500 \text{ \AA}$  при прямом и обратном проходах по полю (левый рисунок); на правом рисунке показаны собственные шумы измерительной головки при проходе по полю без образца ТМП; отношение сигнал/шум (пик-пик) для прямого прохода – 638; для обратного прохода – 900

Отношение сигнал/шум определяется по размаху полезного и шумового сигналов (пик-пик). Для прямого прохода по полю ОСШ равно 638; для обратного прохода – 900. Полученное ОСШ более чем на порядок превосходит ОСШ прежней конструкции [46].

### 4.3 Исследование локальных участков магнитных пленок чувствительных элементов датчиков слабых магнитных полей

Использование новой конструкции головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса для измерения распределений магнитных характеристик тонкопленочных образцов позволило на практике оценить степень влияния неоднородностей величины и направления поля анизотропии ТМП на коэффициент преобразования чувствительного элемента датчика слабых магнитных полей. На рисунке 4.9 показаны примеры измерения распределений намагниченности насыщения и ширины линии ферромагнитного резонанса ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ . На рисунке 4.10 отображены распределения величины и направления поля одноосной магнитной анизотропии.

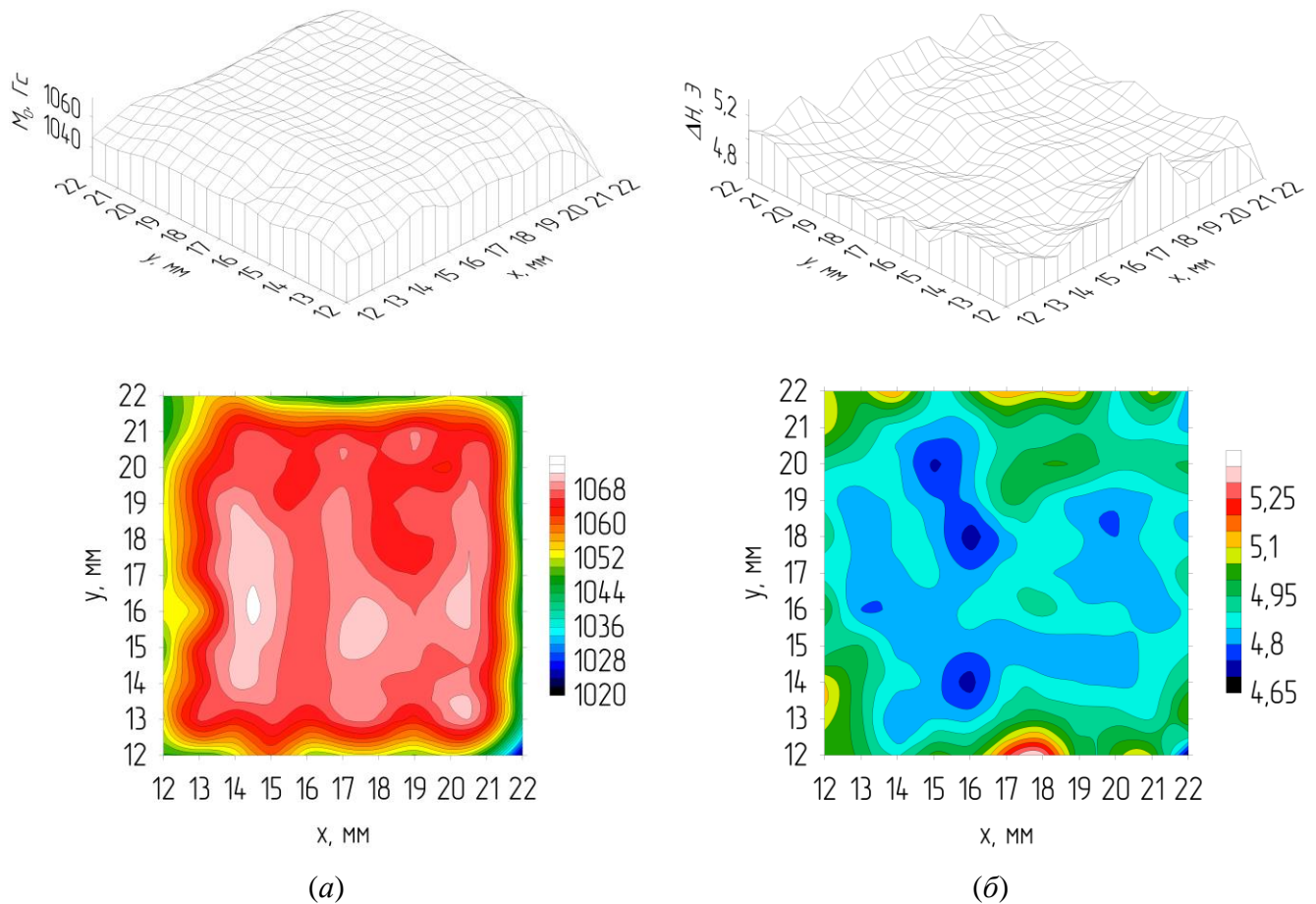


Рисунок 4.9 – Пример измерения распределений намагниченности насыщения (а) и ширины линии ферромагнитного резонанса (б)

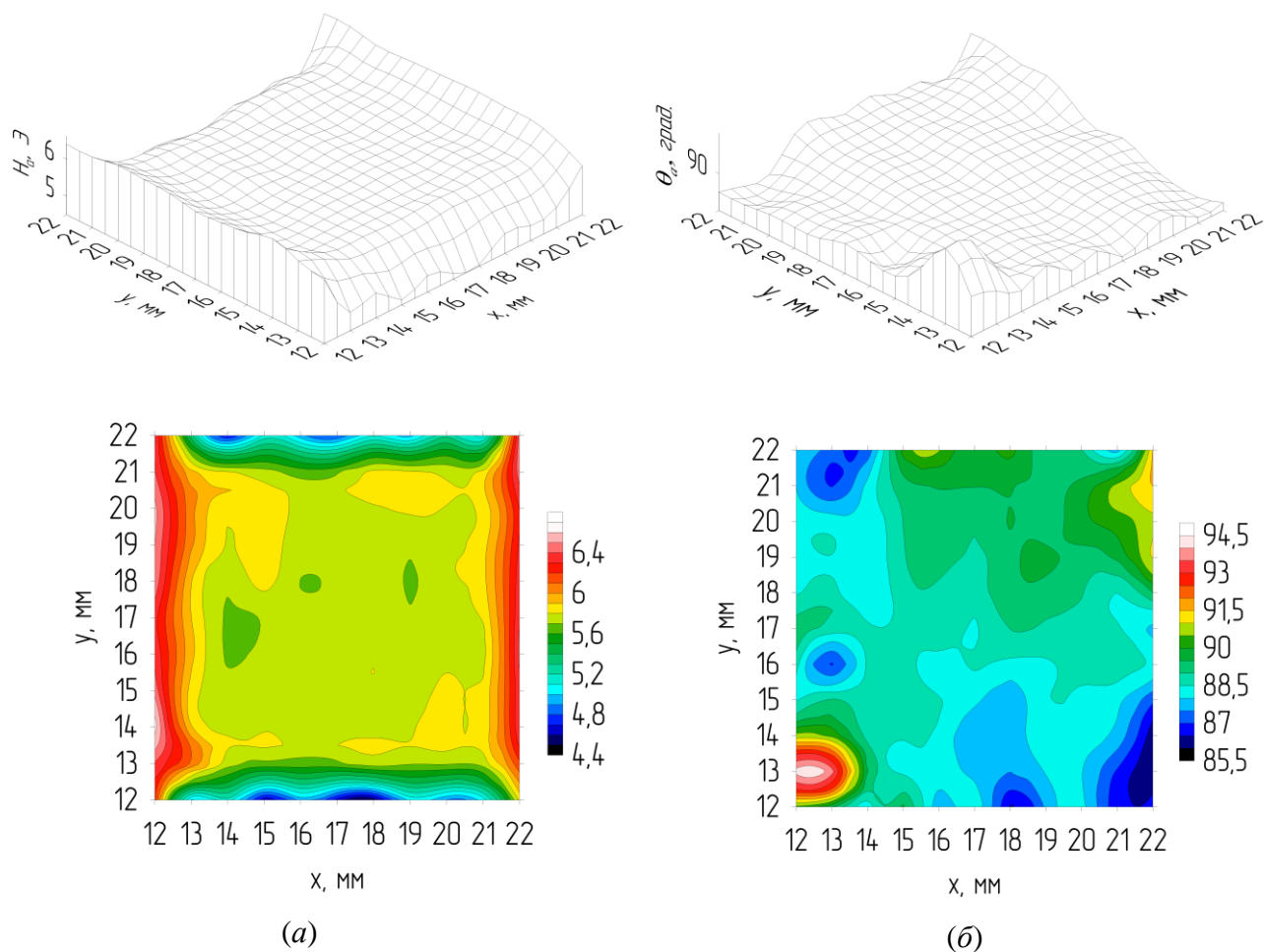


Рисунок 4.10 – Пример измерения распределений величины (а) и направления (б) поля одноосной магнитной анизотропии

В результате проведения теоретических исследований известно (см. Глава 2), что наибольшее влияние на коэффициент преобразования чувствительного элемента датчика оказывает угловая неоднородность поля анизотропии. Как видно из рисунка 4.10, наибольшие угловые отклонения поля  $H_k$  наблюдаются на краях образца. Важно отметить, что в разработанной конструкции датчика края пленки исключаются из работы, что значительно повышает его чувствительность.

Для сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса изготовлено более 100 СВЧ-головок (рисунок 4.11).

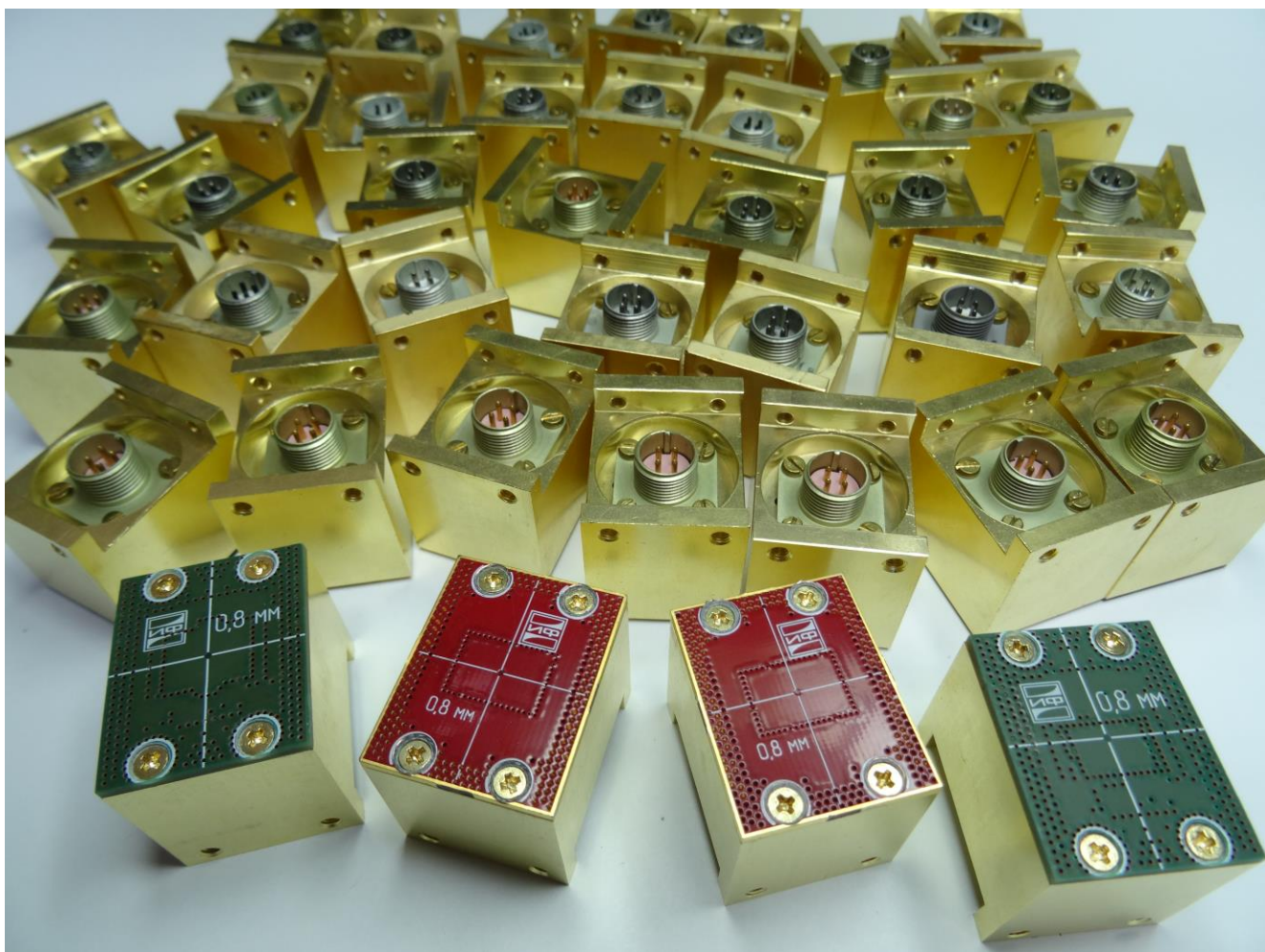


Рисунок 4.11 – Разработанные СВЧ-головки  
локального спектрометра ферромагнитного резонанса

Разработанные СВЧ-головки покрывают с малым шагом широкий диапазон частот от 0,1 до 6,0 ГГц, что позволило провести измерение распределений магнитных характеристик более 100 тонкопленочных образцов, отработать технологию их получения и отобрать лучшие образцы для создания чувствительных элементов датчиков слабых магнитных полей с высокими характеристиками.

## Выводы по главе 4

### Научная новизна:

– Разработана и исследована новая конструкция СВЧ-головки спектрометра ФМР, включающая чувствительный элемент, выполненный на основе печатной платы, СВЧ-генератор с детектором мощности и немагнитный корпус с разъемом. Чувствительность новой конструкции увеличена более чем на 20 дБ, что было достигнуто максимизацией отношения  $Q_0/V$  путем уменьшения эффективного объема резонансной полости  $V$  при незначительном снижении добротности ненагруженного резонатора  $Q_0$ . СВЧ-генератор с детектором, полосок резонатора и измерительное отверстие выполняются на одной общей плате, что значительно упрощает серийное изготовление и настройку устройства. Корпус головки изготавливается на станках с ЧПУ; конструкция корпуса дает возможность удобно настраивать устройство при одновременном обеспечении эффективного экранирования от внешних электромагнитных помех.

### Практическая значимость:

– Существенным отличием разработанной конструкции СВЧ-головки спектрометра ФМР является более чем на 20 дБ высокое ОСШ, что позволяет использовать ее при измерениях параметров особо тонких пленок с толщиной менее 100 Å. Благодаря более высокой чувствительности во многих случаях пропадает необходимость в накоплении сигнала, в результате чего сокращается время выполнения измерений. Значительное повышение чувствительности дает возможность существенного повышения локальности измерений. Конструкция головки обеспечивает соосное расположение измерительного отверстия и штанги крепления, что снижает время, необходимое на точную настройку положения головки в спектрометре. Кроме этого, положительный эффект при серийном производстве спектрометров достигается благодаря сокращению времени, необходимого на производство и настройку СВЧ-головок. Изготовлено более 100 СВЧ-головок на различные частоты, в том числе на частоты возбуждения чувствительных элементов датчиков, что позволяет отрабатывать технологию получения ТМП для повышения чувствительности датчиков. Применение разработанных СВЧ-головок на практике позволило исследовать и объяснить ряд физических эффектов в тонких магнитных пленках [117–120].



## Заключение

1. Разработана и исследована новая конструкция широкополосного магнитометра слабых магнитных полей, чувствительным элементом в котором является тонкая магнитная пленка, обладающая одноосной магнитной анизотропией, размещенная в микрополосковом резонаторе. Магнитометр содержит также малошумящий СВЧ-генератор с усилителем мощности и магнитную систему для создания постоянного поля смещения. Отличием новой конструкции является ориентация магнитных полей: высокочастотное поле возбуждения направлено вдоль оси трудного намагничивания ТМП; постоянное поле смещения направлено под небольшим оптимальным углом к ОН; направление максимальной чувствительности магнитометра примерно совпадает с ОЛН. В основе работы датчика лежит явление ферромагнитного резонанса – под воздействием внешнего измеряемого поля происходит изменение условий возникновения ФМР в магнитной пленке и, как следствие, изменение потерь, вносимых пленкой в резонатор, что изменяет его добротность и фиксируется амплитудным детектором. Разработаны модификации этой конструкции: датчик, включающий два резонатора с пленками, отличительной особенностью которого является компенсация амплитудных шумов генератора и удвоение полезного сигнала на суммирующем элементе; модуляционный датчик, включающий схему модуляции и схему синхронного детектирования, предназначенный для измерения сигналов с постоянной составляющей. На основе новой конструкции датчика разработаны конструкции градиентометров, обладающие всеми преимуществами датчиков. Собственные шумы магнитометров снижены более чем на порядок – до уровня  $10^{-11}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> на частоте 1 Гц, что позволяет использовать их для реализации различных методов электромагнитной геофизической разведки. На частотах выше  $10^2$  Гц чувствительность разработанного датчика превышает чувствительность лучших доступных коммерческих феррозондовых преобразователей. Уровень шума датчиков на высоких частотах – около  $10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>, что дает возможность использования их в качестве компактных широкополосных высокочувствительных магнитных антенн с постоянным коэффициентом преобразования во всем частотном диапазоне.

2. Разработан автоматизированный измерительный комплекс, позволяющий проводить измерения характеристик ТМП и чувствительных элементов магнитометров различными методами. Отличительной особенностью комплекса является возможность формирования произвольной ориентации магнитных полей, что позволяет измерять как интегральные характеристики ТМП, так и характеристики разрабатываемых магнитометров. Разработанный

комплекс полностью автоматизирован и состоит из широко используемых измерительных приборов и источников сигналов. Алгоритм работы комплекса определяется на программном уровне, что позволяет в короткие сроки перепрограммировать его для решения новых задач. С применением автоматизированного комплекса налажен непрерывный процесс измерения характеристик ТМП с целью отработки технологии их получения. Использование комплекса позволило отобрать наиболее подходящие образцы ТМП для повышения чувствительности датчиков.

3. Разработана новая конструкция СВЧ-головки локального спектрометра ФМР, содержащая чувствительный элемент, выполненный на основе печатной платы, СВЧ-генератор с амплитудным детектором и немагнитный корпус с разъемом. Чувствительность новой конструкции увеличена более чем на порядок, что позволяет использовать ее для измерения образцов ТМП толщиной менее  $100 \text{ \AA}$  без накопления сигнала. Существенное увеличение чувствительности дает возможность увеличения локальности измерений. Конструкция СВЧ-головки является простой в серийном изготовлении и настройке. Разработано более 100 СВЧ-головок, работающих на различных частотах – от 0,1 МГц до 6 ГГц, в том числе на диапазон частот возбуждения чувствительного элемента датчика на ТМП. Это дало возможность отработать технологию производства ТМП и, как следствие, поднять чувствительность разработанных датчиков.



**Список сокращений и условных обозначений**

CC	– Режим стабилизации тока (Constant current)
CV	– Режим стабилизации напряжения (Constant voltage)
GPiB	– Интерфейсная шина общего назначения (General purpose interface bus)
OFDM	– Ортогональное частотное разделение сигналов (Orthogonal frequency division multiplexing)
PiMM	– Импульсная индуктивная высокочастотная магнитометрия (Pulsed inductive microwave magnetometry)
SCPI	– Стандарт команд для программируемых приборов (Standard commands for programmable instruments)
SERF	– Атомный магнитометр, свободный от спин-обменного уширения (Spin exchange relaxation-free magnetometer)
USB	– Универсальная последовательная шина (Universal serial bus)
АД	– Амплитудный детектор
АРУ	– Автоматическая регулировка усиления
АЦП	– Аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	– Амплитудно-частотная характеристика
БПЛА	– Беспилотный летательный аппарат
ВЧ	– Высокие частоты
КГ	– Кольца Гельмгольца
КПД	– Коэффициент полезного действия
МК	– Микроконтроллер
МПЛ	– Микрополосковая линия
МПП	– Многослойная печатная плата
МПР	– Микрополосковый резонатор
МЧМ	– Многочастотная модуляция
НЧ	– Низкие частоты
ОЛН	– Ось легкого намагничивания
ОС	– Обратная связь

ОСШ	–	Отношение сигнал/шум
ОТН	–	Ось трудного намагничивания
ОУ	–	Операционный усилитель
ПК	–	Персональный компьютер
ПЛИС	–	Программируемая логическая интегральная схема
ПО	–	Программное обеспечение
ПП	–	Печатная плата
ПЧ	–	Промежуточная частота
РЭА	–	Радиоэлектронная аппаратура
СВЧ	–	Сверхвысокие частоты
СД	–	Синхронный детектор
СКВИД (СКИ)	–	Сверхпроводящий квантовый интерферометр (SQUID – superconducting quantum interference device)
СКО	–	Среднеквадратическое отклонение
СРНС	–	Спутниковая радионавигационная система
ТЗ	–	Техническое задание
ТКС	–	Температурный коэффициент сопротивления
ТМП	–	Тонкая магнитная пленка
УМ	–	Усилитель мощности
ФМР	–	Ферромагнитный резонанс
ФВЧ	–	Фильтр высоких частот
ФНЧ	–	Фильтр низких частот
ЦАП	–	Цифро-аналоговый преобразователь
ЦОС	–	Цифровая обработка сигналов
ЧМ2	–	Двухпозиционная частотная манипуляция
ЧПУ	–	Числовое программное управление
ЧФ	–	Черноморский флот ВМФ России
ЭВМ	–	Электронная вычислительная машина
ЭДСВЧЭ	–	Лаборатория электродинамики и сверхвысокочастотной электроники Института физики им. Л. В. Киренского
ЭМС	–	Электромагнитная совместимость
ЭРИ	–	Электрорадиоизделия

**Список литературы**

1. Grosz, A. High sensitivity magnetometers / Asaf Grosz, Michael J, Haji-Sheikh, Subhas C. Mukhopadhyay. Smart sensors, measurement and instrumentation series. – Springer, 2017. – 576 p.
2. Tumanski, S. Handbook of magnetic measurements / S. Tumanski. – CRC Press, 2011. – 398 p.
3. Ripka, P. Magnetic sensors and magnetometers / P. Ripka. – Artech House, 2001. – 511 p.
4. Webster, J. G. Measurement, instrumentation, and sensors handbook / John G. Webster and others. – CRC Press, 1999. – 2618 p.
5. Афанасьев, Ю. В. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
6. Каменецкий, Ф. М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов / Ф. М. Каменецкий. – М.: ГЕОС, 1997. – 159 с.
7. Гусев, Е. В. Методы полевой геофизики / Е. В. Гусев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 222 с.
8. Хмелевской, В. К. Основы геофизических методов / В. К. Хмелевской, В. И. Костицын. – Пермь: Изд-во Перм. университет, 2010. – 400 с.
9. Sharma, A. K. Magnetic Induction-Based Non-Conventional Media Communications: A Review / A. K. Sharma, S. Yadav, S. N. Dandu, V. Kumar, J. Sengupta, S. B. Dhok, S. Kumar // IEEE Sensors Journal. – 2017. – Vol. 17. – P. 926–940.
10. Kim, H. Review of Near-Field Wireless Power and Communication for Biomedical Applications / Han-Joon Kim, Hiroshi Hirayama, Sanghoek Kim, Ki Jin Han, Rui Zhang, Ji-Woong Choi // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 21264–21285.
11. Sun, Z. Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks / Z. Sun and I. F. Akyildiz // IEEE Transactions on Antenna and Propagation. – 2010. – Vol. 58, № 7. – P. 2426–2435.
12. Domingo, M. C. Magnetic induction for underwater wireless communication networks / M. C. Domingo // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 60, №6. – P. 2929–2939.
13. Vasquez, J. Underground wireless communications using high-temperature superconducting receivers / Jose Vasquez, Victor Rodriguez, David Reagor // IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2004. – Vol. 14, №1.

14. Бабицкий, А. Н. Ближнепольные системы передачи цифровой информации / А. Н. Бабицкий, Т. Н. Батулин, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, Р. Г. Галеев, А. В. Изотов, А. А. Сушков // Сборник трудов конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2017. – С. 476–488.
15. Бабицкий, А. Н. Цифровые системы ближнепольной магнитной связи / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, Р. Г. Галеев // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь». – 2016. – С. 403–406.
16. Бабицкий, А. Н. Системы ближнепольной магнитной передачи информации / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. А. Сушков, С. А. Клешина, Е. В. Королев, Р. Г. Галеев // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь». – 2017. – С. 270–273.
17. Сандовский, В. А. Расчет параметров беспроводной связи с шахтой / В. А. Сандовский, Ю. И. Скворцов // Радиотехника. – 1977. – Т. 32, №13. – С. 55–59.
18. Шварц, Б. А. Оперативная беспроводная индуктивная связь внутри предприятия (Основы теории и расчета) / Б. А. Шварц. – М.: Связь, 1978. – 208 с.
19. Lenz, J. E. Magnetic sensors and their applications / J. E. Lenz, A. S. Edelstein // IEEE Sensors J. – 2006. – Vol. 6. – P. 631–649.
20. Lenz, J. E. A review of magnetic sensors / J. E. Lenz. // Proceedings of the IEEE. – 1990. – Vol. 78, №6. – P. 973–989.
21. Ziegler, S. Current Sensing Techniques: A Review / Silvio Ziegler, Robert C. Woodward, Herbert Ho-Ching Iu, Lawrence J. Borle // IEEE Sensors Journal. – 2009. – Vol. 9, №4. – P. 354–376.
22. Costa, F. The current sensors in power electronics, a review / F. Costa, P. Poulichet, F. Mazaleyrat, E. Laboure // EPE Journal. – 2001. – Vol. 11, №1. – P. 18.
23. Goldenberg, F. Geomagnetic Navigation beyond the Magnetic Compass / Felix Goldenberg // IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium. – 2006. – P. 684–694.
24. Deli, G. Research into magnetic guidance technology for directional drilling in SAGD horizontal wells / Gao Deli, Diao Binbin, Wu Zhiyong, Zhu Yu // Petroleum Science. – 2013. – Vol. 10, №4. – P. 500–506.
25. Chung, J. Indoor Location Sensing Using Geo-Magnetism / Jaewoo Chung, Matt Donahoe, Chris Schmandt, Ig-Jae Kim, Pedram Razavai, Micaela Wiseman // Proceedings of the 9-th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2011), Bethesda, MD, USA. – 2011. – P. 141–154.

26. Frassl, M. Magnetic Maps of Indoor Environments for Precise Localization of Legged and Non-legged Locomotion / Martin Frassl, Michael Angermann, Michael Lichtenstern, Patrick Robertson, Brian J. Julian, Marek Doniec // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, Japan. – 2013. – P. 913–920.
27. Zhang, H. Robotic Mapping Assisted by Local Magnetic Field Anomalies / Haiyang Zhang, Fred Martin // 2011 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications, Woburn, MA. – 2011. – P. 25–30.
28. Andra, W. Magnetism in Medicine / Wilfried Andra, Hannes Nowak. Magnetism in Medicine. – Berlin: Wiley-VCH, 2007. – 646 p.
29. Malmivuo, J Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Field / Jaakko Malmivuo, Robert Plonsey. – New York: Oxford University Press, 1995. – 642 p.
30. Введенский, В. И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм / В. Л. Введенский, В. И. Ожогин. – М.: Наука, 1986. – 200 с.
31. Reagor, D. A. High-Temperature Superconducting Receiver for Low-Frequency Radio Waves / David Reagor, Yan Fan, Catherine Mombourquette, Quanxi Jia, Larry Stolarczyk // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1997. – Vol. 7, №4. – P. 3845–3849.
32. Hjelmstad, K. E. Ultra low frequency electromagnetic fire alarm system for underground mines / K. E. Hjelmstad, W. H. Pomroy // Bureau of Mines. Tech. Report 937. – 1991. – 17 p.
33. Stolarczyk, L. G. Emergency and operational low and medium frequency band radio communications system for underground mines / L. G. Stolarczyk // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1991. – Vol. 27, №4. – P. 780–790.
34. Vasquez, J. Underground Wireless Communications Using High-Temperature Superconducting Receivers/ Jose Vasquez, Victor Rodriguez, David Reagor // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, №1. – P. 46–53.
35. Yarkan, S. Underground Mine Communications: A Survey / Serhan Yarkan, Sabih Guzelgoz, Huseyin Arslan, Robin R. Murphy // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2009. – Vol. 11, №3. – P. 125–142.
36. Agurto, A. A Review of Concealed Weapon Detection and Research in Perspective / Alan Agurto, Yong Li, Gui Yun Tian, Nick Bowring, Stephen Lockwood // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, London, UK. – 2007. – P. 443–448.
37. Griffiths, H. Magnetic induction tomography / H. Griffiths // Meas. Sci. Technol. – 2001. – P. 1126–1131.
38. Vervaeke, K. Large area magnetic field camera for inline motor magnet inspection / Dr. K. Vervaeke // Electric Drives Production Conference (EDPC). – 2012.

39. Vervaeke, K. 3-axis magnetic field camera for ultrafast and high resolution inspection of permanent magnets / Koen Vervaeke // *Sensoren und Messsysteme*. – 2014.
40. Беляев, Б. А. Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса для диагностики характеристик тонких магнитных пленок / Б. А. Беляев, А. В. Изотов, А. А. Лексиков // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2001. – Т. 67, №9. – С. 24–33.
41. Андре, В. Тонкие ферромагнитные пленки: пер. с нем. / В. Андре, З. Фрайт и др. – М.: Мир, 1964. – 360 с.
42. Саланский, Н. М. Физические свойства и применение магнитных пленок / Н. М. Саланский, М. Ш. Ерухимов. – Новосибирск: Наука, 1975. – 202 с.
43. Пузырев, В. А. Тонкие ферромагнитные пленки в радиотехнических цепях / В. А. Пузырев. – М.: Советское радио, 1974. – 160 с.
44. Суху, Р. Магнитные тонкие пленки: пер. с англ. / Р. Суху. – М.: Мир, 1967. – 423 с.
45. Беляев, Б. А. Исследование магнитных материалов и тонкопленочных структур методом ферромагнитного резонанса: учеб. пособие. / Б. А. Беляев, А. В. Изотов, С. А. Ходенков, С. М. Жарков. – Красноярск: СибГАУ, 2012. – 136 с.
46. Беляев, Б. А. Спектрометр ферромагнитного резонанса / Б. А. Беляев, А. А. Лексиков, И. Я. Макиевский, В. В. Тюрнев // *Приборы и техника эксперимента*. – 1997. – №3. – С. 106–111.
47. Clarke, J. The SQUID handbook / J. Clarke, A. I. Braginski. – Wiley-VCH, 2004. – 414 p.
48. Drung, D. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors / D. Drung, C. Abmann, J. Beyer, A. Kirste, M. Peters, F. Ruede, Th. Schuring // *IEEE transactions on applied superconductivity*. – 2007, – Vol. 17, №2.
49. Schmelz, M. Field-stable SQUID magnetometer with sub-fT/Hz<sup>-1/2</sup> resolution based on sub-micrometer cross-type Josephson tunnel junctions / M. Schmelz, R. Stolz, V. Zakosarenko, T. Schonau, S. Anders, L. Fritsch, M. Muck, H. G. Meyer // *Superconductor science and technology*. – 2011. – №24.
50. Kominis, I. K. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer / I. K. Kominis, T. W. Kornack, J. C. Allred, M. V. Romalis // *Nature*. – 2003. – Vol. 422.
51. Boto, E. Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system / Elena Boto, Niall Holmes, James Leggett, Gillian Roberts, Vishal Shah, Sofie S. Meyer, Leonardo Duque Munoz, Karen J. Mullinger, Tim M. Tierney, Sven Bestmann, Gareth R. Barnes, Richard Bowtell, Matthew J. Brookes // *Nature*. – 2018. – Vol. 555. – P. 657–661.

52. Tumanski S. Induction coil sensors – a review / S. Tumanski // Measurement science and technology. – 2007.
53. Seran, H. C. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research / H. C. Seran, P. Fergeau // Review of scientific instruments. – 2005. – №76.
54. Paperno, E. A miniature and ultralow power search coil optimized for a 20 mHz to 2 kHz frequency range / E. Paperno, A. Grosz // Journal of applied physics. – 2009. – №105.
55. Grosz, A. A three-axial search coil magnetometer optimized for small size, low power, and low frequencies // IEEE sensors journal. – 2011. – Vol. 11, №4.
56. Shi, H. Numerical Optimization of the Tube-Cored Induction Magnetometer Weight Under Specific Noise Constraints / Hongyu Shi, Yanzhang Wang, Jun Lin, Jingjie Li // IEEE Sensors Journal. – 2017. – Vol. 17. – P. 3302–3308.
57. Pellicer-Guridi, R. Towards ultimate low frequency aircore magnetometer sensitivity / Ruben Pellicer-Guridi, Michael W. Vogel, David C. Reutens, Viktor Vegh // Scientific reports. – 2017. – №7(1).
58. Caruso, M. J. A new perspective on magnetic field sensing / M. J. Caruso, T. Bratland, C. Smith, R. Schneider // Honeywell, inc. – 1998. – №5.
59. Pappas, D. P. High sensitivity magnetic field sensor technology overview / D. P. Pappas, National Institute of Standards & Technology Boulder, CO, 2008. – 50 p.
60. Bottura, L. Field measurements methods / L. Bottura, 2009. – 59 p.
61. Urbaniak, M. Basic magnetic measurements methods / M. Urbanik, 2012. – 57 p.
62. Tumanski, S. Modern magnetic field sensors – a review / S. Tumanski // Przegląd elektrotechniczny. – 2013, – №10.
63. Ripka, P. Advances in magnetic fields sensors / P. Ripka, M. Janosek // IEEE sensors journal. – 2010. – Vol. 10, №6.
64. Ripka, P. Review of fluxgate sensors / P. Ripka // Sensors and Actuators A Physical. – 1992. – Vol. 33. – P. 129–141.
65. Korepanov, V. Flux-Gate Magnetometers Design Peculiarities / Valery Korepanov, Andriy Marusenkov // Surv Geophys. – 2012. – Vol. 33. – P. 1059–1079.
66. Bartington Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bartington.com> (дата обращения: 01.01.2019).
67. Grosz, A. A high-resolution planar hall effect magnetometer for ultra-low frequencies / A. Grosz, V. Mor, S. Amrusi, I. Faivinov, E. Paperno, L. Klein // IEEE sensors journal. – 2016. – Vol. 16, №9.

68. Reig, C. Giant magnetoresistance (GMR) sensors / C. Reig, S. Cardoso de Freitas, S. C. Mukhopadhyay. – Springer, 2013. – 308 p.
69. Pannetier, M. Noise in small magnetic systems – Applications to very sensitive magnetoresistive sensors / M. Pannetier, C. Fermon, G. Le Goff, J. Simola, E. Kerr, J. M. D. Coey // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2004.
70. Smith, C. Low-field magnetic sensing with GMR sensors / C. Smith, R. W. Schneider // Sensors EXPO-Baltimore. – 1999.
71. Budker, D. Optical magnetometry / D Budker, D. F. Jackson Kimball. – Cambridge university press, 2013. – 432 p.
72. Ничога, В. А. К возможности использования волоконно-оптических датчиков в инфранизкочастотной геомагнитометрии и требования, предъявляемые к ним / В. А. Ничога, Г. Р. Трохим // Геофизическая аппаратура. – 1991. – №94.
73. Гавричев, В. Д. Волоконно-оптические датчики магнитного поля / В. Д. Гавричев, А. Л. Дмитриев. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 83 с.
74. Hovde, C. Sensitive optical atomic magnetometer based on nonlinear magneto-optical rotation / C. Hovde, B. Patton, E. Corsini, J. Higbie, D. Budker // NAVAIR Public release. – 2010. – №271.
75. Tiporlini, V. High sensitive optically pumped quantum magnetometer / V. Tiporlini, K. Alameh // The scientific world journal. – 2013.
76. Auster, V. Advanced Proton Magnetometer Design and its Application for Absolute Measurement / Volker Auster, Olaf Hillenmaier, Ronald Kroth, Markus Wiedemann // Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. – 2007. – P. 99.
77. Li, Z. Overhauser magnetometer sensor design for magnetic field observation / Zan Li, Shudong Chen, Shuang Zhang, Xin Guo, Qiong Cao // Proceedings, Radiation Detectors: Systems and Applications XVII. – 2016. – Vol. 9969.
78. Беляев, Б. А. Малогабаритный датчик слабых магнитных полей на основе тонких магнитных пленок / Б. А. Беляев, А. Н. Бабицкий, Н. М. Боев, Р. Г. Галеев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2016. – Т. 58, №8/2. – С. 75–77.
79. Бабицкий, А. Н. Магнитометр слабых квазистационарных и высокочастотных полей на резонансных микрополосковых преобразователях с тонкими магнитными пленками / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, Г. В. Скоморохов, А. В. Изотов, Р. Г. Галеев // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – №3. – С. 96–104.



80. Babitskii, A. N. Low Noise Wideband Thin-Film Magnetometer / Alexander N. Babitskii, Boris A. Belyaev, Nikita M. Boev, Andrey V. Izotov // IEEE Sensors-2017. – 2017. – P. 316–318.

81. Бабицкий, А. Н. Датчики слабых магнитных полей на основе тонких магнитных пленок / А. Н. Бабицкий, Т. Н. Батурин, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, Р. Г. Галеев, А. В. Изотов, А. А. Сушков // Сборник трудов конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2017. – С. 411–421.

82. Беляев, Б. А. Исследование датчика слабых магнитных полей на резонансной микрополосковой структуре с тонкой ферромагнитной пленкой / Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, П. Н. Соловьев, В. В. Тюрнев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2018. – Т. 61, №8. – С. 3–10.

83. Babitskii, A. N. Thin magnetic film magnetometer / A. N. Babitskii, B. A. Belyaev, N. M. Boev, A. V. Izotov, S. A. Kleshnina // 12-th European Magnetic Sensors and Actuators Conference – EMSA 2018, Abstract book. – 2018. – P. 93.

84. Babitskii, A. N. Wideband thin-film gradiometer / A. N. Babitskii, B. A. Belyaev, N. M. Boev, A. V. Izotov, An. A. Leksikov, A. V. Burmitskikh // 12-th European Magnetic Sensors and Actuators Conference – EMSA 2018, Abstract book. – 2018. – P. 94.

85. Бабицкий, А. Н. Тонкопленочный магнитометр для импульсной электроразведки / А. Н. Бабицкий, Е. П. Блинников, А. Г. Владимиров, Я. И. Гитарц, В. В. Поляков, Г. И. Фролов // Геофизическая аппаратура. – 1991. – Вып. 94. – С. 21–29.

86. Irons, H. R. Magnetic thin-film magnetometers for magnetic-field measurement / H. R. Irons, L. J. Schwee // IEEE transactions on magnetics. – 1972. – Vol. mag-8, №1.

87. West, F. S. Detection of low-intensity magnetic fields by means of ferromagnetic films / F. S. West, W. J. Odom, J. A. Rice, T. C. Penn // J. Appl. Phys. – 1963. – Vol. 34. – P. 1163–1164.

88. Thin film field sensor: U. S. Patent. 3271665 /, P. S. Castro, Stucki F. F., Palo Alt; Lockheed Aircraft Corporation, 20.11.1963.

89. Frank, C. E. Weak magnetic field measurement using Permalloy film UHF resonance / C. E. Frank // Rev. Sci. Instrum. – 1966. – Vol. 37. – P. 875–880.

90. Magnetometer employing dual thin magnetic film transducers: U. S. Patent 3518534 / C. J. Bader, W. Chester; Burroughs Corporation, 19.12.1967.

91. Schwee, L. J. Fast response magnetometer using ferromagnetic resonance in thin films / L. J. Schwee, H. R. Irons // Rev. Sci. Instrum. – 1968. – Vol. 39. – P. 220–222.

92. Abadeer, W. Magnetic field detection using coherent magnetization rotation in a thin magnetic film / W. Abadeer, D. Ellis // J. Appl. Phys. – 1971. – Vol. 42. – P. 1439–1440.

93. Малогабаритный тонкопленочный градиентометр: пат. 183446 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> G01R 33/05, G01R 33/022 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., Боев Н. М., Изотов А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017137672; заявл. 27.10.2017; опубл. 24.09.2018, Бюл. №27.

94. Малогабаритный высокочастотный магнитометр: пат. 163174 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> G01R 33/05 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., Боев Н. М., Изотов А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2015144929/28; заявл. 19.10.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. №19.

95. Bekker, V. A new strip line broad-band measurement evaluation for determining the complex permeability of thin ferromagnetic films / V. Bekker, K. Seemann, H. Leiste // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2004. – P. 327–332.

96. Kalarickal, S. S. Ferromagnetic resonance linewidth in metallic thin films: Comparison of measurement methods / Sangita S. Kalarickal, Pavol Krivosik, Mingzhong Wu, Carl E. Patton, Michael L. Schneider, Pavel Kabos, T. J. Silva, John. P. Nibarder // *Journal of applied physics*. – 2006. – Vol. 99.

97. Beguhn, S. A new highly sensitive broadband ferromagnetic resonance measurement system with lock-in detection / S. Beguhn, Ziyao Zhou, S. Rand, X. Yang, J. Lou, N. X. Sun // *Journal of applied physics*. – 2012. – Vol. 111.

98. Магнитоизмерительный преобразователь: авт. св. 1508178 СССР: МПК<sup>7</sup> G01R 33/02 / Бабицкий А. Н.; заявитель Институт физики им. Л. В. Киренского – №3808141/24-63; заявл. 05.11.1984; опубл. 15.09.1989, Бюл. №34.

99. Тюрнев, В. В. Расчет связанных микрополосковых линий на слоистой подложке, содержащей металлическую ферромагнитную пленку / В. В. Тюрнев // *Радиотехника и электроника*. – 2008. – Т. 53, №7. – С. 858–866.

100. Тюрнев, В. В. Теория цепей СВЧ / В. В. Тюрнев. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – 194 с.

101. Гупта, К. Машинное проектирование СВЧ-устройств / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.

102. Гуревич, А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / А. Г. Гуревич. – М.: Наука, 1973. – 588 с.

103. Программа приема, обработки, визуализации и сохранения данных с датчика слабых магнитных полей на основе тонких магнитных пленок: прогр. для ЭВМ 2018615170 Российская Федерация / Боев Н. М., Беляев Б. А., Батурич Т. Н.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2018612241; заявл. 12.03.2018; опубл. 27.04.2018, Бюл. №5.

104. Бабицкий, А. Н. Передатчики ближнепольных магнитных систем связи / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, Р. Г. Галеев // Успехи современной радиоэлектроники, – 2017. – №19. – С. 111–115.

105. Беляев, Б. А. Проектирование малогабаритного нелинейного усилителя мощности портативного приемопередатчика системы ближнепольной магнитной связи / Б. А. Беляев, А. Н. Бабицкий, Н. М. Боев, А. А. Сушков // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, – 2017. – С. 46–49.

106. Антенна системы ближнепольной магнитной связи: пат. 175975 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> H01Q 7/00, H04B 5/00 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., Боев Н. М., Изотов А. В., Сушков А. А.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017129194; заявл. 15.08.2017; опубл. 25.12.2017, Бюл. №36.

107. Передающая антенна с обратной связью для системы ближнепольной магнитной передачи информации: пат. 182537 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> H01Q 7/00 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., Боев Н. М., Изотов А. В., Клешнина С. А.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – № 2018118261; заявл. 17.05.2018; опубл. 22.08.2018, Бюл. №24.

108. Передающая антенна для системы ближнепольной магнитной связи: пат. 182538 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> H01Q 7/00 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., Боев Н. М., Изотов А. В., Бурмитских А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2018118262; заявл. 17.05.2018; опубл. 22.08.2018, Бюл. № 24.

109. Программа расчета параметров антенн ближнепольных магнитных систем связи с непосредственной связью усилителя мощности с антенной и со связью через трансформатор: прог. для ЭВМ 2017663501 Российская Федерация / Боев Н. М., Беляев Б. А., Сушков А. А.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017660339; заявл. 16.10.2017; опубл. 06.12.2017.

110. Программа приема, обработки, визуализации и сохранения данных с комбинированного электроизмерительного прибора для автоматизированного измерительного стенда: прог. для ЭВМ 2017663470 Российская Федерация / Боев Н. М., Беляев Б. А., Батулин Т. Н.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017660349; заявл. 16.10.2017; опубл. 05.12.2017.

111. Программа приема, обработки, визуализации и сохранения данных с векторного анализатора цепей для автоматизированного измерительного стенда: прог. для ЭВМ 2017663874 Российская Федерация / Боев Н. М., Беляев Б. А., Клешнина С. А.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017660350; заявл. 16.10.2017; опубл. 13.12.2017.

112. Программа визуализации данных, получаемых от трехосевого датчика магнитного поля: прог. для ЭВМ 2018615769 Российская Федерация / Бурмитских А. В., Беляев Б. А., Боев Н. М.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2018612956; заявл. 28.03.2018; опубл. 16.05.2018, Бюл. №5.

113. Программа управления программируемым источником питания постоянного тока, входящего в состав автоматизированного измерительного стенда: прог. для ЭВМ 2018615168 Российская Федерация / Бурмитских А. В., Беляев Б. А., Боев Н. М.; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – №2018612239; заявл. 12.03.2018; опубл. 27.04.2018, Бюл. №5.

114. Абрагам, А. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. Том I: пер. с англ. / А. Абрагам, Б. Блини. – М.: Мир, 1972. – 651 с.

115. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. Том II: пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк – М.: ДМК Пресс, 2015. – 942 с.

116. Беляев, Б. А. Исследование особенностей спектра СВЧ-поглощения нанокристаллических тонких магнитных пленок / Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, П. Н. Соловьев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2018. – Т. 61, №10. – С. 50–56.

117. Izotov, A. V. Numerical calculation of high frequency magnetic susceptibility in thin nanocrystalline magnetic films / A. V. Izotov, B. A. Belyaev, P. N. Solovev, N. M. Boev // Physica B: Physics of Condensed Matter. – 2018. – Vol. 556. – P. 42–47.

118. Изотов, А. В. Особенности двухмагнетонных процессов релаксации в нанокристаллических тонких магнитных пленках / А. В. Изотов, Б. А. Беляев, П. Н. Соловьев, Н. М. Боев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2018. – Т. 61, №12. – С. 153–159.

119. Изотов, А. В. Способ измерения структурной константы тонких магнитных пленок из спектра СВЧ-поглощения / А. В. Изотов, Б. А. Беляев, П. Н. Соловьев, Н. М. Боев // Сборник трудов XXIII международной конференции НМММ, Москва. – 2018. – С. 332–334.

120. Izotov, A. V. Micromagnetic modeling and correlation analysis of magnetic microstructure in nanocrystalline thin films / A. V. Izotov, B. A. Belyaev, P. N. Solovev, N. M. Boev // 9-th Joint European Magnetic Symposia, Mainz, Germany. – 2018. – P. 239.

## Приложение А – Исследование зависимости коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от мощности возбуждения резонатора

**Цель исследования:** определение оптимальной мощности возбуждения чувствительных элементов датчиков слабых магнитных полей.

**Задача исследования:** с использованием автоматизированного комплекса изучить зависимость коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от угла  $\alpha$  между направлением поля  $H_{см}$  и ОН при различных значениях величины постоянного поля смещения  $H_{см}$  и при различных величинах мощности возбуждения резонатора с ТМП.

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_k \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ .  
Направления полей в измерительной установке показаны на рисунке А.1.

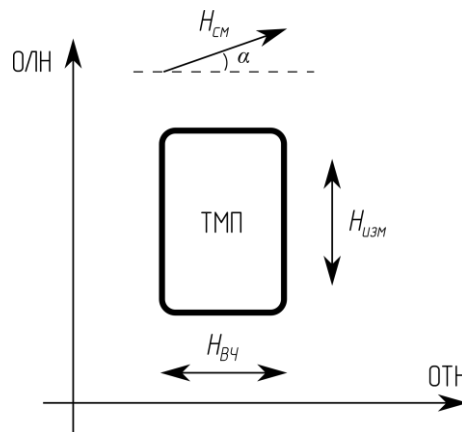


Рисунок А.1 – Направления полей в измерительной установке

Результаты измерений отражены на рисунке А.2. В целях повышения наглядности зависимости  $K_{пр}$  для каждой фиксированной величины поля  $H_{см}$  нормированы на максимальное значение. В абсолютных значениях максимальное значение  $K_{пр}$  наблюдается при  $H_{см} = 7 \text{ Э}$ . При величинах поля  $H_{см} = 8, 9, 10 \text{ Э}$  максимальное значение  $K_{пр}$  падает до 66%, 47%, 35% соответственно.

**Заключение:** с ростом мощности возбуждения резонатора с ТМП наблюдается рост коэффициента преобразования  $K_{пр}$  с одновременным увеличением угла  $\alpha$ , при котором этот максимум наблюдается. Наибольшее изменение угла  $\alpha$  при максимуме  $K_{пр}$  наблюдается при полях  $H_{см}$ , близких к  $H_k$ , т. е. вблизи рабочей области датчиков. Таким образом, оптимальное с точки зрения получения наибольшего  $K_{пр}$  значение мощности возбуждения резонатора лежит в диапазоне 20–30 дБм. Верхнее значение мощности ограничивается мощностью потребления магнитометра и требованиями к электромагнитной совместимости.

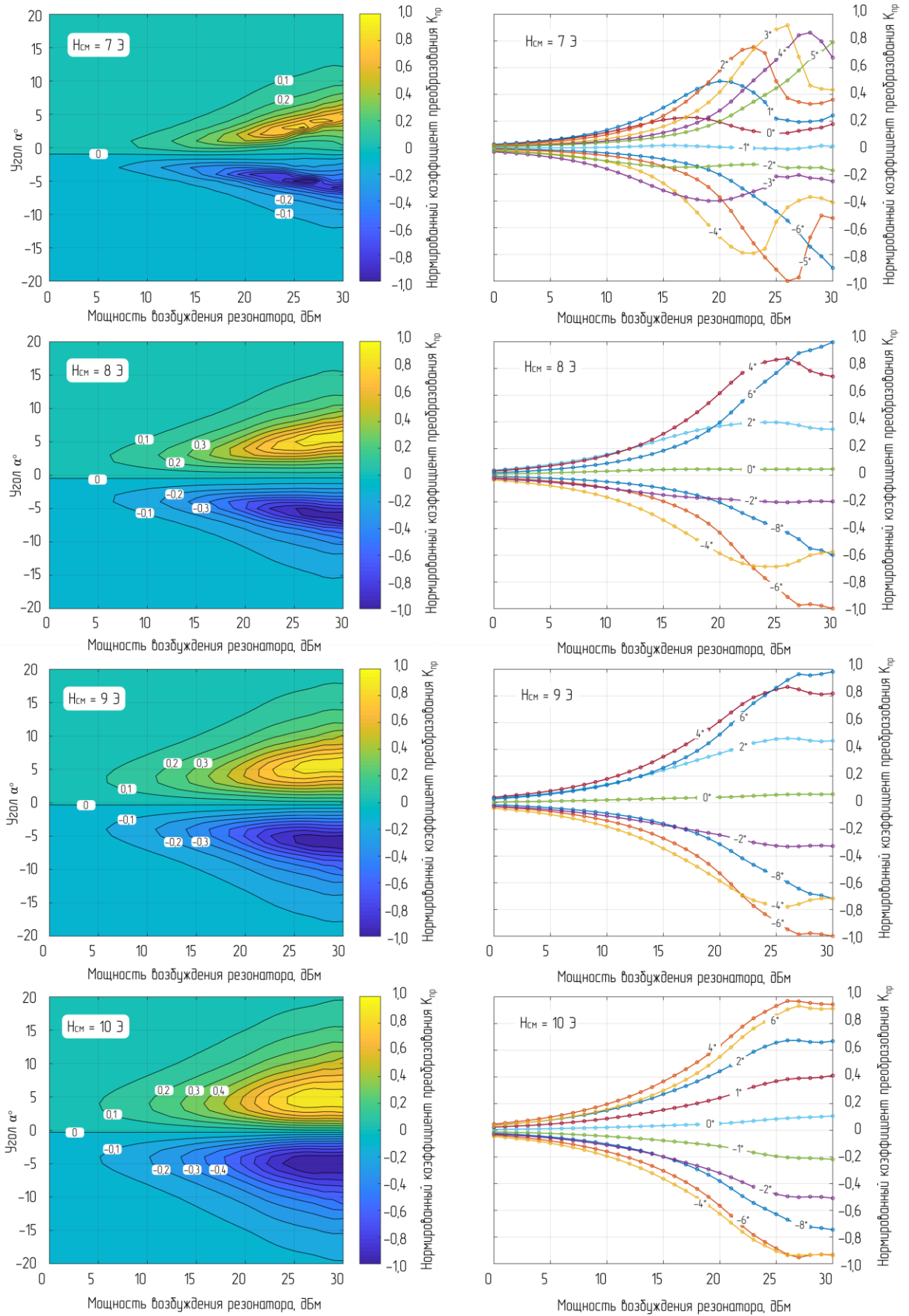


Рисунок А.2 – Зависимости нормированного коэффициента преобразования  $K_{пр}$  от мощности возбуждения резонатора при различных величинах и направлениях поля  $H_{см}$

**Приложение Б – Исследование угловых зависимостей  
коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика**

**Цель исследования:** определение рабочей зоны чувствительного элемента датчика по углу между ОТН и постоянным полем смещения  $H_{см}$ .

**Задача исследования:** с использованием автоматизированного измерительного комплекса изучить зависимость коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика  $K_{пр}$  от угла  $\alpha$  между направлением поля  $H_{см}$  и ОТН при различных значениях величины постоянного поля смещения  $H_{см}$ .

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_k \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ .

**Метод измерений:** резонансный метод с синхронным детектированием сигнала.

Направления полей в измерительной установке показаны на рисунке Б.1.

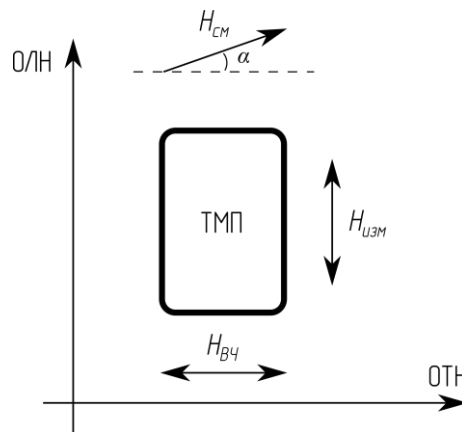


Рисунок Б.1 – Направления полей в измерительной установке

Результаты измерений отражены на рисунке Б.2. Значение коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика  $K_{пр}$  нормировано на максимальное. Шаг развертки по углу  $\alpha$  равен  $0,1^\circ$ . На трехмерных зависимостях отражены две рабочие зоны датчика: для углов  $\alpha$  менее  $0^\circ$  –  $K_{пр}$  имеет отрицательный знак (сигнал с выхода чувствительного элемента находится в противофазе с измеряемым сигналом); для положительных углов  $\alpha$  – положительный знак (выходной сигнал синфазен измеряемому). Максимумы  $K_{пр}$  наблюдаются при углах минус  $3,7^\circ$  и  $1,4^\circ$ , однако абсолютное значение  $K_{пр}$  имеет место вблизи  $\alpha =$  минус  $3,7^\circ$ , что вызвано поворотом ОТН ТМП относительно  $H_{ВЧ}$  на некоторый небольшой угол  $\gamma$ . Экспериментально установлено, что для значений величины поля  $H_{см}$  вблизи  $H_k$  на величину  $K_{пр}$  оказывает влияние направление развертки по углу (явление гистерезиса).

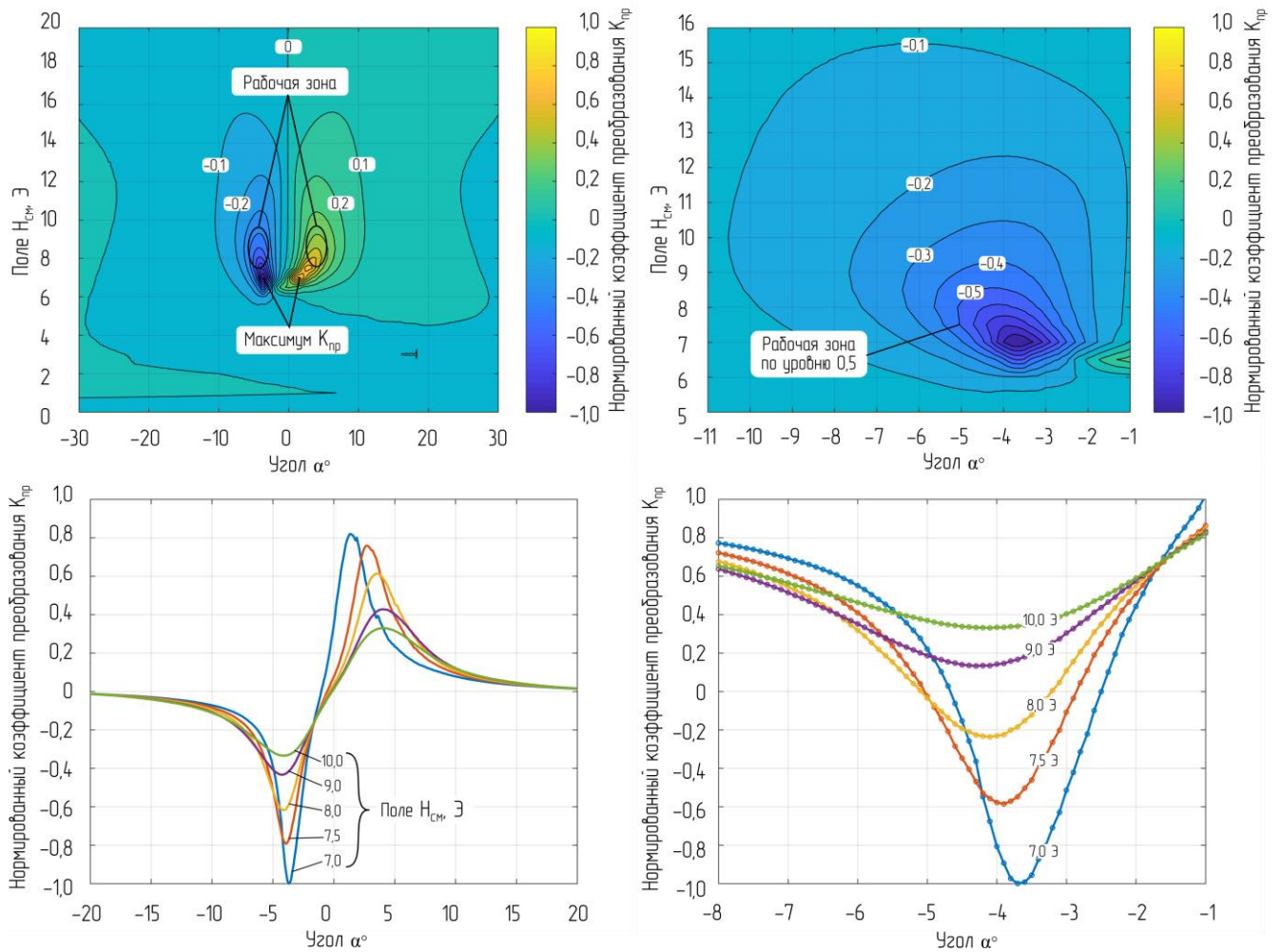


Рисунок Б.2 – Угловые зависимости нормированного коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика для различных значений поля смещения  $H_{см}$  от угла  $\alpha$

**Заключение:** для выбранного образца ТМП угловая ширина рабочей зоны по уровню  $0,5 \cdot K_{пр}$  равна  $\sim 2^\circ$  в диапазоне полей  $H_{см}$  от 7 до 8 Э. Необходимо отметить, что существует прямая зависимость между шириной рабочей зоны по углу  $\alpha$  и дисперсией угла поля анизотропии по рабочей площади ТМП (см. Глава 2, Результаты исследований микрополоскового датчика слабых магнитных полей). Вследствие дисперсии магнитных характеристик по площади образца ширина рабочей зоны может значительно отличаться даже для пленок, полученных в одном технологическом цикле.



**Приложение В – Исследование зависимости коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от величины постоянного поля смещения**

**Цель исследования:** определение рабочей зоны датчика по постоянному полю смещения  $H_{см}$  при различных углах  $\alpha$  между направлением поля  $H_{см}$  и ОТН.

**Задача исследования:** с использованием автоматизированного измерительного комплекса изучить зависимость коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от величины постоянного поля смещения  $H_{см}$  при различных углах  $\alpha$  между направлением поля  $H_{см}$  и ОТН.

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_k \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ .

**Метод измерений:** резонансный метод с синхронным детектированием сигнала.

Направления полей в измерительной установке показаны на рисунке В.1.

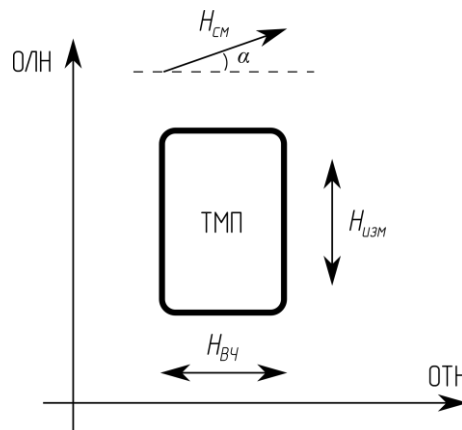


Рисунок В.1 – Направления полей в измерительной установке

На рисунке В.2 показаны результаты экспериментального исследования зависимости нормированного коэффициента преобразования  $K_{np}$  от поля  $H_{см}$  при различных углах  $\alpha$ . Шаг развертки по полю  $H_{см}$  равен  $0,1 \text{ Э}$ . Максимумы  $K_{np}$  наблюдаются при углах минус  $4^\circ$  и  $3^\circ$ . На нижнем левом рисунке отражены зависимости  $K_{np}$  для внутренних углов  $\alpha$  – от минус  $4^\circ$  до  $3^\circ$ , на нижнем правом – для внешних углов  $\alpha$  – от минус  $8^\circ$  до минус  $4^\circ$  и от  $3^\circ$  до  $7^\circ$ . Максимум коэффициента преобразования  $K_{np}$  при  $\alpha = \text{минус } 4^\circ$  превышает максимум при  $\alpha = 3^\circ$ , т. к. ТМП повернута в резонаторе на небольшой угол  $\gamma$  (угол между ОТН и высокочастотным полем возбуждения  $H_{ВЧ}$ ).

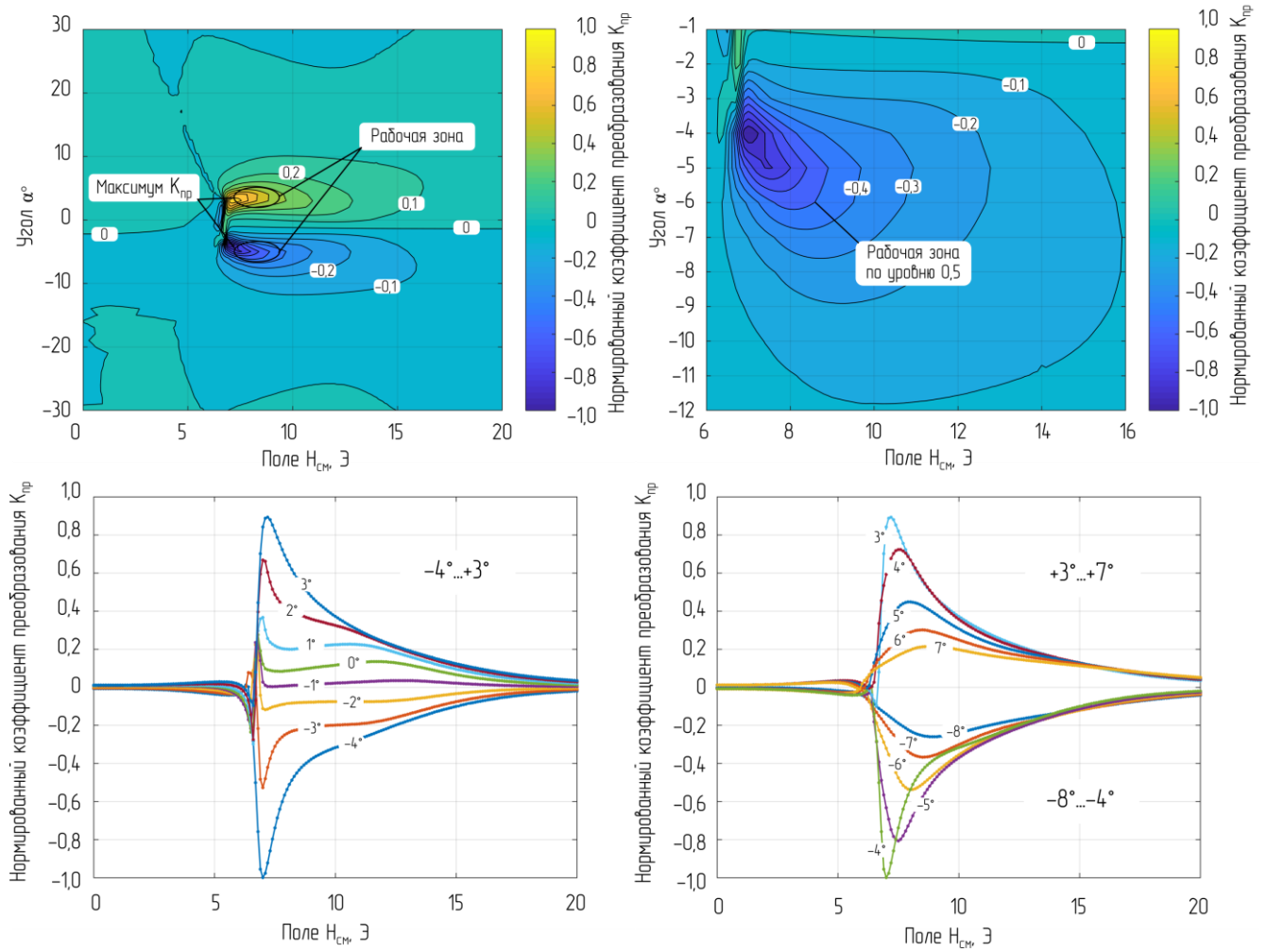


Рисунок В.2 – Результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика  $K_{tr}$  от величины поля  $H_{cm}$  для различных значений угла  $\alpha$

**Заключение:** для исследуемого образца ТМП ширина рабочей зоны по уровню  $0,5 \cdot K_{tr}$  равна  $\sim 2$  Э при значениях угла  $\alpha$  минус  $5^\circ$  и  $4^\circ$ . Однако необходимо учитывать, что с ростом дисперсии угла поля анизотропии по рабочей площади ТМП ширина рабочей зоны увеличивается, а значение максимально достижимого коэффициента преобразования  $K_{tr}$  снижается (см. Глава 2, Результаты исследований микрополоскового датчика слабых магнитных полей).

**Приложение Г – Испытания ближнепольной магнитной системы связи  
с приемной антенной на основе широкополосного магнитометра слабых магнитных полей**

**Цель испытаний:** подтверждение возможности передачи информации в пресном водоеме с использованием ближнепольной магнитной системы связи; подтверждение расчета канала связи; полевые испытания приемной широкополосной антенны на основе разработанного датчика слабых магнитных полей.

**Задачи испытаний:** разработать передающее оборудование для работы в пресной воде на глубинах до 100 м; разработать приемное оборудование на основе индукционных магнитометров и разработанных датчиков слабых магнитных полей; провести испытания оборудования в воздушной среде и в пресном водоеме; выполнить теоретический расчет канала связи для среды без проводимости и сравнить его с результатами испытаний.

**Состав оборудования:** передающая трехвитковая катушка диаметром 1 м (рисунок Г.1); передатчик на частоты 100 кГц (меандр), 150 кГц (двухпозиционная частотная манипуляция – ЧМ2, девиация 5 кГц), 200 кГц (меандр); приемник на основе индукционного магнитометра; приемник на основе разработанного датчика слабых магнитных полей; анализатор спектра.

**Место проведения испытаний:** Красноярское водохранилище.

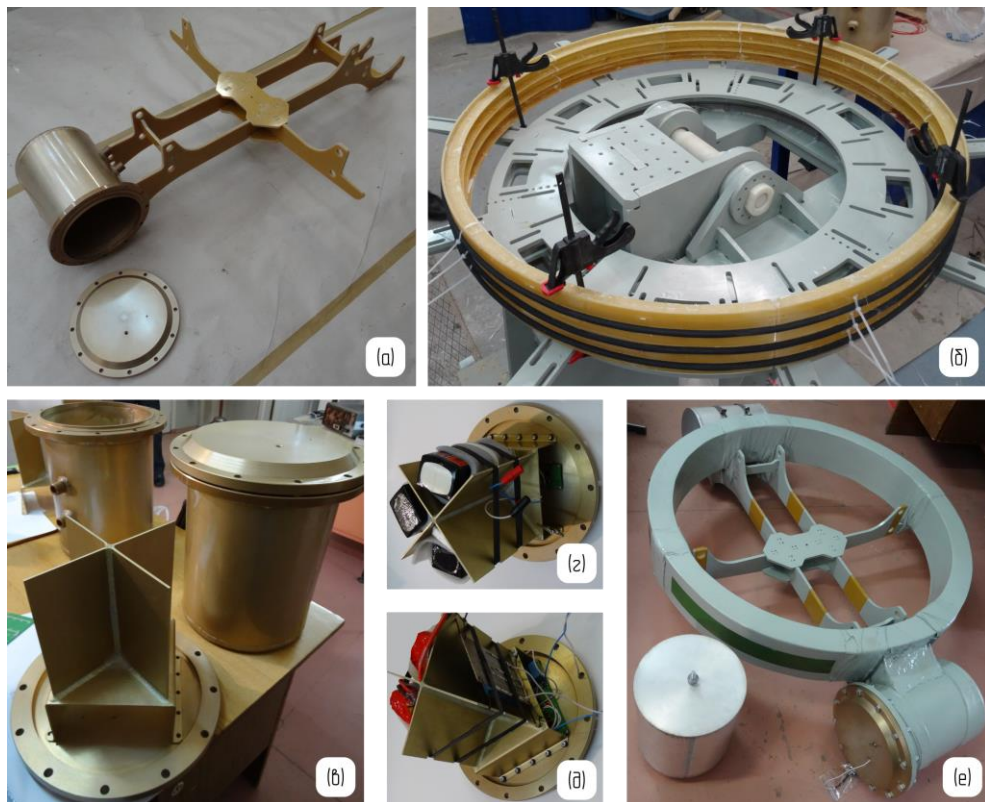


Рисунок Г.1 – Фотографии процесса сборки передающей катушки системы ближнепольной магнитной связи: *a* – рама; *b* – передающая катушка; *в* – отсек электроники; *г*, *д* – варианты передатчика системы связи; *e* – готовая конструкция

Основой конструкции погружаемого в воду передатчика является рама из стеклотекстолита (рисунок Г.1, *а*), на которой закрепляются передающая катушка (*б*) и отсек электроники (*в*). Выводы катушки заведены в отсек электроники через герметичные вводы. Блок электроники вставляется в отсек, соединяется с катушкой, герметизируется. Универсальное исполнение блока электроники позволяет производить замену электронной части передатчика системы связи в полевых условиях.

Испытания проводились в зимне-весенний период времени, что позволило разместить оборудование на поверхности льда и опускать передающую катушку в прорубь. На рисунке Г.2 показана рабочая обстановка при проведении испытаний. Результаты проведения испытаний с погружением передатчика дополнялись измерениями на воздухе: передающая катушка фиксировалась на льду вертикально, приемник системы связи относился на расстояние до 150 м. Максимальная глубина водохранилища в точке проведения испытаний составила ~90 м.



Рисунок Г.2 – Подготовка и погружение передатчика ближнепольной системы магнитной связи

В таблице Г.1 приведены исходные данные и расчет ближнепольного магнитного канала связи без учета влияния проводимости среды. Результаты расчетов и измерений приведены на рисунке Г.3. На рисунке Г.4 показаны фотографии широкополосного магнитометра, разработанного для применения в качестве магнитной антенны ближнепольных систем магнитной связи.

Таблица Г.1 – Исходные данные и расчет ближнепольного магнитного канала связи

№	Наименование	Обозначение	Значение	Ед. изм.	Примечание
<b>Исходные данные</b>					
1	Диаметр катушки	$D$	1	м	
2	Число витков катушки	$n$	3		
3	Длина намотки катушки	$l$	0,1	м	
4	Напряжение генератора (напряжение питания)	$U$	50	В	
5	Частота генератора	$f$	$10^5$	Гц	
6	Спектральная плотность амплитуды шума приемника	$N_0$	$5 \cdot 10^{-15}$	Тл/Гц <sup>1/2</sup>	
7	Ширина полосы пропускания приемника	$\Delta f$	$10^4$	Гц	
8	Дальность связи	$r$	100	м	
<b>Расчетные данные</b>					
9	Площадь катушки	$S$	0,79	м <sup>2</sup>	
10	Индуктивность катушки	$L$	$22 \cdot 10^{-6}$	Гн	Измерено
11	Реактивное сопротивление катушки на частоте $f$	$Z$	13,82	Ом	
12	Ток через катушку	$I$	3,62	А	
13	Реактивная мощность	$P$	180,86	Вар	
14	Магнитный момент катушки	$M$	8,52	А·м <sup>2</sup>	
15	Радиальная составляющая поля на расстоянии $r$	$B_r$	$1,71 \cdot 10^{-12}$	Тл	При $\alpha = 0^\circ$
16			$1,36 \cdot 10^{-6}$	А/м	
17	Тангенциальная составляющая поля на расстоянии $r$	$B_\tau$	$8,52 \cdot 10^{-13}$	Тл	При $\alpha = 90^\circ$
18			$6,78 \cdot 10^{-7}$	А/м	
19	Шум в полосе частот приемника	$N$	$5 \cdot 10^{-13}$	Тл	
20	Отношение сигнал/шум	$SNR$	<b>10,65</b>	<b>дБ</b>	Для $B_r$
21			<b>4,63</b>	<b>дБ</b>	Для $B_\tau$

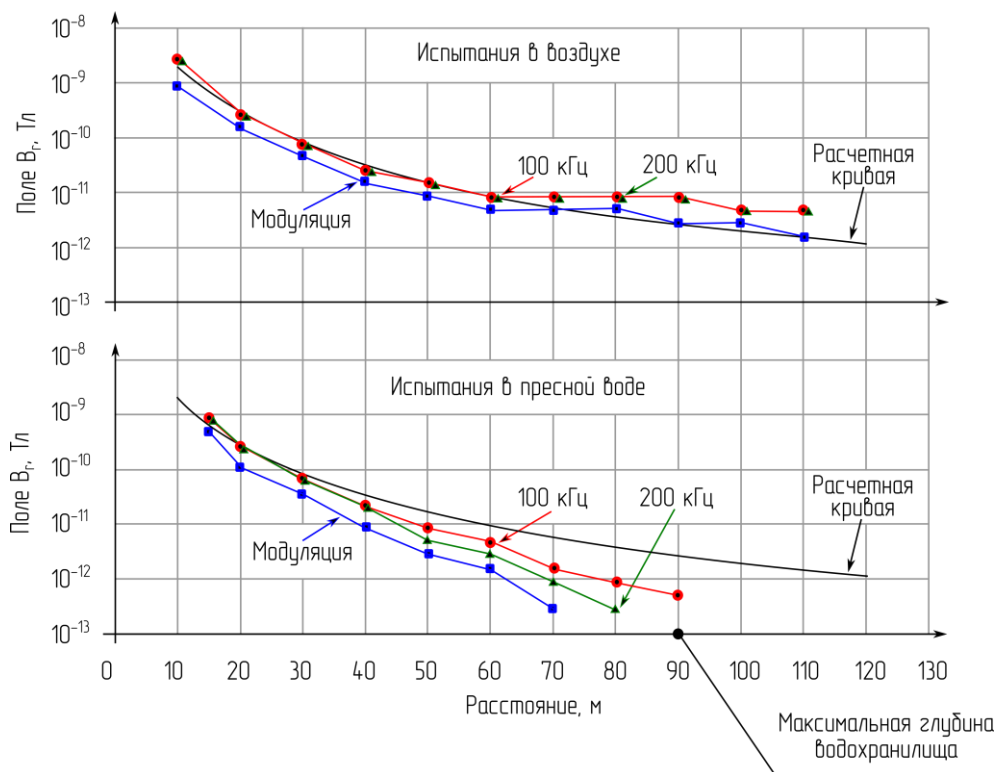


Рисунок Г.3 – Результаты экспериментальных измерений и расчетные зависимости



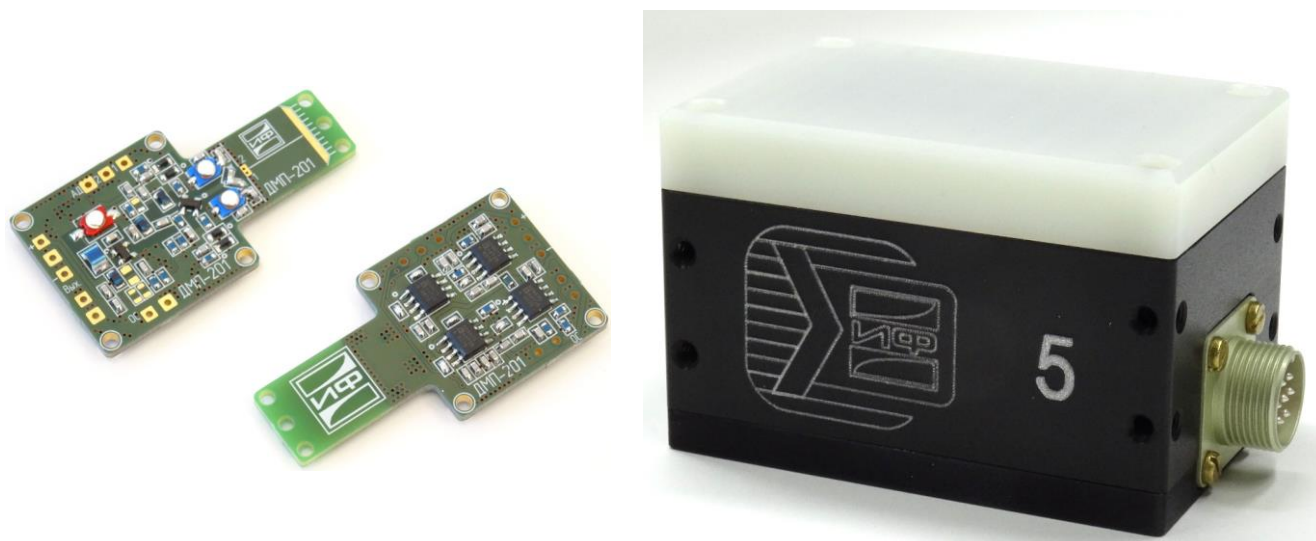


Рисунок Г.4 – Печатная плата широкополосного магнитометра на основе микрополосковых резонаторов с двумя ТМП и внешний вид магнитометра

**Заключение:** Результаты практических измерений качественно согласуются с результатами теоретических расчетов. В средах с малой проводимостью (менее 1 мСм/м) возможна передача данных по ближнепольному каналу связи, причем оптимистичная оценка канала может быть получена исходя из выражений для воздушного канала без проводимости. При работе на частотах более  $10^4$  Гц наиболее чувствительной приемной антенной является индукционный магнитометр. При работе в средах с высокой проводимостью необходимо выбирать максимально низкие частоты связи, в этом случае возможно применение малогабаритных, высокочувствительных и широкополосных датчиков на основе микрополоскового резонатора с ТМП. Испытания разработанного магнитометра в полевых условиях подтвердили его заявленные характеристики.

## Приложение Д – Исследование спектров ферромагнитного резонанса используемых в датчиках тонких магнитных пленок

**Цель исследования:** исследование зависимостей частоты ФМР от поля для двух направлений  $H_{см}$  – вдоль ОТН, вдоль ОЛН.

**Задача исследования:** с использованием автоматизированного комплекса изучить дисперсионные кривые ФМР в диапазоне частот высокочастотного поля возбуждения  $H_{вч}$  и диапазоне постоянных полей смещения  $H_{см}$ , соответствующих рабочим для чувствительного элемента датчика слабых магнитных полей.

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_k \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ .

**Метод измерений:** нерезонансный метод с синхронным детектированием сигнала; диапазон развертки по полю – от 0 до 20 Э с шагом 0,5 Э; диапазон развертки по частоте – от 50 до 1400 МГц; для двух направлений поля  $H_{см}$  – вдоль ОТН, вдоль ОЛН.

Результаты измерений отображены на рисунках Д.1 и Д.2.

**Заключение:** для исследуемого образца получены зависимости частоты ФМР от поля (рисунок Д.2), необходимые для анализа работы чувствительного элемента датчика слабых магнитных полей. Результаты измерений показывают, что максимум чувствительности датчика достигается в области между кривыми, соответствующими зависимостям частоты ФМР от поля смещения при ориентации  $H_{см} \parallel$  ОЛН и  $H_{см} \parallel$  ОТН (рисунок Д.1).

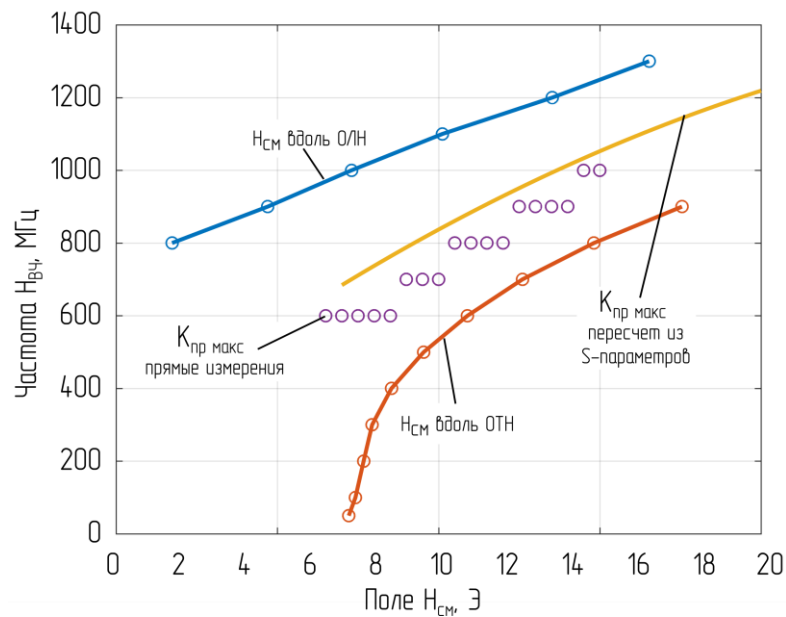


Рисунок Д.1 – Зависимости частоты ФМР от величины поля  $H_{см}$  и кривые максимума  $K_{пр}$ , полученные прямым методом и методом пересчета из S-параметров

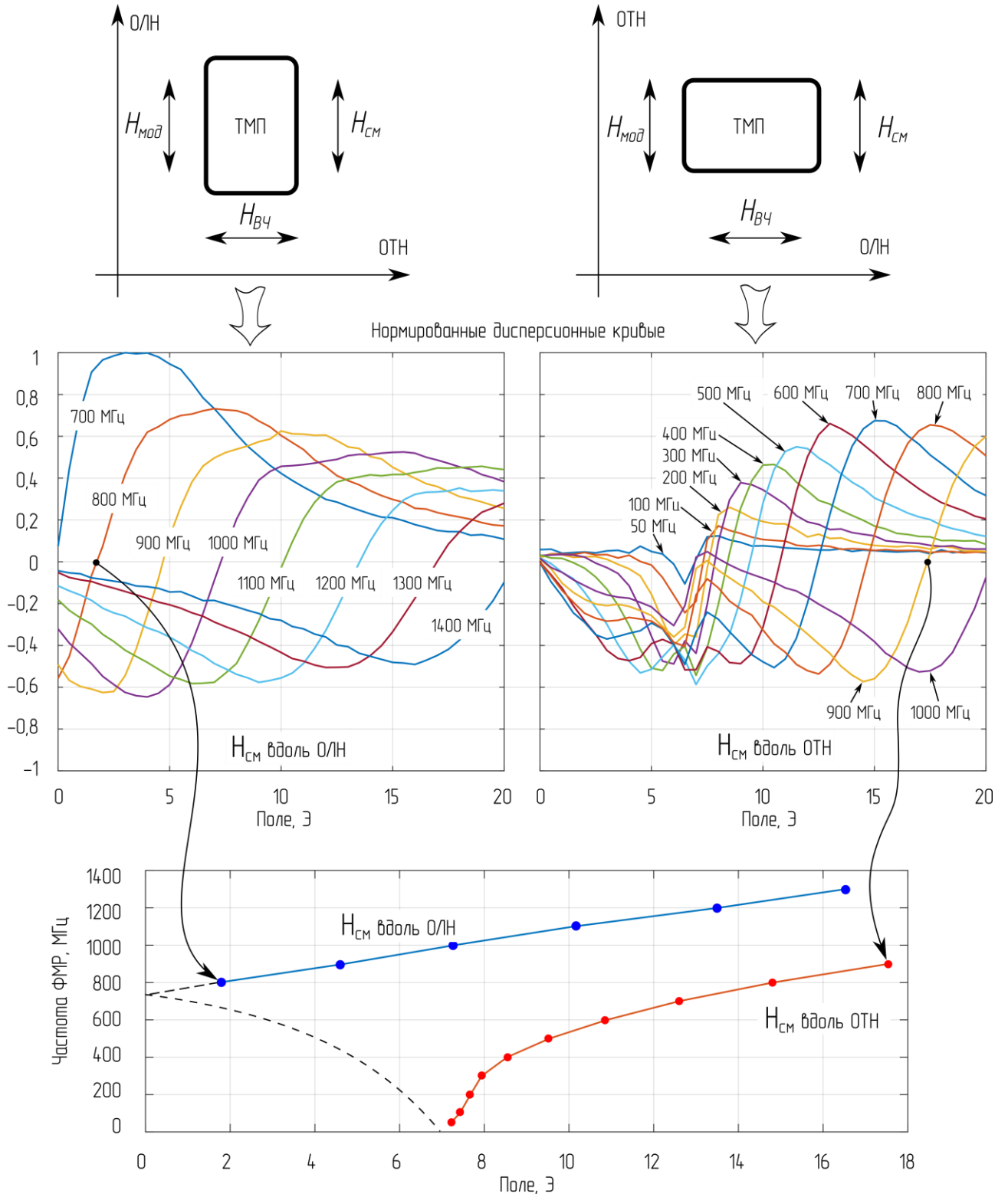


Рисунок Д.2 – Нормированные дисперсионные кривые ФМР  
для исследуемого образца ТМП



## Приложение Е – Исследование характеристик чувствительного элемента датчика резонансным методом с использованием СВЧ-генератора

**Цель исследования:** определение оптимальных параметров работы датчика слабых магнитных полей, при которых достигается наибольшее значение коэффициента преобразования.

**Задачи исследования:** с использованием автоматизированного комплекса изучить зависимости от величины поля смещения  $H_{см}$  и угла  $\alpha$  между  $H_{см}$  и ОН следующих параметров чувствительного элемента: резонансная частота; ширина полосы пропускания резонатора; добротность резонатора; коэффициент преобразования чувствительного элемента. Измерения провести при различных значениях величины  $H_{см}$  и различных углах  $\alpha$ .

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_k \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ .

**Метод измерений:** резонансный метод без синхронного детектирования; диапазон развертки по полю – от 4 до 12 Э с шагом 1 Э.

Направления полей в измерительной системе показаны на рисунке Е.1.

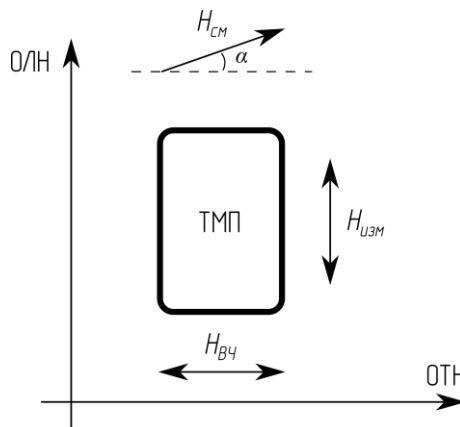


Рисунок Е.1 – Направления полей в измерительной системе

Результаты измерений отображены на рисунке Е.2.

**Заключение:** максимум коэффициента преобразования  $K_{пр}$  чувствительного элемента достигается при значении поля  $H_{см} = H_k$ , при котором наблюдается наибольшая скорость изменения добротности резонатора от угла  $\alpha$ . Таким образом, оценка коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика на ТМП может быть получена путем дифференцирования зависимости добротности резонатора по углу  $\alpha$  или, что эквивалентно, путем дифференцирования вносимых пленкой в контур потерь по углу  $\alpha$ . Экспериментально установлено, что в рабочей области датчика при  $H_{см} > H_k$  и малых углах  $\alpha$  частота резонатора (соответственно и  $\mu'$ ) изменяется незначительно.

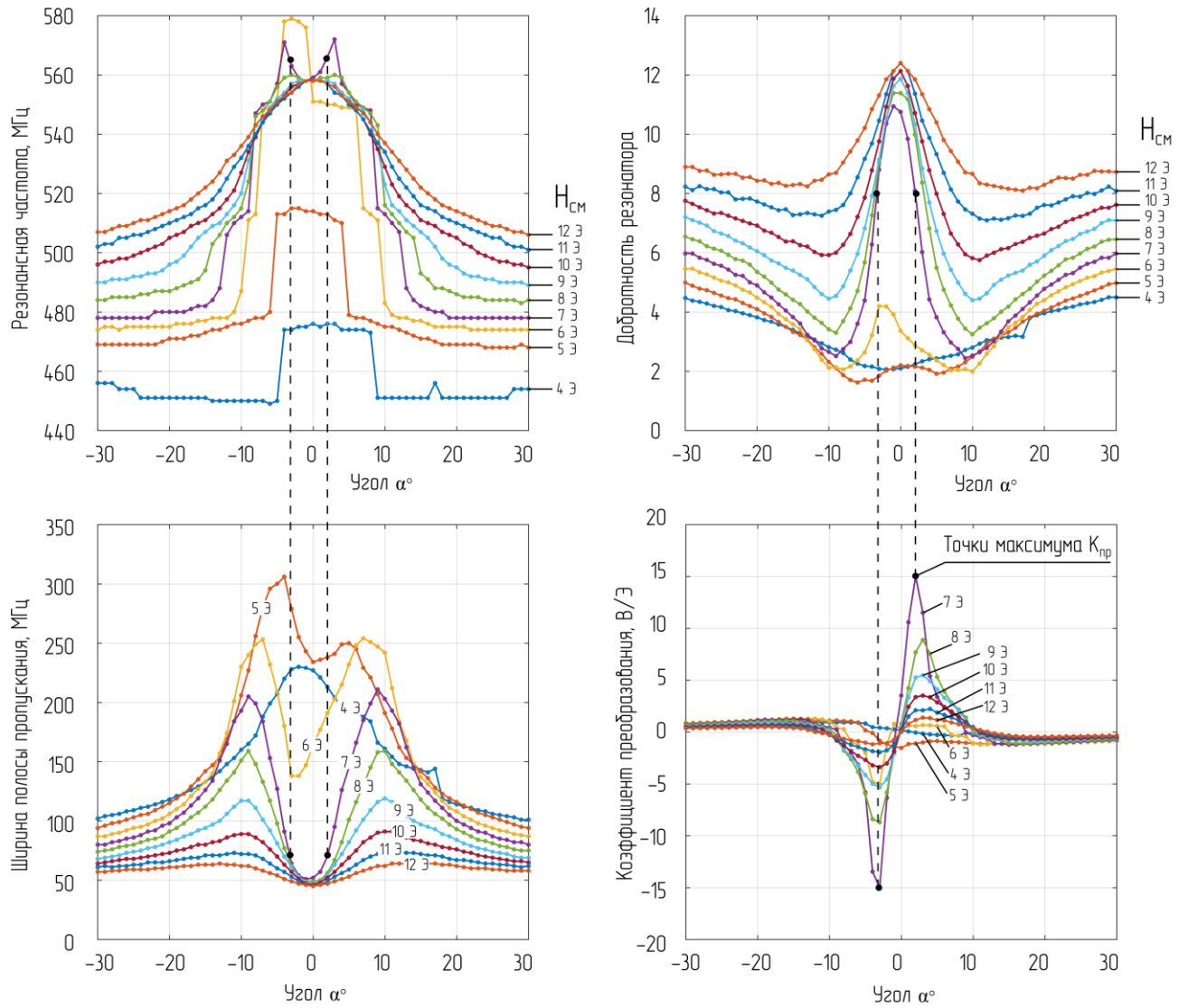


Рисунок Е.2 – Результаты исследований параметров чувствительного элемента датчика: зависимости резонансной частоты; ширины полосы пропускания; добротности резонатора и коэффициента преобразования от величины постоянного поля смещения  $H_{CM}$  и угла  $\alpha$

**Приложение Ж – Исследование характеристик чувствительного элемента датчика  
резонансным методом с использованием векторного анализатора цепей**

**Цель исследования:** определение оптимальных параметров работы датчика слабых магнитных полей, при которых достигается наибольшее значение коэффициента преобразования.

**Задачи исследования:** с использованием автоматизированного измерительного комплекса изучить зависимость резонансной частоты чувствительного элемента и измерить зависимость вносимых в резонатор пленкой потерь от значения величины поля  $H_{см}$  и угла  $\alpha$  между  $H_{см}$  и ОТН. Измерения провести с использованием векторного анализатора цепей. Сопоставить результаты измерений с результатами, полученными при измерении резонансным методом с использованием СВЧ-генератора (приложение Е).

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_k \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ .

**Метод измерений:** резонансный метод с использованием векторного анализатора цепей.

Направления полей в измерительной системе показаны на рисунке Ж.1.

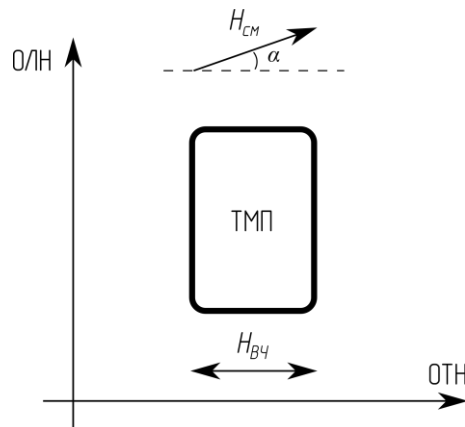


Рисунок Ж.1 – Направления полей в измерительной системе

Прямые результаты измерений отображены на рисунке Ж.2: для каждого значения поля  $H_{см}$  и каждого значения угла  $\alpha$  получена частотная зависимость S-параметров в диапазоне от 100 МГц до 1 ГГц. Результаты обработки измерений отражены на рисунке Ж.3: по минимуму значения модуля  $S_{11}$  определяется резонансная частота системы; фиксируется значение модуля  $S_{11}$  в минимуме, результаты нормируются.

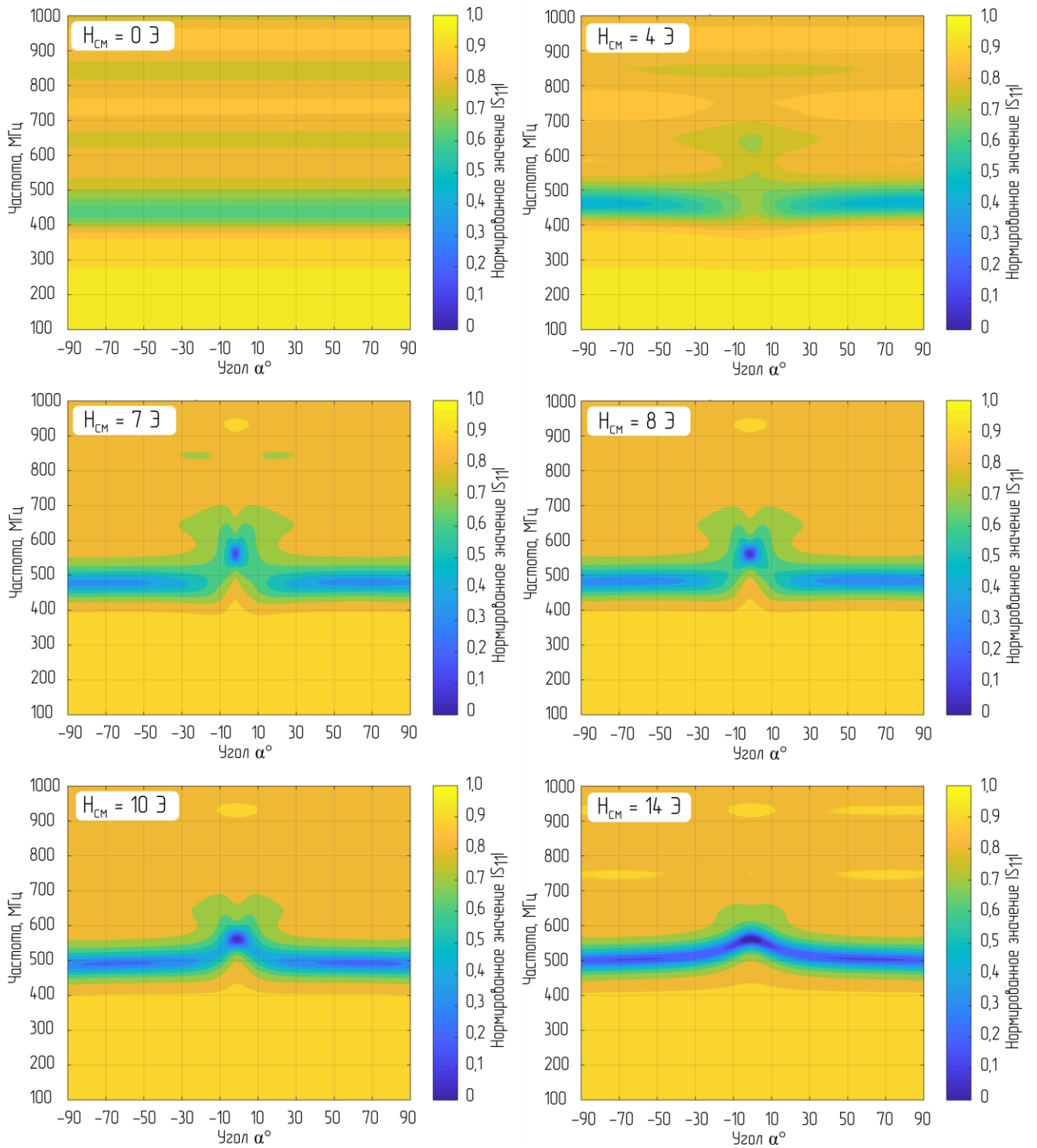


Рисунок Ж.2 – Зависимости нормированного значения модуля  $S_{11}$  от значений величины поля  $H_{cm}$  и угла  $\alpha$  в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц

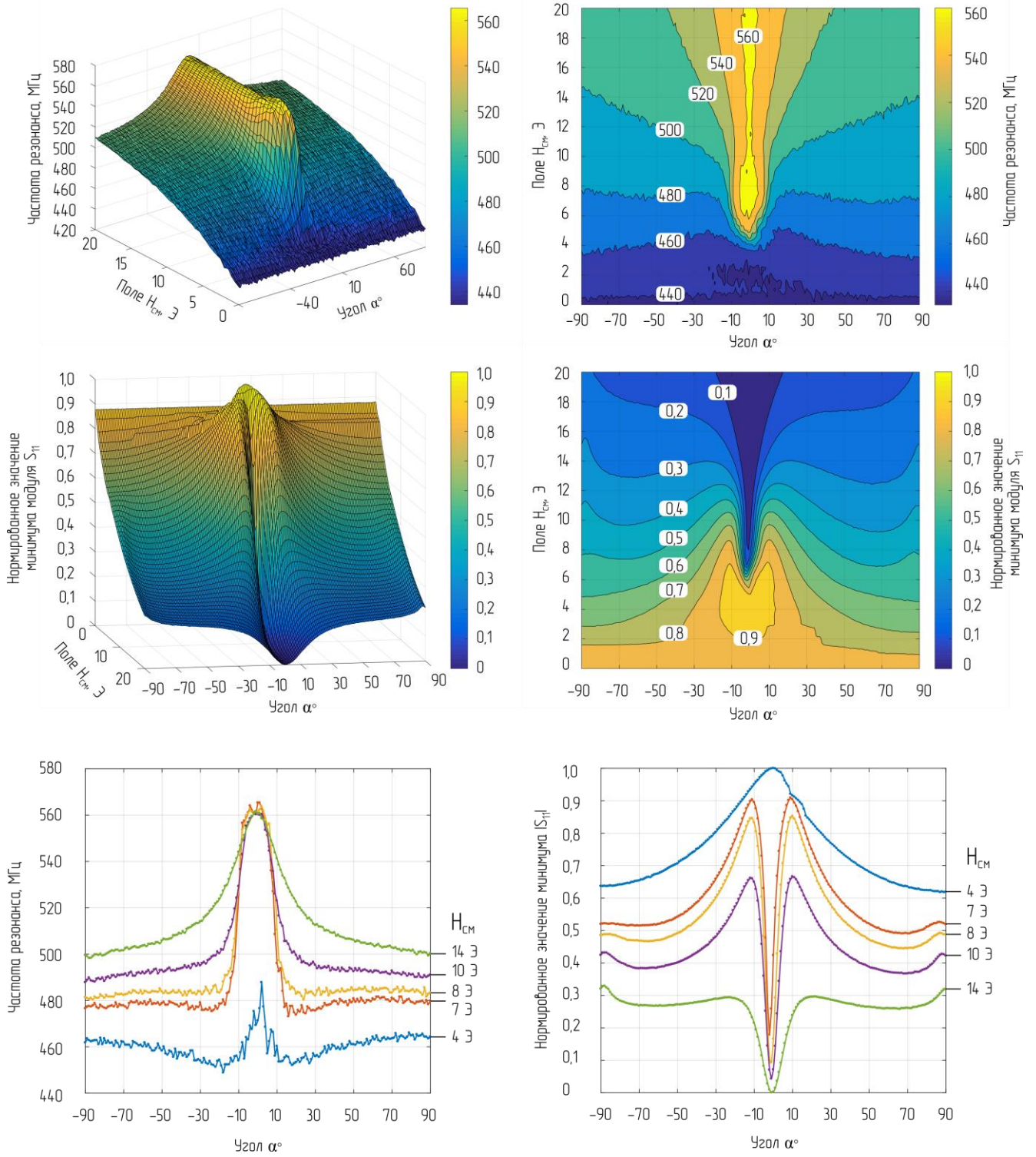


Рисунок Ж.3 – Экспериментально полученные зависимости частоты резонатора чувствительного элемента и нормированного значения минимума модуля  $S_{11}$  от угла  $\alpha$  для различных значений величины поля  $H_{cm}$

По результатам прямых измерений параметров чувствительного элемента датчика слабых магнитных полей резонансным методом с использованием СВЧ-генератора (приложение Е) был сделан вывод о возможности оценки коэффициента преобразования чувствительного элемента путем дифференцирования вносимых в контур пленкой потерь по углу  $\alpha$  (см. заключение приложения Е). На рисунке Ж.4 показан результат оценки коэффициента преобразования этим методом.

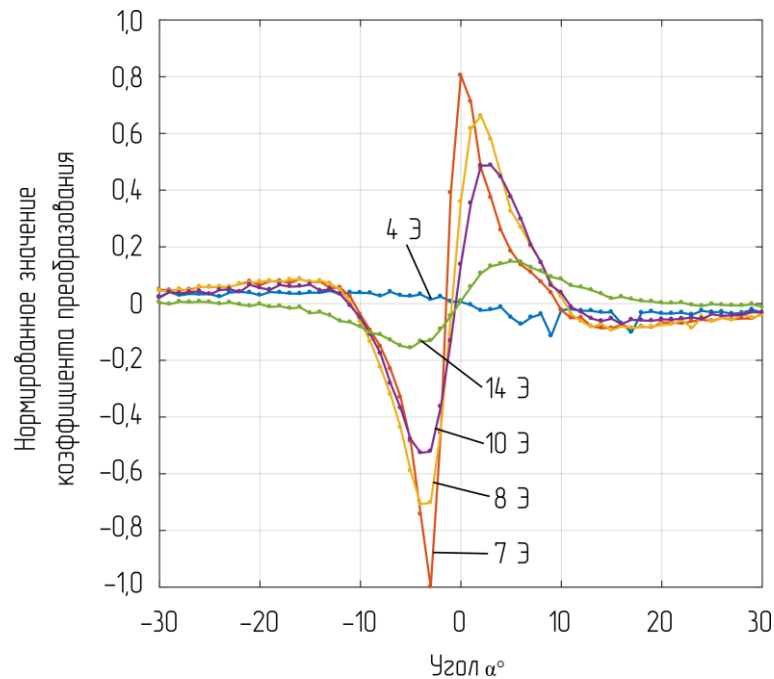


Рисунок Ж.4 – Зависимости нормированного коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от направления и величины постоянного поля смещения, полученные на основе оценки резонансным методом с использованием векторного анализатора цепей

**Заключение:** результаты измерений резонансным методом с использованием векторного анализатора цепей качественно повторяют результаты метода прямых измерений с использованием СВЧ-генератора (приложение Е). Экспериментально установлено, что максимум  $K_{np}$  наблюдается при условиях, когда обеспечивается наибольшая скорость изменения потерь от угла  $\alpha$ . Использование векторного анализатора цепей позволяет ускорить процесс измерения, т. к. за один цикл измерений анализатор выдает результат для тысяч точек частотной развертки. Этот метод может быть использован для качественной оценки параметров большого количества образцов ТМП при серийном изготовлении датчиков на ТМП.

## Приложение II – Исследование характеристик чувствительного элемента датчика при различных частотах поля возбуждения

**Цель исследования:** определение оптимальной частоты поля возбуждения  $H_{Вч}$ .

**Задачи исследования:** с использованием автоматизированного измерительного комплекса изучить зависимость коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика для частот поля возбуждения  $H_{Вч}$  400; 600; 800 МГц от величины и направления постоянного поля смещения  $H_{см}$ .

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по 1500 Å,  $H_k \sim 7$  Э,  $M_s = 1100$  Гс.

**Метод измерений:** нерезонансный метод с использованием СВЧ-генератора и схемы синхронного детектирования сигнала.

Направления полей в измерительной системе показаны на рисунке И.1.

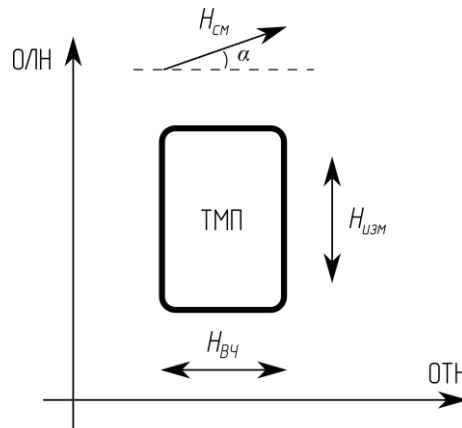


Рисунок И.1 – Направления полей в измерительной системе

Результаты измерений для трех частот поля  $H_{Вч}$  отображены на рисунке И.2. Нерезонансный способ измерений позволяет оценить: зависимость коэффициента преобразования от частоты возбуждения поля  $H_{Вч}$ ; зависимость оптимального угла  $\alpha$  от частоты возбуждения поля  $H_{Вч}$  для получения максимального значения коэффициента преобразования.

**Заключение:** для исследуемого образца ТМП максимальное значение  $K_{пр}$  наблюдается на частотах поля возбуждения  $H_{Вч}$  вблизи 600 МГц; оптимальные значения угла  $\alpha$  составляют около  $\pm 4^\circ$ . С уменьшением частоты поля возбуждения  $H_{Вч}$  значение оптимального угла уменьшается. Данный факт необходимо учитывать при конструировании датчика, так как малым углам  $\alpha$  соответствует узкая рабочая зона и предъявляются дополнительные требования для удержания рабочей точки датчика в точке максимума коэффициента преобразования.



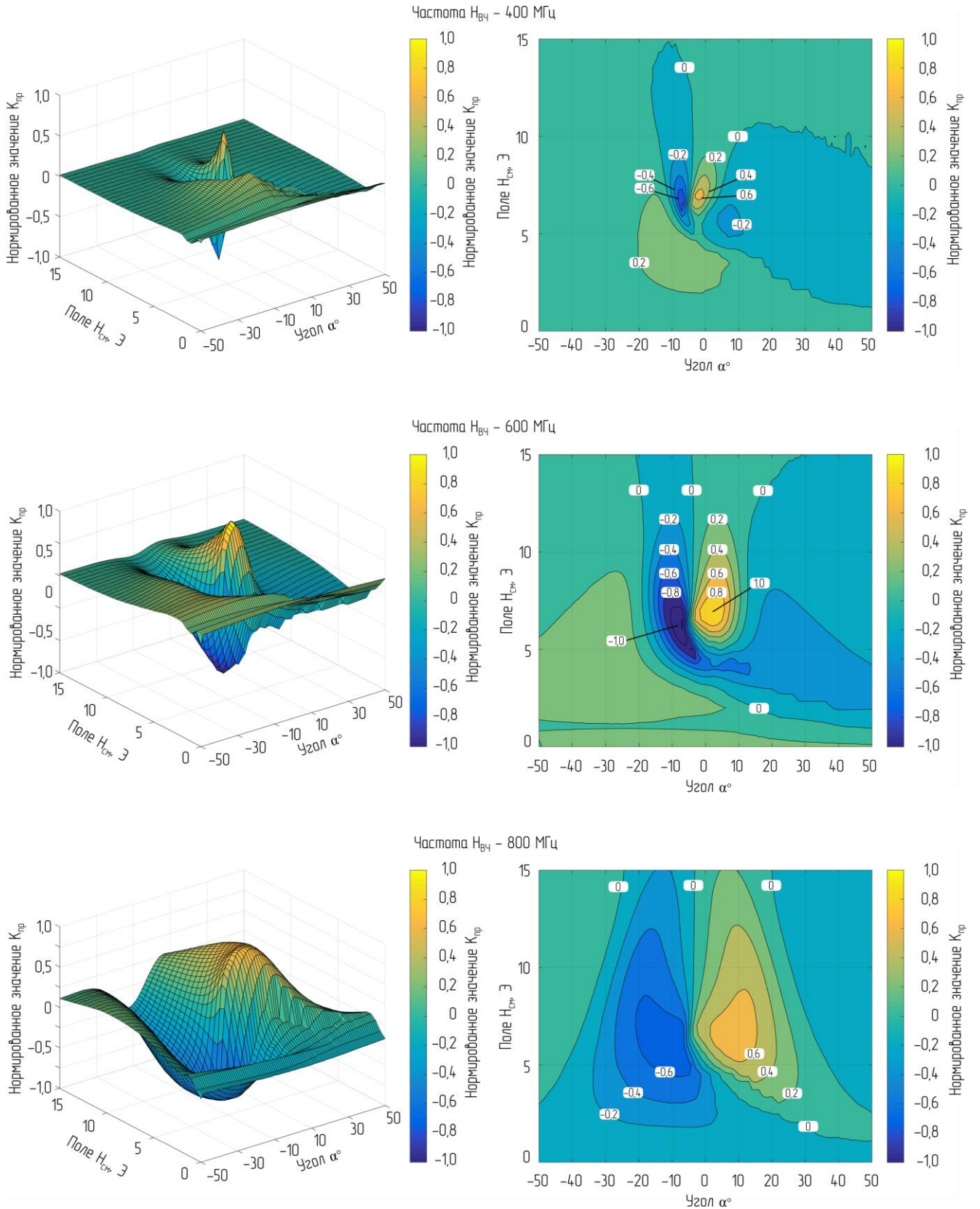


Рисунок И.2 – Зависимости нормированного значения коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика  $K_{пр}$  при фиксированных частотах поля возбуждения  $H_{вч} = 400; 600; 800$  МГц от величины угла  $\alpha$



**Приложение К – Исследование спектров поглощения высокочастотной энергии  
используемыми в датчиках тонкими магнитными пленками**

**Цель исследования:** исследование спектров поглощения энергии поля  $H_{Вч}$  в широкой полосе частот при различных величинах поля  $H_{см}$  и значениях угла  $\alpha$  для определения оптимального режима работы чувствительного элемента датчика.

**Задачи исследования:** с использованием автоматизированного измерительного комплекса изучить спектры поглощения высокочастотной энергии поля  $H_{Вч}$  в диапазоне частот от 100 МГц до 2 ГГц при величинах поля  $H_{см}$  от 0 до 20 Э для значений угла  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по 1500 Å,  $H_k \sim 7$  Э,  $M_s = 1100$  Гс.

**Метод измерений:** нерезонансный метод с использованием векторного анализатора цепей.

Направления полей в измерительной системе показаны на рисунке К.1.

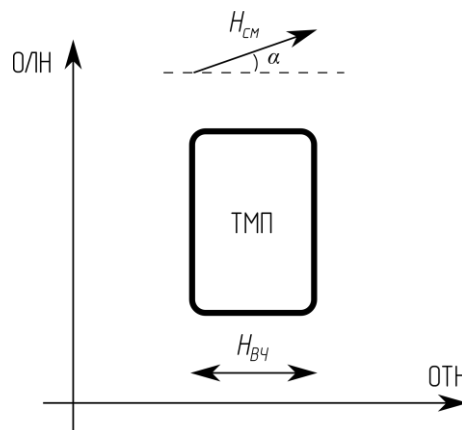


Рисунок К.1 – Направления полей в измерительной системе

На рисунке К.2 отображены зависимости нормированного значения модуля  $S_{11}$  от угла  $\alpha$  и частоты поля возбуждения  $H_{Вч}$  при фиксированных величинах поля  $H_{см} = 0; 3; 7; 8; 10; 20$  Э; на рисунке К.3 – при фиксированных частотах поля  $H_{Вч} = 200; 400; 600; 800; 1000; 140$  МГц; на рисунке К.4 – при фиксированных углах  $\alpha = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 90^\circ$ .

В практическом смысле отображение экспериментальных зависимостей при фиксированных частотах более удобно (рисунок К.3), так как диапазон подстройки частоты поля возбуждения  $H_{Вч}$  в датчиках ограничен, а величина и направление поля смещения  $H_{см}$  могут изменяться в значительных пределах путем изменения параметров магнитной системы.

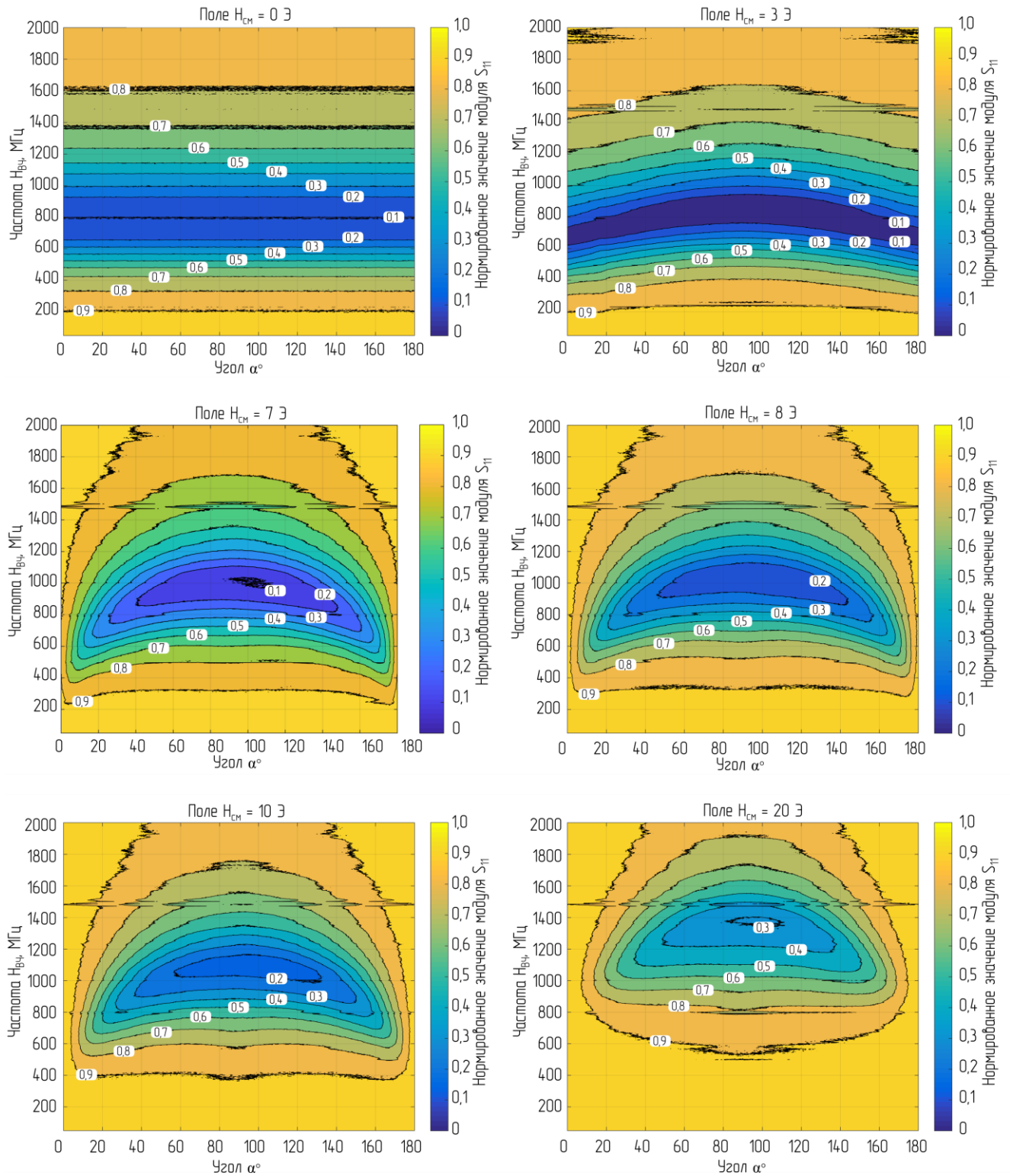


Рисунок К.2 – Зависимости нормированного значения модуля  $S_{11}$  от частоты поля возбуждения  $H_{вч}$  и направления постоянного поля смещения  $H_{см}$  при фиксированных значениях величины поля  $H_{см} = 0; 3; 7; 8; 10; 20$  Э

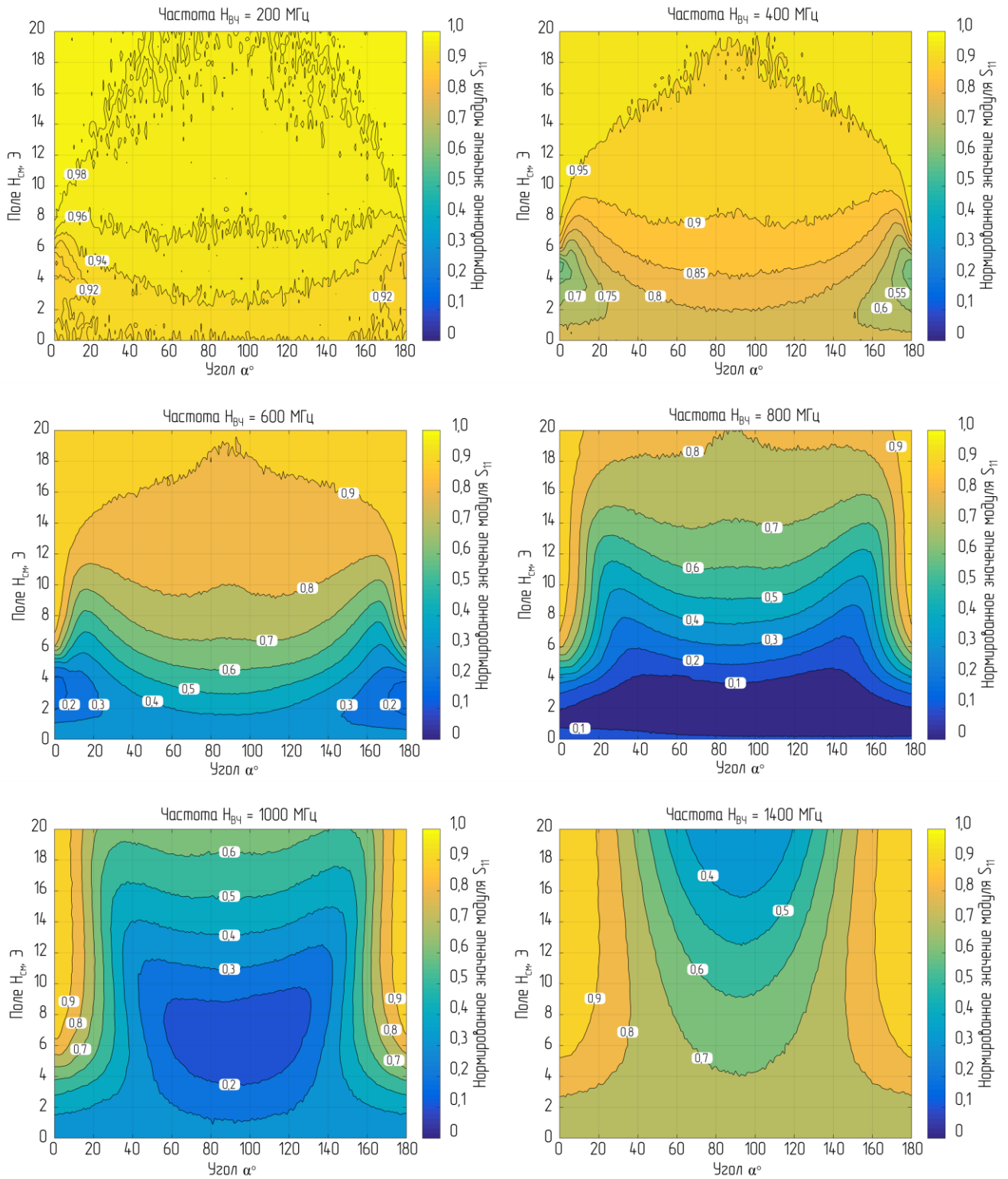


Рисунок К.3 – Зависимости нормированного значения модуля  $S_{11}$

от величины и направления постоянного поля смещения  $H_{см}$

при фиксированных значениях частоты поля  $H_{вч}$  – 200; 400; 600; 800; 1000; 1400 МГц

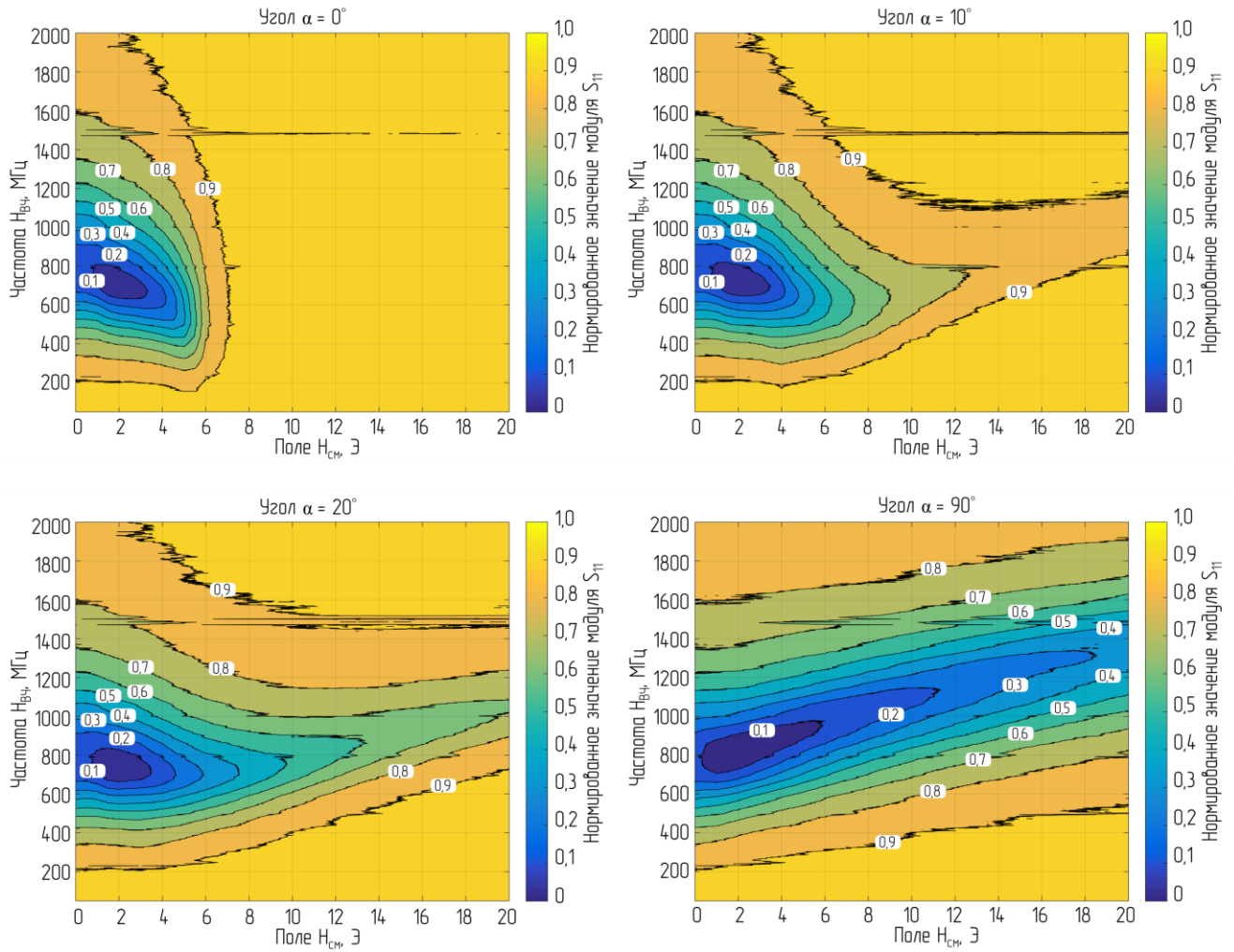


Рисунок К.4 – Зависимости нормированного значения модуля  $S_{11}$  от частоты поля возбуждения  $H_{VЧ}$  и величины постоянного поля смещения  $H_{СМ}$  при фиксированных значениях угла  $\alpha = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 90^\circ$

**Закключение:** из результатов проведенного эксперимента даже без дополнительной обработки данных хорошо видно, что в полях  $H_{СМ}$ , равных полю анизотропии ТМП  $H_k$ , наблюдается максимальная скорость изменения параметров ФМР при минимальных углах между полем  $H_{СМ}$  и ОТН. Таким образом, относительная оценка коэффициента преобразования чувствительного элемента может быть получена путем расчета первой производной от измеряемых зависимостей (рисунки К.2, К.3) по углу  $\alpha$ .

**Приложение Л – Исследование влияния угла поворота пленки в резонаторе  
на параметры чувствительного элемента датчика**

**Цель исследования:** исследование влияния поворота ТМП в микрополосковом резонаторе на параметры чувствительного элемента датчика слабых магнитных полей.

**Задачи исследования:** с использованием автоматизированного измерительного комплекса изучить зависимости параметров чувствительного элемента датчика от поворота ТМП в резонаторе на угол  $\gamma$ .

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_K \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ .

**Метод измерений:** нерезонансный метод с использованием векторного анализатора цепей.

При проведении различных измерений ТМП может быть установлена в резонаторе под некоторым углом  $\gamma$ , что сказывается на результатах измерения коэффициента преобразования чувствительного элемента. Направления полей в измерительной системе показаны на рисунке Л.1.

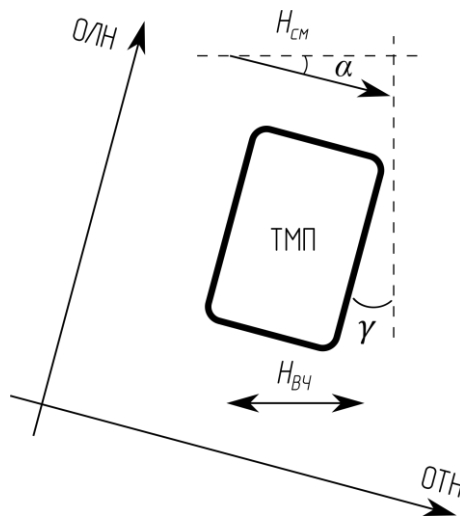


Рисунок Л.1 – Направления полей в измерительной системе

Определение направления ОТН может быть произведено с использованием прибора, позволяющего измерять петли гистерезиса – феррометра (петлескопа) при условии однородности магнитных характеристик по площади ТМП. Для экспериментальных измерений использовались ТМП круглой формы. На рисунке Л.2 отображены зависимости от угла  $\alpha$  нормированного значения модуля  $S_{11}$  при углах  $\gamma = 0^\circ, 20^\circ, 45^\circ, 70^\circ$  и фиксированных значениях величины постоянного поля смещения  $H_{см}$ . Экспериментально установлено, что при  $\gamma \neq 0^\circ$  максимум  $K_{пр}$  наблюдается при значении величины поля  $H_{см}$ , отличном от  $H_K$ .

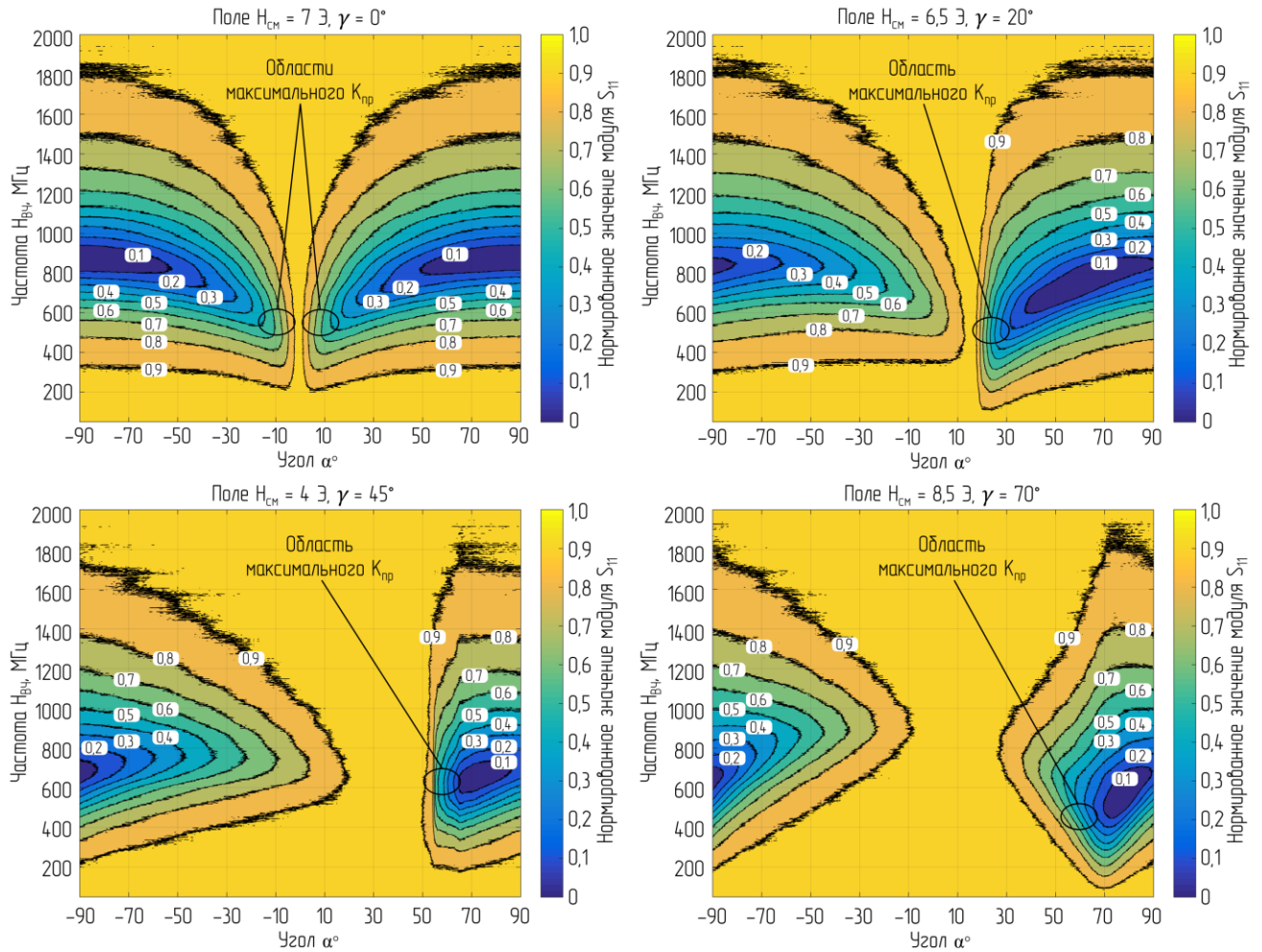


Рисунок Л.2 – Зависимости нормированного значения модуля  $S_{11}$

от частоты поля возбуждения  $H_{вч}$  и угла  $\alpha$

для четырех значений углов  $\gamma$

Величина поля анизотропии для ТМП находится вблизи 7 Э, максимальное значение  $K_{пр}$  при  $\gamma = 0^\circ$  соответствует  $H_{см} = H_k$ , наблюдаются две области с равными по модулю и противоположными по знаку значениями  $K_{пр}$ . При увеличении угла  $\gamma$  угловые зависимости поглощения энергии СВЧ пленкой становятся несимметричными, при этом возрастает максимум абсолютного значения  $K_{пр}$ . Максимальное значение  $K_{пр}$  наблюдается при  $\gamma = 20^\circ$ , при  $\gamma = 0^\circ$   $K_{пр}$  составляет 58% от максимального, при  $\gamma = 45^\circ$  – 90%, при  $\gamma = 70^\circ$  – 61%.

**Заключение:** максимальное значение  $K_{пр}$  удается получить при повороте ТМП в резонаторе на угол  $\gamma$  около  $20^\circ$ , однако на практике необходимо учитывать уменьшение рабочей зоны по углу  $\alpha$ . Для отрицательных значений угла  $\alpha$  значение величины  $K_{пр}$  уменьшилось и значительно возросла ширина рабочей зоны по углу  $\alpha$ . В ходе эксперимента установлено, что при  $\gamma \neq 0^\circ$  необходимо учитывать изменение направления максимальной чувствительности датчика, т. к. происходит вращение его диаграммы направленности.

**Приложение М – Исследование магнитных спектров  
используемых в датчиках тонких магнитных пленок**

**Цель исследования:** изучение магнитных спектров ТМП в рабочей области чувствительных элементов датчиков на ТМП.

**Задачи исследования:** с использованием автоматизированного измерительного комплекса исследовать магнитные спектры ТМП путем пересчета значений, получаемых от измерителя S-параметров; определить на графиках рабочую область датчика.

**Исследуемый образец:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $H_K \sim 7 \text{ Э}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ .

**Метод измерений:** нерезонансный метод с использованием векторного анализатора цепей.

Направления полей в измерительной системе показаны на рисунке М.1.

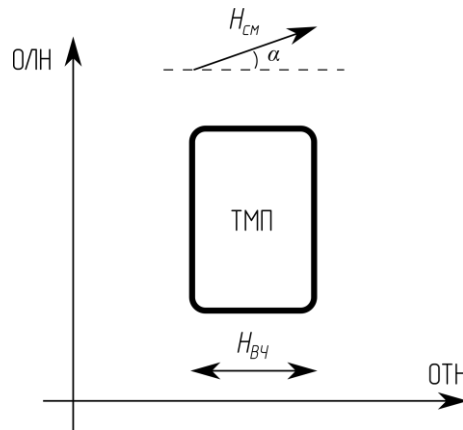


Рисунок М.1 – Направления полей в измерительной системе

Магнитные спектры – зависимости реальной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости  $\mu'$  и  $\mu''$  от частоты поля возбуждения  $H_{ВЧ}$ . Используемый метод определения магнитных спектров подразумевает размещение исследуемого образца в измерительной линии и измерение вносимого образцом комплексного сопротивления на различных частотах. Мнимая часть магнитной проницаемости  $\mu''$  оценивается по реальной части вносимого комплексного сопротивления, т. е. по вносимому активному сопротивлению. Реальная часть магнитной проницаемости  $\mu'$  оценивается по мнимой части вносимого комплексного сопротивления, т. е. по изменению реактивного (индуктивного) сопротивления. Z-параметры находят из S-параметров по формуле  $Z = Z_0 \cdot (1 + S_{11}) / (1 - S_{11})$ , где  $Z_0$  – опорное волновое сопротивление. На рисунке М.2 отображены результаты измерений и расчетов.



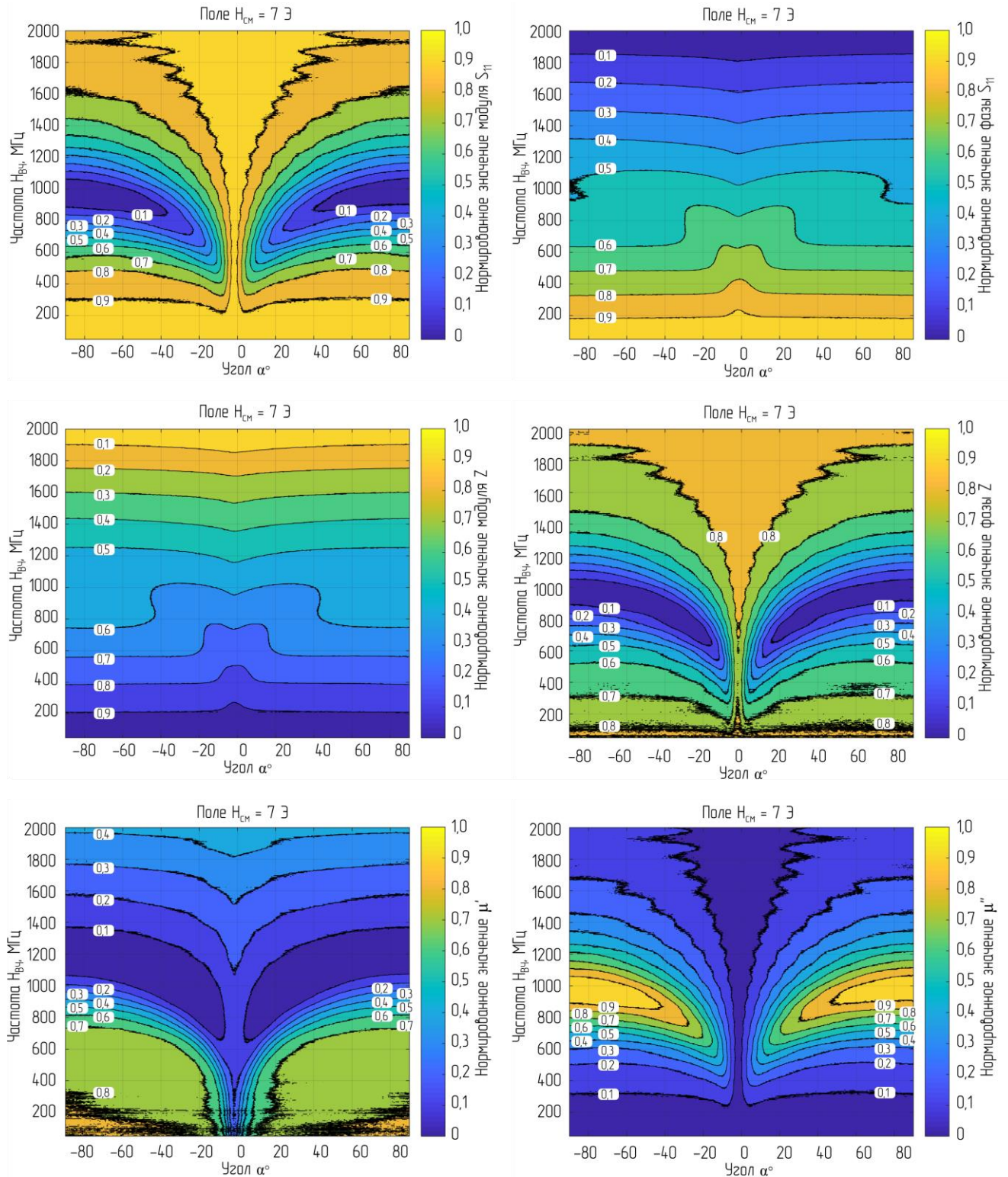


Рисунок М.2 – Измеренные векторным анализатором цепи зависимости модуля и фазы  $S_{11}$ , рассчитанные зависимости модуля и фазы  $Z_{11}$ , рассчитанные значения  $\mu'$  и  $\mu''$  от направления поля смещения  $H_{cm}$  и частоты поля возбуждения  $H_{вч}$  при фиксированном значении величины  $H_{cm} = 7 \text{ Э}$



На рисунке М.3 показаны зависимости  $\mu'$  и  $\mu''$  от угла  $\alpha$  при фиксированных частотах поля возбуждения  $H_{BЧ}$  и от частоты поля возбуждения  $H_{BЧ}$  при фиксированных значениях угла  $\alpha$ . На графиках отмечены области, в которых коэффициент преобразования чувствительного элемента датчика максимален.

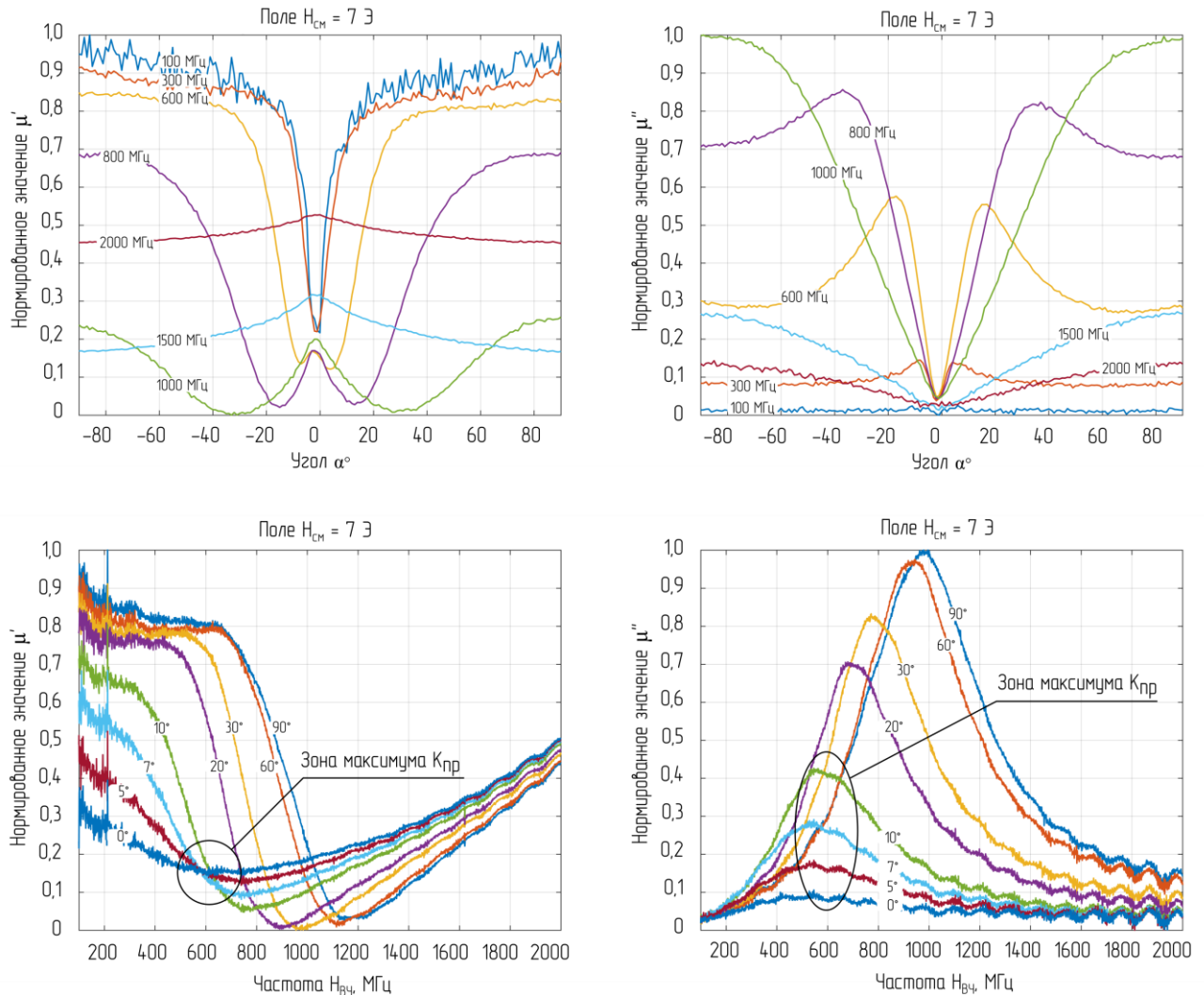


Рисунок М.3 – Зависимости  $\mu'$  и  $\mu''$  от угла  $\alpha$  при фиксированных частотах поля  $H_{BЧ}$  и от частоты поля возбуждения  $H_{BЧ}$  при фиксированных значениях угла  $\alpha$

**Заключение:** по результатам проведенных исследований коэффициента преобразования чувствительного элемента известно (см., например, приложение И), что максимум  $K_{гр}$  наблюдается при величине поля  $H_{CM}$  вблизи значения  $H_k$ , на частоте поля возбуждения  $H_{BЧ}$  около 600 МГц и при значениях угла  $\alpha$  около  $0^\circ$ , когда  $H_{BЧ}$  направлено под небольшим углом к ОН. В соответствии с этими условиями на рисунке М.3 отмечены зоны максимума  $K_{гр}$ , из которых следует, что в рабочей области  $\mu'$  изменяется незначительно, а скорость изменения  $\mu''$  от угла  $\alpha$  определяет значение  $K_{гр}$ .

## Приложение Н – Исследование влияния количества слоев и химического состава пленок на коэффициент преобразования чувствительного элемента

**Цель исследования:** изучение влияния числа слоев и химического состава ТМП на коэффициент преобразования чувствительного элемента датчика слабых магнитных полей.

**Задачи исследования:** с использованием автоматизированного измерительного комплекса изучить зависимость коэффициента преобразования чувствительного элемента от числа слоев ТМП и химического состава.

**Исследуемые образцы:** ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ , 1, 2, 3, 4, 5 слоев по  $1500 \text{ \AA}$ ,  $M_s = 1100 \text{ Гс}$ ; ТМП состава  $Ni_{75}Fe_{25}$ , 2 слоя по  $1500 \text{ \AA}$ .

**Метод измерений:** нерезонансный метод с использованием векторного анализатора цепей.

Направления полей в измерительной системе показаны на рисунке Н.1. На рисунке Н.2 отображены результаты измерений. Каждой точке на графиках соответствует некоторое оптимальное значение угла  $\alpha$ , при котором достигается максимальное значение  $K_{np}$ .

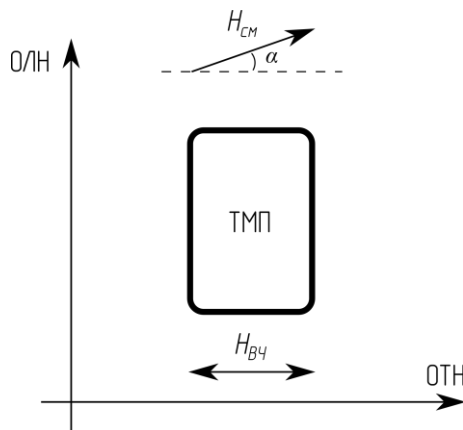


Рисунок Н.1 – Направления полей в измерительной системе

**Заключение:** максимум коэффициента преобразования наблюдается для чувствительного элемента с пятислойной ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ . Для четырехслойной ТМП этого же состава  $K_{np}$  составил 0,96 от максимального; для трехслойной – 0,9; двухслойной – 0,72 и однослойной – 0,7. Для двухслойной ТМП состава  $Ni_{75}Fe_{25}$  коэффициент преобразования составил 0,7 от максимального. Необходимо отметить, что рост коэффициента преобразования с увеличением числа слоев ТМП связан с увеличением объема рабочего вещества. Однако существенный рост  $K_{np}$  ограничен несовершенством технологии напыления ТМП, так как с увеличением числа слоев резко возрастают угловая и амплитудная дисперсии поля анизотропии (см. Глава 2, рисунок 2.15).

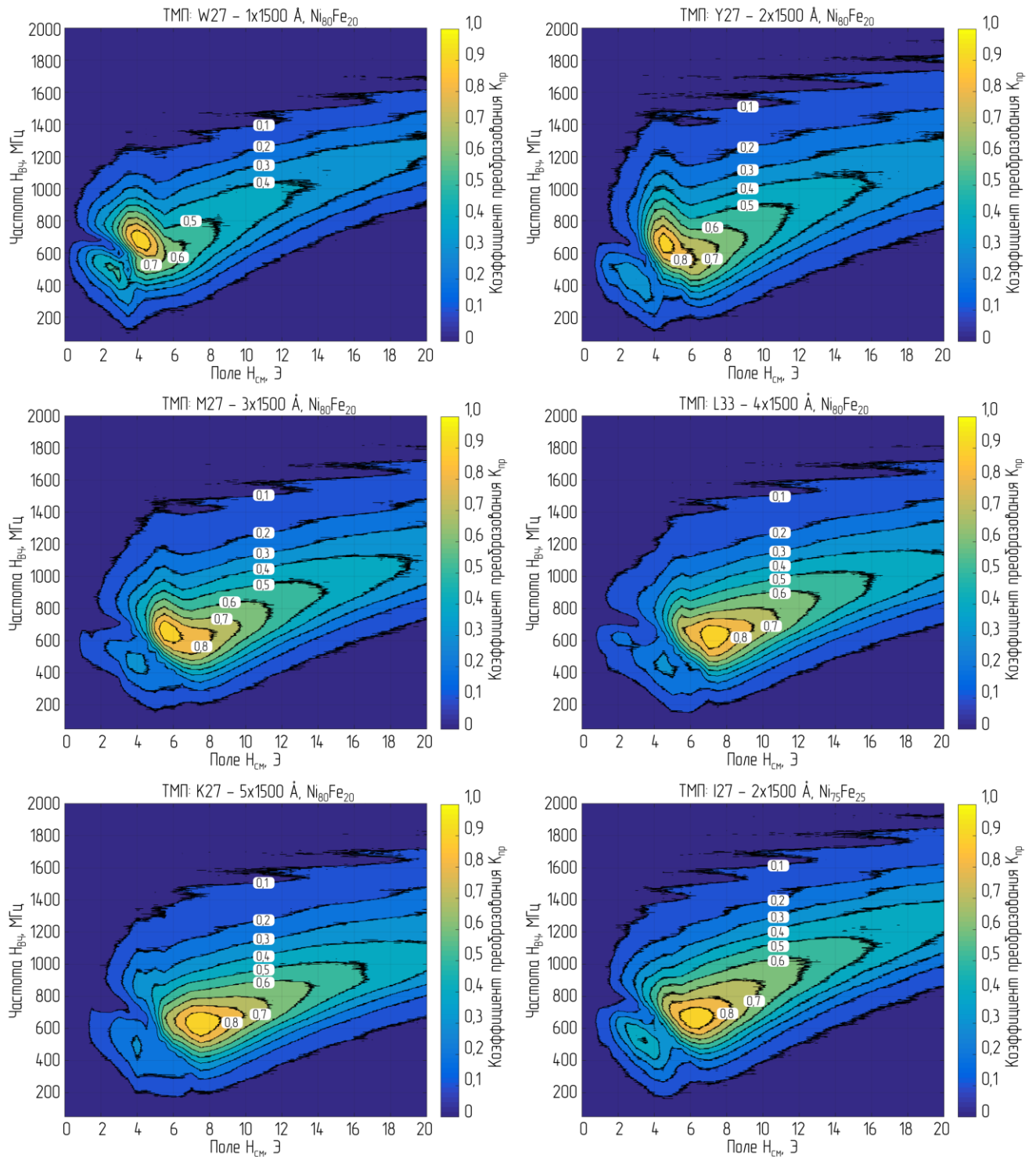


Рисунок Н.2 – Зависимости нормированного значения коэффициента преобразования  $K_{пр}$  от частоты поля возбуждения  $H_{вч}$  и значения величины поля  $H_{см}$  для различных ТМП: максимум наблюдается для чувствительного элемента с пятислойной ТМП состава  $Ni_{80}Fe_{20}$ ; для четырехслойной ТМП этого же состава  $K_{пр}$  составил 0,96 от максимального; для трехслойной – 0,9; двухслойной – 0,72 и однослойной – 0,7; для двухслойной ТМП состава  $Ni_{75}Fe_{25}$   $K_{пр}$  составил 0,7 от максимального