

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры
(КУДР)

К ЗАЩИТЕ ДОПУСТИТЬ
Заведующий каф. КУДР
канд. техн. наук, доцент
_____ А.Г. Лоцилов
« ____ » _____ 2020 г.

РАЗРАБОТКА ПРИЕМНОГО БЛОКА ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО ПРИЗНАКУ
СОБСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Бакалаврская работа (проект) по направлению 11.03.03 –
Конструирование и технологии электронных средств

Пояснительная записка

КУДР.411171.001 ПЗ

Студент гр. 236-2
_____ А. Б. Петров
« ____ » _____ 2020 г.

Руководитель
Доцент каф. КУДР,
канд. техн. наук
_____ А. А. Бомбизов
« ____ » _____ 2020 г.

Томск 2020

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 100 с., 61 рис., 13 табл., 35 источника.

БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ, СОБСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК, УСИЛИТЕЛЬ ПЕРВИЧНЫЙ, УСИЛИТЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ, СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ.

Цель выпускной квалификационной работы: разработка приемного блока для устройства обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения.

Выпускная работа выполнена с помощью САПР: Altium Designer 17, Компас-3Dv17 и SolidWorks 2018. Предварительная оценка спектра сигнала БПЛА выполнена в программе Izotope RX3. Пояснительная записка выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010.

ABSTRACT

Bachelor work 100 pp., 61 figures, 13 tables, 35 sources.

UNMANNED AERIAL VEHICLE, OWN ELECTROMAGNETIC RADIATION, INDUCTION SENSOR, PRIMARY AMPLIFIER, AMPLIFIER DIFFERENTIAL, SPECTRAL ANALYSIS.

The purpose of the graduate qualification work: development of the receiving unit for the UAV detection device on the basis of its own electromagnetic radiation.

The output work is done with the help of CAD: Altium Designer 17, Compass-3Dv17 and SolidWorks 2018. The preliminary estimation of a spectrum of a signal of the UAV is executed in program Izotope RX3. An explanatory note is made in Microsoft Word 2010 text editor.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры
(КУДР)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой КУДР

канд. техн. наук, доцент

_____ А.Г. Лоцилов

«____» _____ 2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на бакалаврскую работу (проект) Разработка приемного блока для устройства обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по признаку собственного электромагнитного излучения

Этап работы Эскизный проект

Исполнитель студент гр.236-2 Петров Алексей Борисович,

оканчивающий университет по специальности 11.03.03

Приказ ректора № 2684ст _____ от 19 июня 2020 г.

Дата сдачи законченного проекта (работы) на кафедру _____

Руководитель дипломного проекта (работы): нач. СКБ «Смена», доцент каф. КУДР, канд. техн. наук Бомбизов Александр Александрович

СОГЛАСОВАНО

Методист дипломного

Проектирования каф. КУДР

Доцент каф. КУДР, канд. техн. наук _____ А. А. Бомбизов

1 Наименование и область применения изделия

1.1 Разработка приемного блока для устройства обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по признаку собственного электромагнитного излучения;

1.2 Область применения – системы безопасности различных государственных и частных объектов.

2 Основание для разработки

2.1 Задание на дипломный проект. Приказ № 2684ст от 19 июня 2020 г., ТУСУР, каф. КУДР.

3 Цель и назначение разработки

3.1 Разработка конструкции приемного блока для устройства обнаружения БПЛА и выпуск комплекта конструкторской документации;

3.2 Разрабатываемое устройство предназначено для регистрации собственного электромагнитного излучения БПЛА характеризуемое или излучаемое двигателями.

4 Источники разработки

4.1 An experimental detection of eletromagnetic radiation generated by unmanned aerial vehicles / A. Bombizov, S. Artishchev, A. Loschilov, N. Malyutin // AIP Conference Proceedings 1899, 060021 (2017); URL <https://doi.org/10.1063/1.5009892>.

4.2 Бомбизов А.А. Исследование электромагнитного и акустического излучения беспилотных летательных аппаратов в области низких частот / А.А. Бомбизов, А.Б. Петров, А.Г. Лошилов // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники 2018, Том 21, No 1.– С. 57–61.

4.3 Петров А.Б. Разработка датчика первичной регистрации для задачи обнаружения беспилотного летательного аппарата / Петров А.Б., Захаров Р.А. // Материалы докладов VII Региональной научно-практической конференции «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до

внедрения», Томск, 15 октября – 30 ноября 2018 г. – Томск: Из-во ТУСУРа, 2018. – С. 391 – 395.

5 Технические требования

5.1 Основные составные части

5.1.1 Приемный блок для устройства обнаружения БПЛА должен быть выполнен в виде двух отдельных частей: а) индукционный датчик, который содержит катушку индуктивности и печатный узел предварительного усиления; б) дифференциальный усилитель с возможностью работать автономно. Индукционный датчик и дифференциальный усилитель должны соединяться при помощи кабеля, на расстоянии друг от друга до 5 м. Дифференциальный усилитель должен иметь выход для подключения самописца. Питание системы должна обеспечивать батарея типа «Кроны».

5.2 Показатели назначения

5.2.1 Диапазон рабочих частот приемного блока от 1 до 10 кГц;

5.2.2 Тип обнаружения – пассивная локация;

5.2.3 Максимальный потребляемый ток – не более 50 мА;

5.2.4 Напряжение питания – 9 В;

5.2.5 Общий коэффициент усиления приемного блока – не более 510.

5.2.6 Количество витков обмотки измерительной катушки – не менее 1000;

5.2.7 Ферритовый сердечник – магнитной проницаемостью не менее 2500;

5.2.8 Сопротивление по постоянному току – не более 400 Ом;

5.2.9 Намотка измерительной катушки должно осуществляться на специальном оборудовании (намоточный станок);

5.2.10 Обрывы проводов при намотке измерительной катушки не допускаются;

5.2.11 В измерительной катушке должны отсутствовать коротко замкнутые витки.

5.3 Условия эксплуатации и хранения

5.3.1 По стойкости, прочности и устойчивости к внешним воздействующим факторам приемный блок устройства должен соответствовать требованиям ГОСТ РВ.20.39.304 для исполнения аппаратуры по группе климатического исполнения УХЛ (умеренный и холодный климат) ГОСТ 15150-69;

5.3.2 Корпуса приемного блока должны быть выполнены по IP44 ГОСТ 14254-96;

5.3.3 Приемный блок должен соответствовать условиям эксплуатации переносной РЭС.

5.4 Требование к надежности

5.4.1 Средняя наработка на отказ приемного блока без учета износа кабеля должна быть не менее 3500 ч по ГОСТ 16019;

5.4.2 Срок службы не менее пяти лет.

5.5 Требование к технологичности:

5.5.1 Конструкция приемного блока должна обеспечивать применение прогрессивных технологических процессов, технологической оснастки в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта.

5.6 Требования к уровню унификации и стандартизации

5.6.1 В изделии должны быть максимально использованы стандартные или унифицированные конструктивные решения. Разработка и применение оригинальных деталей подлежит согласованию с заказчиком.

5.7 Требования безопасности

5.7.1 Конструкция изделия должна соответствовать общим требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.007.0-75.

5.8 Эстетические и эргономические требования

5.8.1 Устройство должно отвечать требованиям технической эстетики, качества оформления, отделки и работы;

5.8.2 Требования по эргономике должны соответствовать ГОСТ Р 56274-2014.

5.9 Требования к составным частям и материалам изделия

5.9.1 Конструкция не должна содержать материалы, сырье и компоненты, создающие опасность возникновения вредных химических реакций и являющиеся токсичными.

6 Экономические показатели

6.1 Предполагаемая потребность обуславливается тем фактором, что на данный момент не существует недорогих и малогабаритных систем обнаружения БПЛА по признаку электромагнитного излучения;

6.2 Экономических преимуществ разработки по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами на рынке не было выявлено, так как не существует прямых аналогов разрабатываемого устройства.

7 Требования к использованию автоматизации инженерного труда

7.1 Оформление пояснительной записки должно быть выполнено в текстовом редакторе Microsoft Word 2010;

7.2 Разработка печатных узлов и оформление конструкторской документации должно быть выполнено с использованием САПР Altium Designer 2017;

7.3 Разработка корпусов приемного блока и оформление документации должно быть выполнено с использованием САПР SolidWorks 2018 и Компас-3Dv17;

7.4 Анализ и разработка электрической принципиальной схемы должны быть выполнены в программе LTspice;

7.5 Построение математической модели индукционного датчика и обработка спектров сигнала БПЛА должно быть выполнено в программе Mathcad 2014;

7.6 Предварительная оценка спектра сигнала БПЛА должна быть выполнена в программе Izotope RX3.

8 Стадии и этапы разработки

8.1 Эскизный проект.

9 Материалы, предоставляемые по окончании работы

9.1 Пояснительная записка

9.2 Проектная документация:

- 1) Ведомость эскизного проекта;
- 2) Структурная схема устройства;
- 3) Схема электрическая принципиальная усилителя первичного;
- 4) Схема электрическая принципиальная усилителя дифференциального;
- 5) Перечень элементов усилителя первичного;
- 6) Перечень элементов усилителя дифференциального;
- 7) Сборочный чертеж усилителя первичного;
- 8) Сборочный чертеж усилителя дифференциального;
- 9) Чертеж ПП усилителя первичного;
- 10) Чертеж ПП усилителя дифференциального;
- 11) Спецификация усилителя первичного;
- 12) Спецификация усилителя дифференциального;
- 13) Схема сборочного состава усилителя первичного;
- 14) Схема сборочного состава усилителя дифференциального;
- 15) Технологическая схема сборки усилителя первичного;
- 16) Технологическая схема сборки усилителя дифференциального;
- 17) Сборочный чертеж корпуса блока усиления и фильтрации;
- 18) Сборочный чертеж индукционного датчика.

9.3 Требования к предъявляемым материалам

9.3.1 Все предъявляемые материалы должны соответствовать требованиям действующих стандартов, методических указаний по дипломному проектированию и образовательным стандартам ТУСУР 2013

9.4 Макеты

9.4.1 Предоставляется макет приемного блока для устройства обнаружения БПЛА.

Заказывающее подразделение

СКБ «Смена»

Начальник СКБ «Смена»

_____ А.А. Бомбизов

«_____» _____ 2020 г.

Руководитель дипломного проекта

Доцент каф. КУДР,

канд. техн. наук

_____ А.А. Бомбизов

«_____» _____ 2020 г.

Исполнитель (дипломник)

Студент гр. 236-2

_____ А.Б. Петров

«_____» _____ 2020 г.

Оглавление

1 Введение.....	14
2 Литературно-патентный обзор.....	16
2.1 Обзор современных методов и систем обнаружения БПЛА	16
2.2 Обзор датчиков магнитного поля и средств их измерения.....	22
2.3 Патентный поиск устройств обнаружения БПЛА	31
3 Описание экспериментальной установки и макетирование приемного блока	43
3.1 Индукционные датчики и инструментальный усилитель	43
3.2 Электродвигатель БПЛА	43
3.3 Разработка структурных и принципиальных схем	44
3.4 Построение математических моделей индукционного датчика и кольца Гельмгольца	54
4 Конструкторская часть.....	62
4.1 Проектирование печатных плат.....	62
4.2 Проектирование конструкции изделия	66
4.3 Расчеты надежности	71
5 Технологическая часть.....	74
5.1 Выбор и обоснование технологии изготовления печатных плат	74
6 Технико-экономическое обоснование разработки	77
7 Сборка и тестирование приемного блока	79
7.1 Сборка и тестирование индукционного датчика	79
7.2 Сборка и тестирование дифференциального усилителя.....	88
7.3 Намотка укороченного цилиндрического чувствительного элемента	91
7.4 Сравнительный анализ чувствительных элементов индукционного датчика.....	92
8 Заключение.....	95
Списки используемых источников	96

Конструкторская документация на отдельных листах:

КУДР.411171.001 ЭП Приемный блок для устройства обнаружения
БПЛА. Ведомость эскизного проекта

КУДР.411169.001 Э1 Приемный блок для устройства обнаружения
БПЛА. Схема электрическая структурная

КУДР.745313.001 Индукционный датчик. Спецификация

КУДР.745313.001 СБ Индукционный датчик. Сборочный чертеж

КУДР.411525.001 Усилитель первичный. Спецификация

КУДР.411525.001 СБ Усилитель первичный. Сборочный чертеж

КУДР.411525.001 Д1 Усилитель первичный. Схема сборочного состава

КУДР.411525.001 Д2 Усилитель первичный. Технологическая схема
сборки

КУДР.411525.001 Э3 Усилитель первичный. Схема электрическая
принципиальная

КУДР.411525.001 ПЭ3 Усилитель первичный. Перечень элементов

КУДР.758741.001 Усилитель первичный. Плата печатная

КУДР.745313.002 Основание усилителя первичного

КУДР.745313.003 Корпус ступенчатого чувствительного элемента

КУДР.745313.004 Кожух

КУДР.745352.001 Корпус усилителя дифференциального.
Спецификация

КУДР.745352.001 СБ Корпус усилителя дифференциального.
Сборочный чертеж

КУДР.411539.001 Усилитель дифференциальный. Спецификация

КУДР.411539.001 СБ Усилитель дифференциальный. Сборочный
чертеж

КУДР.411539.001 Д1 Усилитель дифференциальный. Схема
сборочного состава

КУДР.411539.001 Д2 Усилитель дифференциальный. Технологическая
схема сборки

КУДР.411539.001 ЭЗ Усилитель дифференциальный. Схема электрическая принципиальная

КУДР.411539.001 ПЭЗ Усилитель дифференциальный. Перечень элементов

КУДР.758741.002 Усилитель дифференциальный. Плата печатная

КУДР.745352.002 Крышка усилителя дифференциального

КУДР.745352.003 Основание усилителя дифференциального

Компакт диск с материалами работы на обороте обложки.

1 Введение

На сегодняшний день рынок беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) существенно возрастает с каждым днем. Малогабаритные беспилотные аппараты используются для: аэрофотосъемки, исследования местности, геодезических изысканий, мониторинга объектов и т.д. В военных же целях БПЛА используются: для разведки, ведения радиоэлектронной борьбы, служат ретранслятором радиосигналов, выполняют роль целеуказателя для наведения артиллерийских снарядов, могут быть начинены взрывающимся веществом. В руках злоумышленников БПЛА представляет весьма серьезную проблему для жизни людей и стратегически важных объектов. Угроза представляется в несанкционированном разведывательном доступе к определенным объектам, в диверсионных целях, транспортировке запрещенных предметов. Одним из примеров использований БПЛА в террористических целях, можно привести обстрел авиабазы Хмеймим в Сирии.

Большинство беспилотных летательных аппаратов, используемых в гражданской сфере деятельности, осуществляют работу с помощью электродвигателей. Электродвигатель посредством своей работы выделяет электромагнитное излучение, обнаружить которое целесообразней индукционным датчиком. Первое исследование по возможности обнаружения БПЛА по признакам электромагнитного излучения описано в работе [1]. В статье [2] исследовался подход обнаружения БПЛА по признакам их собственного электромагнитного излучения, определена связь параметров и режимов работы двигателей БПЛА и зарегистрированными спектральными составляющими. В [2] был использован чувствительный элемент с цилиндрическим каркасом. В [3] был смоделирован входной аналоговый тракт и конструкция индукционного датчика. В работе [4] проведена оценка чувствительности индукционного датчика со ступенчатой формой чувствительного элемента. В статье [5] проведено сравнение трех конструкций чувствительных элементов индукционного датчика.

Актуальность темы исследования: прогресс микроэлектроники позволил создать малогабаритные беспилотные летательные аппараты работающие на электродвигателях. БПЛА может использоваться в разных сферах деятельности человека, от простой съемки местности до доставки запрещенных веществ или шпионажа и т.д. Современные методы обнаружения делятся на три группы: оптические, радиолокационные, акустические. На рынке нет полезных моделей и устройств, которые могли бы регистрировать БПЛА по его собственному электромагнитному излучению.

Практическая значимость результатов состоит в том, что разработанный приемный блок может быть использован для совершенствования существующих систем и методов обнаружения БПЛА.

Цель выпускной квалификационной работы: разработка приемного блока для устройства обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения.

2 Литературно-патентный обзор

В данной главе представлены современные методы и системы обнаружения БПЛА, а так же дан обзор датчиков магнитного поля. Описывается патентный поиск устройств обнаружения беспилотников.

2.1 Обзор современных методов и систем обнаружения БПЛА

Свое развитие БПЛА получили из-за специфических аэродинамических и технических характеристик, а также отсутствия для них необходимости в управлении человеком и наличие высокотехнологического оборудования, способного решать широкий диапазон универсальных военно-прикладных задач. Широкое распространение БПЛА среди гражданского населения привело к проблеме государственного регулирования их применения, усовершенствованию систем охраны объектов повышенной опасности, таких как атомные электростанции (АЭС), гидроэлектростанции (ГЭС), аэропорты, военные объекты и др. В связи с этим на сегодняшний день большое количество научных работ [6–8] посвящаются проблемам борьбы с БПЛА.

В настоящее время достаточно высокая эффективность обнаружения и борьбы с низколетящими воздушными целями с применением современных зенитных ракетных комплексов (ЗРК), зенитных артиллерийских комплексов (ЗАК), переносных зенитных ракетных комплексов (ПЗРК) и зенитных ракетно-пушечных комплексов (ЗРПК) достигается при своевременном обнаружении и обстреле БПЛА средних и больших размеров. Однако наибольшие трудности проявляются при организации и ведении борьбы зенитных средств с современными малогабаритными беспилотными летательными аппаратами (МБПЛА), чему и посвящена данная работа.

Все существующие системы, способные обнаружить МБПЛА, можно разделить на два класса: системы противодействия военному нападению и системы гражданского применения для служб охраны и контроля воздушного движения МБПЛА. К системам противодействия военному нападению относятся современные системы противовоздушной обороны (ПВО), малогабаритные мобильные радиолокационные станции (РЛС) обнаружения

низколетящих целей, различные РЛС для ведения разведки местности и артиллерийских позиций противника.

В таблице 2.1 приведены комплексы, специализирующиеся на обнаружении и противодействия МБПЛА. Данные типы комплексов могут использоваться для военного и гражданского применения. Большинство комплексов используют комбинированные системы обнаружения МБПЛА. Например, в состав комплекса «Dedron» входят видеочамера, акустические датчики, инфракрасный (ИК) – датчик, сканер радиочастот Wi-Fi диапазона, дополнительно комплекс может оснащаться радиолокатором и тепловизором. Применение для обнаружения МБПЛА датчиков, работающих на различных взаимно дополняющих друг друга принципах, увеличивает вероятность правильного обнаружения для различных сценариев окружающей обстановки и полета МБПЛА. В связи с этим, большое количество работ посвящены тому или другому принципу обнаружения МБПЛА. В таблице 2.1: «+» – это наличие в составе системы данного оборудования, «-» – это отсутствие в составе системы данного оборудования.

Таблица 2.1 – Специализированные комплексы для обнаружения МБПЛА

Название системы	Дальность действия, км	Видео-камера	Тепло-визор	Пелен-гатор	Рабочая частота, ГГц
Dedrone (США)	0,5	+	+	+	2,4–5,8
ИНТАР (Турция)	5	+	+	-	10–13
АНТИДРОН (Россия)	0,5 – 1,0	-	-	+	
ЕНОТ (Россия)	1,8	+	-	-	
Радескан (Россия)	1,5	+	+	+	

Продолжение таблицы 2.1

Название системы	Дальность действия, км	Видео-камера	Тепловизор	Пеленгатор	Рабочая частота, ГГц
Аарониа (Германия)	7	-	-	-	0,68–6,00
AUDS (Великобритания)	10	+	+	-	10–13
Стопдрон – горнизон (Россия)	10	+	+	-	10–13,17
Снегирь (Россия)	1,5	-	-	+	
Сапсан – Бекас (Россия)	10	+	+	+	
Red Sky 2 (Израиль)	5	+	+	-	8–12
Ardronis (Германия)		+	-	+	
MHR (Израиль)	10	-	-	-	
Соловей-2 (Россия)	1,5	-	-	+	

Современные акустические системы обнаружения используют частоты до 100 кГц. Как показано в исследованиях [9–11], для увеличения дальности обнаружения акустическим методом и для эффективного выделения полезного сигнала над фоновым шумом требуется знать точную сигнатуру шума МБПЛА или его подвижных частей. Для всей совокупности летательных аппаратов выявить сигнатуры невозможно, а любые

приближения ухудшают параметры дальности обнаружения акустических систем. При большем количестве исследований в области акустических систем обнаружения БПЛА достичь желаемых дальностей обнаружения с требуемыми вероятностями правильного обнаружения весьма проблематично, что обусловлено как высокой мощностью естественных помех окружающей среды, так и усилиями разработчиков по созданию малошумящих МБПЛА, а также внедрением методов подавления их акустического шума [12, 13]. Поэтому акустические системы обнаружения применяются только совместно с другими сенсорами и их применимость ограничена дальностью обнаружения и зоной ответственности таких систем. Наилучшие результаты обнаружения акустическим методом применяются в комплексе «Dedrone», в котором используется высоконаправленный акустический датчик с дальностью обнаружения МБПЛА до 1 км.

Совершенно по-другому обстоит дело с системами на электромагнитных принципах обнаружения МБПЛА. Электромагнитные волны различных частотных диапазонов обладают отличительными друг от друга обнаруживающими свойствами, на основе которых разработаны различные методы, применяемые в большом количестве многочисленных электронных системах обнаружения МБПЛА.

К электромагнитным демаскирующим признакам относятся:

1. Сигналы бортового ответчика;
2. Сигналы радиолокационных станций, отраженные от корпуса и агрегатов МБЛА;
3. Сигналы телевизионных ретрансляторов, широкоэмиттерных станций, базовых станций сотовой связи, отраженные от МБЛА;
4. Команды и «доклады» канала управления между наземным пунктом управления и МБЛА, а также между МБЛА и спутником-ретранслятором системы навигации;
5. Сигналы бортовой РЛС бокового обзора;
6. Каналы обмена разведывательной информацией;

7. Сигналы системы автоматической посадки на аэродром;
8. Электромагнитное излучение электродвигателей МБПЛА.

Для обнаружения МБПЛА используют следующие частотные диапазоны электромагнитных волн [14]:

- оптический диапазон электромагнитных (ЭМ) волн (видеокамеры);
- ИК-диапазон ЭМ волн (тепловизоры);
- радиодиапазон ЭМ волн (радиолокационные системы, системы радиомониторинга).

В оптическом диапазоне существуют активные и пассивные методы. К активным методам относятся метод анаглифов и метод определения координат в пространстве. К пассивным методам относятся методы визуального наблюдения и комбинированного стереоэффекта [15]. Основные недостатки пассивных оптических методов – это ограниченная видимость и неработоспособность в темное время суток. Пассивным методам эффективно противодействует электронное цветное камуфлирование летательных аппаратов [16, 17].

Методы теплового обнаружения ИК-диапазона работают и в светлое, и в темное время суток, и в условиях ограниченной видимости, но из-за большого разнообразия ИК-сигнатур существующих МБПЛА, обнаружение ИК-системами имеет невысокие характеристики, кроме того, такие устройства реагируют, формируя ложные тревоги, на различные выбросы высокотемпературных газов и шлейфов [18]. Поэтому на практике термовизуальные (ИК) методы обнаружения объединяют с методами «видимого» оптического обнаружения. К системам указанного типа относится наиболее продвинутый отечественный ЗРК «Сосна», использующий телевизионный и тепловизионный каналы совместно с радиопеленгационной системой.

В оптическом и ИК методах широко распространены методы постобработки [19, 20], например, используют нейросетевые алгоритмы.

Системы радиочастотного диапазона электромагнитных волн устойчивы к условиям ограниченной видимости, ослабления радионаблюдаемости за счет ослабления в гидрометеорах, и работают в темное время суток. В радиодиапазоне МБПЛА формируют существенно больше демаскирующих электромагнитных излучений относительно оптического и ИК-диапазонов длин волн. К ним относятся сигналы, излучаемые внутренними системами МБПЛА, служащими обеспечению полета и поддерживающими функционированием "полезной нагрузки" МБПЛА, а также сигналы, излучаемые всевозможными внешними радиосистемами (телевизионные ретрансляторы, базовые станции сотовой связи, системы связи канала управления МБПЛА, радиолокационные системы) и переотраженные корпусом МБПЛА, [21, 22]. Такое разнообразие электромагнитного излучения радиодиапазона и свойства его распространения в тропосфере приводят к тому, что большинство алгоритмов в системах обнаружения МБПЛА работают по принципу – основной сенсор работает в радиодиапазоне, а все остальные выполняют вспомогательную функцию, например, уточняют координаты цели, или дублируют обнаружение, увеличивая вероятность правильного обнаружения в наиболее ответственных зонах.

2.2 Обзор датчиков магнитного поля и средств их измерения

Магнитные поля обычно подразделяют на сверхсильные (свыше 100 Тл), сильные (от 4 до 100 Тл), средние (от 0,05 до 4 Тл), и слабые (менее 0,05 Тл) [23].

В зависимости от области применения и величины измеряемого магнитного поля возникает проблема выбора того или иного первичного измерительного преобразователя магнитного поля (датчика магнитного поля). В таких сферах как микромагнитное сканирование или неразрушающий контроль, единственным критерием выбора зачастую является размер датчика. При поиске и обнаружении магнитных аномалий на больших расстояниях более важным параметром являются шум и разрешающая способность [24]. При решении задач навигации, ориентации и стабилизации на первый план выходят линейность, температурные коэффициенты и чувствительность к поперечному полю. При измерении магнитного поля квантового чипа особое значение приобретает тепловыделение и работоспособность датчика при сверхнизких температурах.

На рисунке 2.1 представлена шкала квазистационарных магнитных полей в окружающей среде.

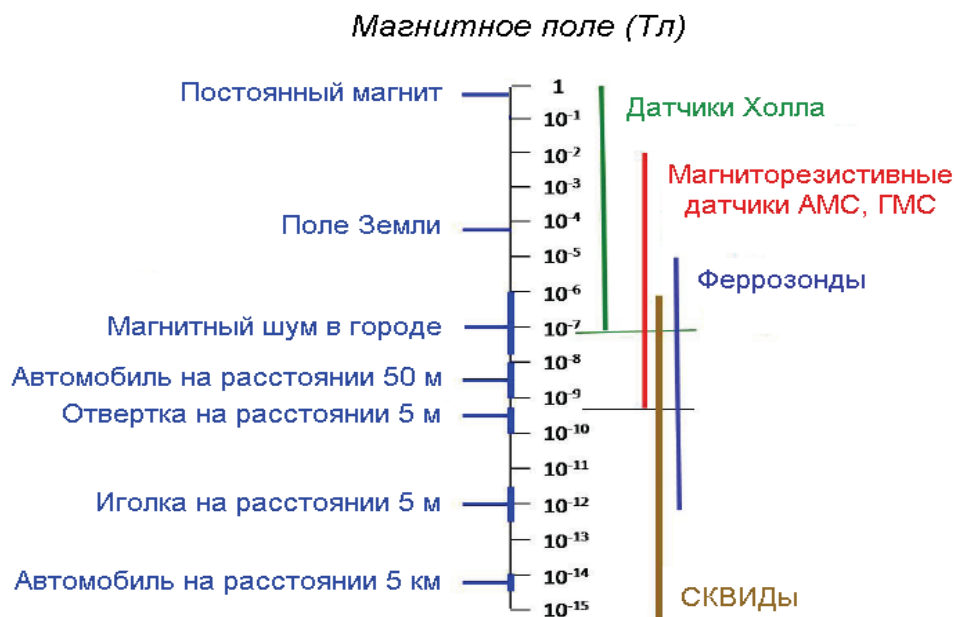


Рисунок 2.1 – шкала квазистационарных магнитных полей в окружающей среде

Известно, что магнитное поле малозаметного беспилотного летательного аппарата (МБПЛА) является слабым и составляет около 0,05 Тл, то для его регистрации могут применяться: измерительные катушки, преобразователи Барнетта, вибронзонды, преобразователи ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) и сквиды.

Для исследования параметров магнитного поля низкой частоты применяются датчики детектирования и измерения магнитного поля. На сегодняшний день существуют следующие основные виды датчиков регистрации магнитных полей: использующие эффект Виганда; магниторезистивные; индукционные; работающие на эффекте Холла. Обзор которых будет рассмотрен ниже.

Преобразователи Барнетта и вибронзонды имеют в своем составе электромеханический привод, вращающиеся и колеблющиеся части соответственно, что увеличивает их размеры и усложняет конструкцию, поэтому в настоящее время они практически не применяются.

На рисунке 2.2 представлены типы датчиков магнитного поля.

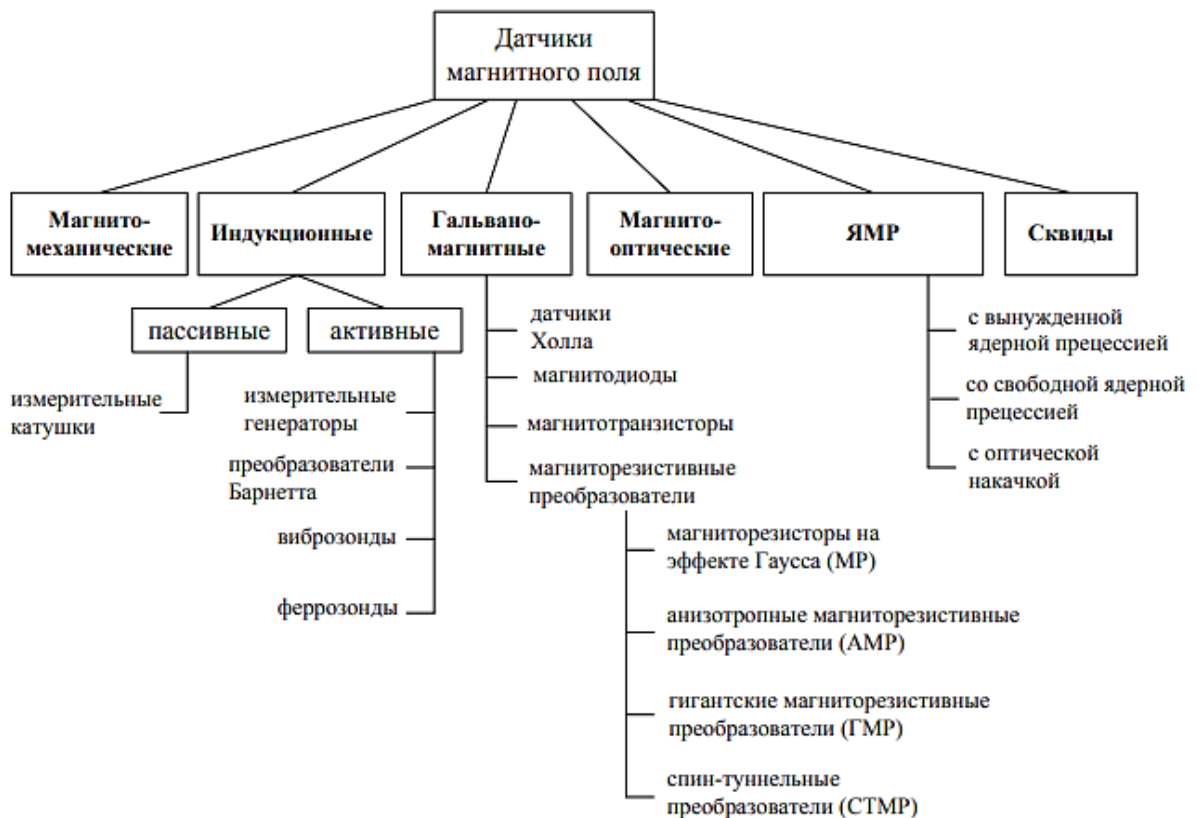


Рисунок 2.2 – Виды датчиков магнитного поля

Основные характеристики датчиков магнитного поля [25]: диапазон измерений; линейность; гистерезис; погрешность преобразования магнитной индукции (в том числе зависимость от температуры); смещение; долговременная стабильность; шум; диаграмма направленности; чувствительность к поперечному полю; частотный диапазон измерений; геометрические размеры датчика; потребляемая мощность; тепловыделение; диапазон рабочих температур.

На рисунке 2.3 представлена таблица диапазонов измерения датчиков магнитного поля.

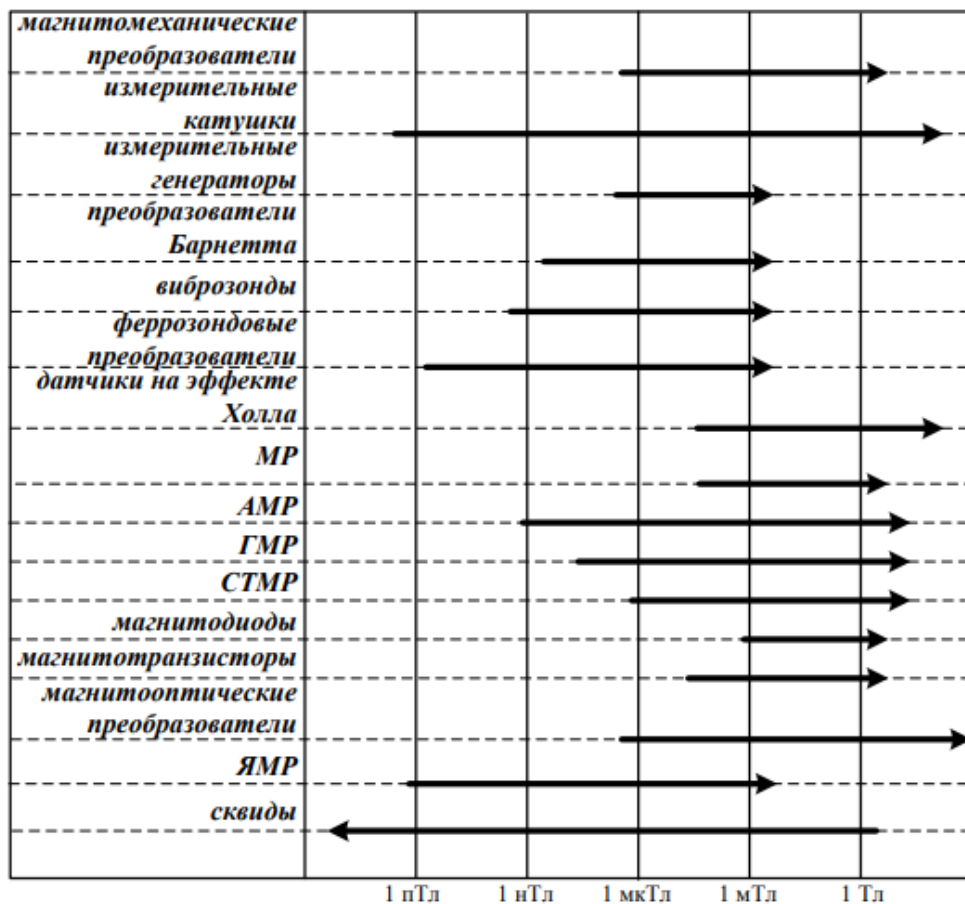


Рисунок 2.3 – Диапазоны измерений датчиков магнитного поля

2.2.1 Датчик Виганда

Суть эффекта Виганда проявляется в следующем. При внесении ферромагнитной проволоки в магнитное поле, в ней происходит изменение магнитной поляризации. Это явление наблюдается при выполнении двух условий: первое – проволока должна иметь специальный химический состав

(52% кобальта, 10% ванадия – викаллой) и двухслойную структуру; второе – напряженность магнитного поля должна быть выше определенного порогового значения – порога зажигания [26].

На рисунке 2.4 представлена двухслойная структура проволоки.

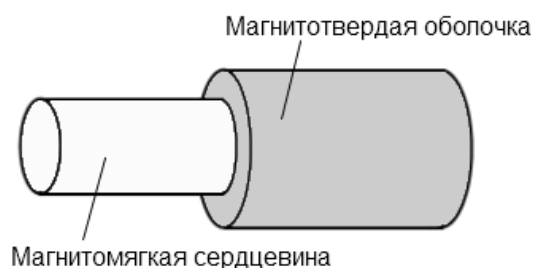


Рисунок 2.4 – Двухслойная структура проволоки

Момент изменения поляризации проволоки можно наблюдать с помощью катушки индуктивности, расположенной рядом с проволокой. Индукционный импульс напряжения на ее выводах при этом достигает нескольких вольт. При изменении направления магнитного поля полярность индуктируемых импульсов изменяется.

Конструкция датчиков Виганда содержит катушку индуктивности и проволоку Виганда. При смене поляризации проволоки, катушка, намотанная на неё, фиксирует это изменение.

Чувствительные элементы Виганда применяются в расходомерах, датчиках скорости, угла поворота и положения. Кроме того, одно из наиболее частых применений этого элемента – системы считывания идентификационных карт. При прикладывании намагниченной карты меняется напряженность поля, на что реагирует датчик.

К достоинствам датчика Виганда следует отнести независимость от влияния внешних электрических и магнитных полей, широкий температурный диапазон работы (от минус 80° до +260°С), работу без источника питания.

На рисунке 2.5 представлена конструкция датчика Виганда.

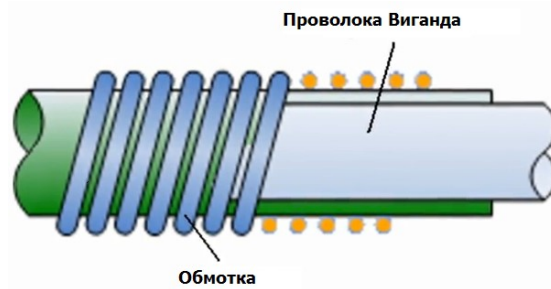


Рисунок 2.5 – Конструкция датчика Виганда

Вывод: данный датчик не может быть применим для задачи обнаружения БПЛА, так как изготовить датчик в лабораторных условиях достаточно трудно из-за недоступности проволоки, покупные датчики ориентированы на работу для датчиков скорости, датчиков угла поворота, применяются в системах идентификации карт. Датчик Виганда реагирует на магнитные поля и вырабатывает сигналы в несколько Вольт при условии, что напряженность управляющего магнитного поля превышает величину напряженности поля зажигания и датчик не требует источника питания, его выходной сигнал практически не зависит от частоты изменения поля.

2.2.2 Магниторезистивный датчик

Датчики данного типа в качестве чувствительного элемента содержат магниторезистор. Принцип работы заключается в эффекте изменения омического сопротивления материала в зоне действия магнитного поля. Наиболее сильно этот эффект проявляется в полупроводниковых материалах. При нахождении полупроводникового элемента с протекающим током в магнитном поле, на электроны действуют силы Лоренца. Эти силы вызывают отклонение движения носителей заряда от прямолинейного, искривляют его и, следовательно, удлиняют его. А удлинение пути между выводами полупроводникового элемента равносильно изменению его сопротивления.

В магнитном поле изменение длины «пути следования» электронов обусловлено взаимным положением векторов намагниченности этого поля и поля протекающего тока. При изменении угла между векторами поля и тока пропорционально изменяется и сопротивление.

Таким образом, зная величину сопротивления датчика можно судить о количественной характеристике магнитного поля.

Датчики этого типа, благодаря высокой чувствительности, могут измерять незначительные изменения состояния магнитного поля и его направление. Они применяются в системах навигации, магнитометрии, распознавания образов и определения положения объектов.

На рисунке 2.6 представлен магниторезистивный датчик в разрезе.

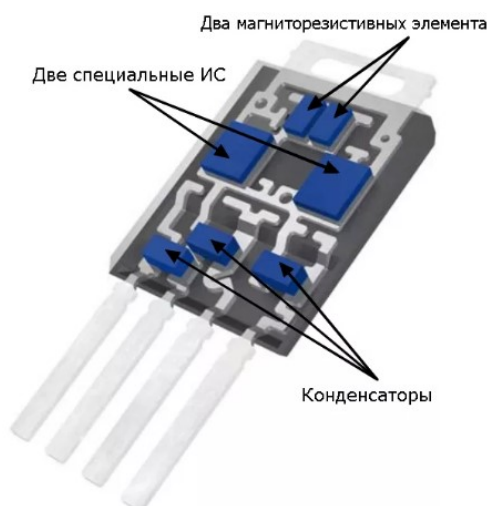


Рисунок 2.6 – Магниторезистивный датчик

Вывод: данный тип датчика работает на магниторезистивном эффекте, который изменяет активное сопротивление резистора при внесении его в магнитное поле или при изменении напряженности поля, используются в качестве датчиков угла поворота или перемещения. Данный датчик не может быть применим для задачи обнаружения БПЛА.

2.2.3 Индукционный датчик

Датчики этого типа относятся к генераторному типу датчиков. Они могут использоваться для определения параметров переменных и стационарных магнитных полей. В данном обзоре рассмотрен принцип работы датчика, работающего в постоянном магнитном поле.

Принцип работы индукционных датчиков базируется на способности переменного магнитного поля индуцировать в проводнике электрический ток. При этом ЭДС индукции, появляющаяся в проводнике, пропорциональна скорости изменения магнитного потока через него.

Но в стационарном поле магнитный поток не изменяется. Поэтому для измерения параметров стационарного магнитного поля применяются датчики с катушкой индуктивности, вращающейся с постоянной скоростью. В этом случае магнитный поток будет изменяться с определенной периодичностью. Напряжение на зажимах катушки будет определяться скоростью изменения потока (числом оборотов катушки) и количеством витков катушки [26].

Вывод: с помощью индукционного датчика можно измерять свойства магнитных материалов, магнитных полей. Датчик обладает большой чувствительностью, его конструкция проста и надежна, такой датчик подходит для задачи обнаружения БПЛА.

2.2.4 Датчик магнитного поля на эффекте Холла

Датчики магнитного поля на эффекте Холла используют явление взаимодействия перемещающихся электрических зарядов с магнитным полем.

На рисунке 2.7 продемонстрирована работа эффекта Холла.

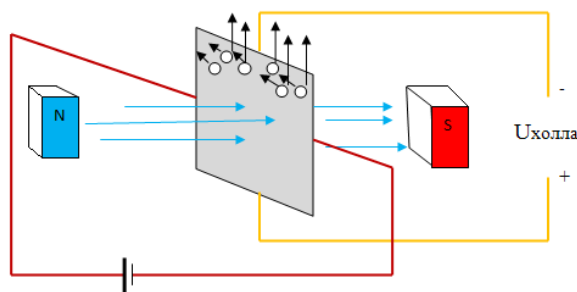


Рисунок 2.7 – Эффект Холла

Через полупроводниковую пластину протекает ток от внешнего источника. Пластина находится в магнитном поле, пронизывающем ее в направлении перпендикулярном движению тока. В магнитном поле под действием силы Лоренца электроны отклоняются от прямолинейного движения. Эта сила сдвигает их в направлении перпендикулярном направлению магнитного поля и направлению тока. В данном случае у верхнего края пластины электронов будет больше, чем у нижнего, т.е. возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов и обуславливает появление выходного напряжения – напряжения Холла. Напряжение Холла

пропорционально току и индукции магнитного поля. При постоянном значении тока через пластину оно определяется только значением индукции магнитного поля.

Чувствительные элементы для датчиков изготавливаются из тонких полупроводниковых пластинок или пленок. Эти элементы наклеиваются или напыляются на подложки и снабжаются выводами для внешних подключений.

Датчики магнитного поля с такими чувствительными элементами отличаются высокой чувствительностью и линейным выходным сигналом. Они широко применяются в системах автоматики, в бытовой технике и системах оптимизации работы различных агрегатов [26].

Вывод: применяется в датчиках приближения, скорости, положения, устанавливается на объект исследования, данный тип датчика не может обнаружить фоновое электромагнитное излучение БПЛА.

Проведенный обзор современных датчиков для измерения слабых магнитных полей показал, что для решения задач регистрации ЭМИ от электродвигателей МБПЛА целесообразней применять индукционные датчики (измерительные катушки), так как можно менять форму катушки, что соответственно влияет на чувствительность и на диаграмму направленности, так же они малогабаритны и просты в изготовлении.

Что касается ЯМР датчиков, то они нечувствительны к направлению поля и имеют большие габариты. Сквиды требуют дорогостоящего специального вспомогательного оборудования, экранирования и имеют высокую стоимость. АМР датчики и феррозондовые преобразователи применяются для магнитометрии высокого разрешения в составе систем навигации, ориентации и стабилизации, в комплексах для поиска и отслеживания магнитных аномалий.

В таблице 2.2 представлены типы сенсоров слабых квазистационарных магнитных полей.

Таблица 2.2 – Типы сенсоров слабых квазистационарных магнитных полей

Sensor type	Эффект Холла	АМС, ГМС	Феррозоны	Сквидаы
Поток/ поле	Поле	Поле	Поток	Поток
Максимальная Чувстви- тельность	1000 нТл	0,5 нТл	100 пТл	5 фТл
Диапазон частот	30 кГц	100 МГц	10 кГц	10 МГц
Преиму- щества	Дешевизна, линейность характеристик, динамический диапазон измерений ≤ 70 дБ	Доступная цена, чувствите- льность, динами- ческий диапазон измерений ≤ 100 дБ	Высокая чувстви- тельность, динами- ческий диапазон измерений ≤ 70 дБ	Очень высокая чувствите- льность, широкий диапазон частот, динами- ческий диапазон измерений ≥ 120 дБ
Недостатки	Невысокая чувстви- тельность	Низкий динами- ческий диапазон, $1/f$ шум	Большие габариты	Низкая рабочая температу- ра (4 К); хрупкость; высокая цена

Как видно из таблицы 2.2, феррозонды и сквиды по чувствительности имеют схожесть с индукционным датчиком (измерительной катушкой), но их минусы это габариты, хрупкость, высокая цена, невозможность изготовить ручным способом в лабораторных условиях, а так же невозможно менять чувствительность и диаграмму направленности в исследовательских целях. Следовательно, можно сделать вывод, что для данной задачи выпускной квалификационной работы, целесообразней использовать индукционный датчик.

2.3 Патентный поиск устройств обнаружения БПЛА

Патентный поиск проводился с целью определения технического уровня и патентоспособности результатов научно-исследовательской работы по теме «Устройство для обнаружения беспилотного летательного аппарата по признаку электромагнитного излучения в области низких частот», выполняемой в рамках проектной выпускной квалификационной работы (ВКР).

Целью настоящего исследования является формирование базы российских и зарубежных патентов для оценки существующих тенденций в области устройств для обнаружения беспилотного летательного аппарата.

Патентный поиск проводился в соответствии с ГОСТ Р. 15.011-96 «Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования». Проверка патентоспособности проводимой научно-исследовательской работы осуществлялась на основе поиска патентных и других открытых документов, описывающих решения, максимально полно удовлетворяющие задаче исследования. Поиск патентной информации проводился в патентных базах данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации (Роспатент, www.fips.ru), Европейской базе и базе соединенных штатов Америки.

Патентный поиск проводился с сентября 2019 года по июнь 2020 года.

2.3.1 Выбор направлений поиска

В задачи исследований входит поиск, и предварительный отбор патентных документов, предметом защиты которых являются устройства и способы обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения. Целью настоящего исследования является формирование базы российских и зарубежных патентов для оценки существующих тенденций в области устройства обнаружения БПЛА.

В результате анализа предметной области поиск проводился по направлению: устройства и способы регистрации электромагнитного излучения БПЛА.

Таблица 2.3 – Параметры патентного поиска

№	Направление поиска	Полные классификационные индексы
1	устройства и способы регистрации электромагнитного излучения БПЛА	<p>G01r 33/00 (2006.01) Схема магнитной компенсации и способ компенсации выходного сигнала магнитного датчика реагирующего на изменение первого магнитного поля.</p> <p>G01s 17/00 (2006.01) Система и способ обнаружения винтокрылых БПЛА.</p> <p>G01B 11/24 (2006.01) Устройство для контроля координат модулей не жесткой крупноапертурной антенной решетки БПЛА.</p> <p>G01s 17/06 (2006.01) f41g 7/26 (2006.01) Многоканальное устройство обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов и прицеливания.</p> <p>G01S 13/00 (2006.01) мобильная малогабаритная трех координатная РЛС.</p>

2.3.2 Патентный поиск

После того как был осуществлен выбор направлений поиска и определены основные индексы МПК по интересующим направлениям был проведен патентный поиск. Патентный поиск проводился с использованием открытых источников информации: патентного ведомства США (сайт: <http://patft.uspto.gov>), Европейского патентного ведомства (сайт: <http://ep.espacenet.com>) и Федерального института промышленной собственности (сайт: <http://www1.fips.ru>). Для оценки полного числа охраняемых документов по направлению патентных исследований был сформулирован запрос, включающий в себя индексы МПК всех направлений поиска. Результирующая выборка составила около 1000 патентов.

Для оценки области поиска по каждому из интересующих направлений были выполнены аналогичные запросы. В качестве ключа поиска указывался полный перечень МПК по каждому из направлений (5 Роспатент, 5 EU, 5 USA).

Предварительный анализ области патентного поиска позволил сформировать перечень ключевых слов и словосочетаний для проведения дальнейшего патентного поиска, приведенный в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Перечень ключевых слов и словосочетаний по направлениям

№	Направление поиска	Ключевые слова на русском языке	Ключевые слова на английском языке
1	Устройства и способы регистрации электромагнитного излучения БПЛА	Прибор, система, комплекс для обнаружения БПЛА. Регистрация БПЛА	Detection and drone

Определена глубина патентного поиска, которая составляет 20 лет.

В соответствии с регламентом поиска были сформированы запросы для поисковых систем. В результате патентного поиска найдено более тысячи

патентов, соответствующих требованиям по МПК и наличию ключевых слов или словосочетаний в названии патента. Предварительный анализ патентов показал, что данная выборка является избыточной, так как далеко не всегда найденный охранный документ, удовлетворяющий условиям поиска, в действительности имел прямое отношение к теме исследований. Поэтому был проведен анализ рефератов и формул найденных изобретений и полезных моделей с целью устранения избыточности.

В результате анализа отобрано 15 патентов по двум направлениям патентного поиска.

2.3.3 Анализ изобретательской активности

Проведен анализ распределения охранных документов по годам, характеризующий изобретательскую активность по направлениям поиска. На рисунке 2.8 приведена гистограмма распределения патентных документов по годам для первого направления поиска (Устройства и способы регистрации электромагнитного излучения БПЛА).



Рисунок 2.8 – Гистограмма изобретательской активности по направлению «Устройства и способы регистрации электромагнитного излучения БПЛА»

Анализ изобретательской активности позволяет выделить несколько этапов.

Первый этап характеризуется снижением числа поданных документов в интервале с 2000-го по 2010-й годы, затем резким увеличением подачи заявок с 2010-го по 2019-й года.

2.3.4 Основные исследовательские коллективы

Отобраны основные отечественные и зарубежные коллективы (или частные лица) имеющие два или более действующих патента на территории Российской Федерации, Европейского Союза или Соединенных Штатов Америки по каждому из направлений патентных исследований. Результаты отбора проведены ниже.

В таблице 2.5 приведен перечень основных коллективов, имеющих охранные документы РФ по направлению 1 – Устройства и способы регистрации электромагнитного излучения БПЛА.

Таблица 2.5 – Перечень основных коллективов

№	Авторы	Кол-во работ
1	CUBAN MARK; REITMAN JOYCE; PRITCHARD JEFFREY ORION	24
2	WEINSTEIN LEE; GAINSBORO JAY	22
3	ZHAO QING; WANG SHANG; MA CHUNGUANG; HUO JIANJIAN; XIE LONGHAO	9
4	TRUNDLE STEPHEN SCOTT; SLAVIN ALISON JANE	27
5	PARK HEE SEOK; YOO CHANG BAE; PARK JEA WOO; CHOI YUN TAE	4
6	Фитасов Евгений Сергеевич, Марисов Павел Станиславович, Королев Андрей Георгиевич, Смирнов Дмитрий Сергеевич, Саберов Алексей Геннадьевич	58
7	Иванченко Сергей Тимофеевич (RU), Янакова Елена Сергеевна (RU), Костров Леонид Алексеевич (RU), Петричкович Ярослав Ярославович (RU)	45

Продолжение таблицы 2.5

№	Авторы	Кол-во работ
8	ВЕСТ Гордон Фокс (СА), УОЛКЕР Питер Уайт (СА), ПОЛЬЗЕР Бенджамин Дэвид (СА)	13
9	Полтавский Александр Васильевич (RU), Маклаков Владимир Васильевич (RU), Бородуля Владимир Михайлович (RU)	25
10	Шишков Сергей Викторович (RU), Искоркин Дмитрий Викторович (RU), Музауи Карим	91
11	Ludwig; Stephan	23
12	Olsson; Mark S; Merewether; Ray; Bench; Aldridge; Sequoyah; Wisecaver; Paul; Rutledge; Austin;	34
13	Wootton; Matthew;	18
14	VAN DER DOEL; Cornelis Pieter	29
15	Wootton; Мэтью ; Wootton; Джон ; Nissman; Крис ; МакКинни; Джастин ; Mehrotra; Саарт Dieseldorff; Борис)	22

На основе данных, представленных в таблице 2.5, построена диаграмма распределения количества патентов по коллективам. Проведен анализ распределения охранных документов по авторам и их количествам работ, характеризующий изобретательскую активность по направлениям поиска. На рисунке 2.9 приведена гистограмма распределения патентных документов по авторам и их количествам работ для первого направления поиска (Устройства и способы регистрации электромагнитного излучения БПЛА).

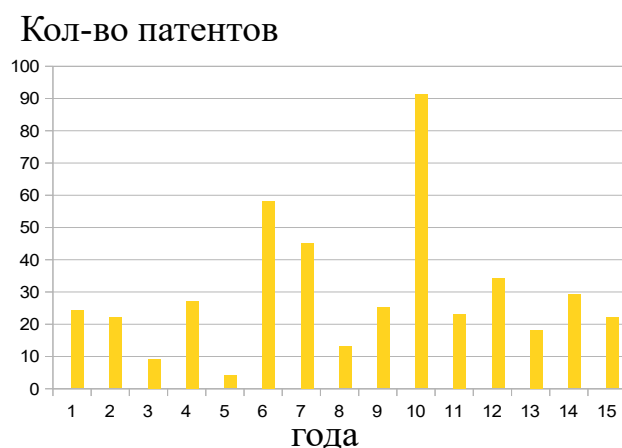


Рисунок 2.9 – Гистограмма распределения патентов по коллективам

2.3.5 Анализ тенденций изобретательской активности

В результате анализа патентной документации были выделены следующие направления совершенствования продукции и тенденции изобретательской активности:

- Мобильная малогабаритная трехкоординатная РЛС;
- Система и способ обнаружения винтокрылых беспилотных летательных аппаратов;
- Схема магнитной компенсации и способ компенсации выходного сигнала магнитного датчика, реагирующего на изменения первого магнитного поля;
- Устройство для контроля координат модулей нежесткой крупноапертурной антенной решётки беспилотного летательного аппарата;
- Многоканальное устройство обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов и прицеливания.

2.3.5.1 Мобильная малогабаритная трехкоординатная РЛС

Патентообладатель(и): Федеральное государственное казённое военное учреждение высшего профессионального образования «военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева»
Опубликовано 27.04.2015.

Полезная модель относится к области обнаружения, распознавания малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) и

прицеливания по ним и может быть использована в военной технике. Цель изобретения разработка устройства обнаружения МБЛА в различных условиях ведения наблюдения с использованием датчиков, работающих в оптическом, звуковом и радиолокационных диапазонах электромагнитных волн. Данная цель достигается применением трех и более изображений и сигналов в трех и более пространственно-разнесенных точках на гиростабилизирующихся платформах, связанных между собой рабочими базами. Рабочие базы автоматически определяют расстояния между собой и свои пространственные координаты, что позволяет разместить в любых удобных местах, как на подвижном, так и стационарном объекте. На каждой базе размещено по три датчика, работающих в оптическом (камеры кругового обзора), акустическом и в трех и более настраиваемых радиолокационных диапазонах электромагнитных волн. Управление работой трех каналов и обработкой полученной информации и сигналов осуществляет ЭВМ с элементами искусственного интеллекта, который сам выбирает наиболее эффективные каналы для более точного обнаружения и определения пространственных координат МБЛА в различных условиях ведения наблюдения, позволяет построить объемное ЗБ изображение МБЛА и сравнить с известными изображениями для их распознавания и прицеливания средств борьбы с МБЛА.

С данного патента можно отметить идею трех датчиков: оптического, акустического и радиолокационного. Датчики размещены на базе, информация поступающая по трем каналам обрабатывается в ЭВМ. Данный патент можно рассмотреть как дополнение к работе, которая ведется по теме устройства для обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения.

2.3.5.2 Система и способ обнаружения винтокрылых беспилотных летательных аппаратов

Патентообладатель(и): Акционерное общество "ЭЛВИС-НеоТек".

Изобретение относится к области систем безопасности, предназначенных для предотвращения несанкционированного доступа винтокрылых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в контролируемую зону и отслеживания перемещения винтокрылых БПЛА 1 в контролируемой зоне 3 с одновременной их аутентификацией. Техническим результатом изобретения является создание системы и способа обнаружения винтокрылых беспилотных летательных аппаратов с увеличенной точностью определения типа и параметров винтокрылого БПЛА 1 и увеличенной информативностью данных о винтокрылом БПЛА за счет автоматического видеонаблюдения за винтокрылым БПЛА 1 в дополнение к методам обнаружения БПЛА 1 с помощью спектрального и временного анализа акустического сигнала акустическими датчиками.

С данного патента можно отметить идею оптического наблюдения. Данный патент можно рассмотреть как дополнение к работе, которая ведется по теме устройства для обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения.

2.3.5.3 Схема магнитной компенсации и способ компенсации выходного сигнала магнитного датчика, реагирующего на изменения первого магнитного поля

Изобретение относится к измерению магнитных полей, а в частности к способам и устройствам для точного обнаружения присутствия слабого рассеянного магнитного поля при наличии известного более сильного поля. Схема аддитивной магнитной компенсации, содержащая сенсорный блок, который выводит первый цифровой сигнал, и контроллер, который принимает упомянутый первый цифровой сигнал, вычисляет цифровой компенсирующий сигнал и затем передает упомянутый цифровой компенсирующий сигнал к упомянутому сенсорному блоку. Сенсорный блок содержит: магнитный датчик, который создает первый аналоговый сигнал посредством восприятия составляющей магнитного поля; сумматор, который принимает первый аналоговый сигнал и выводит второй аналоговый сигнал;

АЦП, который преобразует упомянутый второй аналоговый сигнал в упомянутый первый цифровой сигнал, и ЦАП, который преобразует упомянутый цифровой компенсирующий сигнал в третий аналоговый сигнал для ввода в сумматор. При этом схема аддитивной магнитной компенсации содержит компьютер, который формирует предсказываемую модель магнитного поля в цифровой форме, причем контроллер импортирует первый цифровой сигнал и предсказываемую модель магнитного поля в цифровой форме и выводит в цифровой компенсирующий сигнал к упомянутой схеме компенсации. Технический результат заключается в подавлении действия сильного внешнего магнитного поля на магнитный датчик.

С данного патента можно отметить идею магнитного датчика. Данный патент можно рассмотреть как дополнение к работе, которая ведется по теме устройства для обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения.

2.3.5.4 Устройство для контроля координат модулей нежесткой крупно апертурной антенной решётки беспилотного летательного аппарата

Патентообладатель(и): учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.

Техническим результатом предложения является повышение пространственной избирательности радиолокационных систем обнаружения БЛА выполненных по технологии фазированных решеток. Технический результат достигается тем, что устройство контроля координат модулей нежесткой крупноапертурной антенной решетки для беспилотного летательного аппарата содержит установленные последовательно по ходу луча лазерный дальномер, поворотное зеркало, фокусирующую линзу, полупрозрачное зеркало, длиннофокусный объектив, оптический сканер и светоотражающие элементы с интегрированными в них светодиодами размещенные на модулях антенной решетки, при этом за полупрозрачным зеркалом установлены светофильтр и ПЗС-матрица, причем модули антенной

решетки установлены на консолях по периметру летательного аппарата, а устройство контроля размещено на выдвижной штанге.

С данного патента можно отметить идею фазированных решеток. Данный патент можно рассмотреть как дополнение к работе, которая ведется по теме устройства для обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения.

2.3.5.5 Многоканальное устройство обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов и прицеливания

Патентообладатель(и): Федеральное государственное казенное военное учреждение высшего профессионального образования «Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева»

Полезная модель относится к области обнаружения распознавания МБЛА и прицеливания по ним и может быть использована в военной технике. Цель изобретения – разработка устройство обнаружения МБЛА в различных условиях ведения наблюдения с использованием датчиков, работающих в оптическом, звуковом и радиолокационных диапазонах электромагнитных волн. Данная цель достигается применением трех и более изображений и сигналов в трех и более пространственно-разнесенных точках на гиростабилизирующихся платформах, связанных между собой рабочими базами.

Рабочие базы автоматически определяют расстояния между собой и свои пространственные координаты, что позволяет разместить в любых удобных местах, как на подвижном, так и стационарном объекте.

С данного патента можно отметить идею трех датчиков: оптического, акустического и радиолокационного. Датчики размещены на базе, информация, поступающая по трем каналам, обрабатывается в ЭВМ. Данный патент можно рассмотреть как дополнение к работе, которая ведется по теме устройства для обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения.

2.3.6 Разработка рекомендаций

В результате проведенного анализа патентной документации на устройства и способы регистрации электромагнитного излучения БПЛА, определен существующий уровень техники и выработаны рекомендации по возможным путям дальнейшего технического совершенствования продукции.

В отношении устройств и способов регистрации электромагнитного излучения БПЛА выработаны следующие рекомендации:

1. Для обеспечения патентной чистоты создаваемой продукции, проектирование приборов для обнаружения БПЛА следует производить с учетом известных технических решений, защищенных патентами, которые перечислены в пункте 2.3.5.

2. Техническим решением, неизвестным из существующего уровня техники, является реализация в одном приборе обнаружения БПЛА с помощью: видео, звука, электромагнитного излучения, радиолокационное излучение.

3. Схемотехническое исполнение прибора обнаружения БПЛА должно обеспечивать защиту от шунтирования (в том числе симметричного) измерительной части находящейся в усилителе.

2.3.7 Заключение патентного поиска

Всего выдано 15 патентов по теме: «устройство для обнаружения беспилотного летательного аппарата», в том числе российских – 5, европейских – 5, американских – 5. Патенты, которые касаются реальной темы ВКР: «устройство для обнаружения беспилотного летательного аппарата по признаку собственного электромагнитного излучения в области низких частот» не было обнаружено. Таким образом, по результатам анализа отобранных патентов можно сделать следующий вывод: на российских и зарубежных рынках в данный период времени нет аналогов и прототипов касающихся данной тематики. Есть только другие методы обнаружения, которые можно использовать как дополнения к методу обнаружения по собственному электромагнитному излучению БПЛА.

3 Описание экспериментальной установки и макетирование приемного блока

Беспилотный летательный аппарат осуществляет работу с помощью электродвигателей, которые выделяют электромагнитное излучение, что и послужило предпосылкой к исследованию. Так как характер излучения является магнитным, то для регистрации сигнала целесообразно использовать индукционный датчик или систему датчиков.

3.1 Индукционные датчики и инструментальный усилитель

Магнитная составляющая излучения БПЛА регистрируется с помощью индукционных датчиков с разной формой чувствительных элементов, представляющего собой катушки индуктивности (1000, 1715 витков) на стержневом ферромагнитном сердечнике. Электронная часть датчиков размещена в пластиковом корпусе. Сигналы датчиков поступают на выполненный по инструментальной схеме усилитель, состоящий из двух каскадов ДУ1 и ДУ2. Для минимальных искажений входного сигнала каскад усилителя ДУ1 размещён внутри корпуса датчиков. Дифференциальный сигнал, усиленный в дифференциальном усилителе, передавался по витой паре на вход второго каскада, в котором выполнялось ослабление наведенной при передаче синфазной помехи.

3.2 Электродвигатель БПЛА

В настоящее время наиболее распространены беспилотные летательные аппараты, работающие на бесколлекторных электродвигателях. Вращение двигателя осуществляется путем смены направления магнитного поля в обмотках ротора в определенной последовательности. При этом постоянные магниты взаимодействуют с магнитными полями ротора и приводят в движение подвижный статор. В основе этого движения лежит основное свойство магнитов, когда одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются. Само по себе магнитное поле не замыкается полностью внутри двигателя и частично излучается во внешнюю среду ввиду

неидеальности конструкции. Это послужило предпосылкой для наблюдения за данным признаком в рамках настоящей работы.

В составе электродвигателя имеется: а) 14 постоянных магнитов; б) 12 катушек индуктивности, соединенных последовательно по четыре для каждой из трех фаз обмотки.

Электромагнитное излучение электродвигателей БПЛА находится в диапазоне от 6 до 9 кГц.

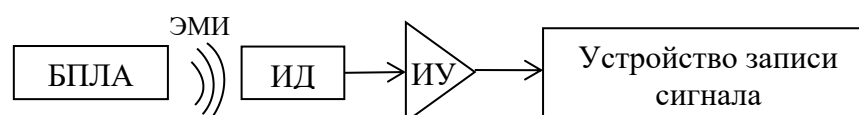
На рисунке 3.1 представлен бесколлекторный электродвигатель WK-WS-28-014 (KV2500), на котором работает Walkera_runner_250 и многие другие БПЛА.



Рисунок 3.1 – Электродвигатель БПЛА

3.3 Разработка структурных и принципиальных схем

В работе [2] проведен эксперимент (схема экспериментальной установки изображена на рисунке 3.2), в котором при запущенных двигателях БПЛА проводилась регистрация электромагнитного излучения, где в качестве первичного преобразователя использовался индукционный датчик. Далее сигнал был усилен и отфильтрован. После чего зарегистрированное электромагнитное излучение записывалось в реальном масштабе времени устройством записи сигнала. Оцифровка сигнала может быть выполнена с помощью: а) осциллографа, который используется для записи сигнала в моменте; б) звуковой карты компьютера, используемой для продолжительной записи спектрограммы.



ЭМИ – электромагнитное излучение; ИД – индукционный датчик с разными чувствительными элементами; ИУ – инструментальный усилитель.

Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки

3.3.1 Моделирование схемы

Результаты экспериментов, проводимые ранее, показали, что в [1, 2] дальность обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения составила 10 метров.

Проблематика эксперимента в работе [1, 2] заключается в следующем:

1) Индукционный датчик был разработан и активно применяется для горных пород в шахтных сооружениях, в своем составе имеет только первичную схему усиления и узкую диаграмму направленности;

2) Система рассчитана на диапазон от 0 до 100 кГц, что могло повлиять на соотношение сигнал/шум проведенных измерений.

Для устранения выявленных недостатков должны быть решены следующие задачи:

1) Разработка схемы входного аналогового тракта для снятия сигнала с катушки индуктивности датчика, его фильтрации и усиления;

2) Достижение более широкой диаграммы направленности индукционного датчика.

Результаты первых экспериментов [1, 2] показали, что датчик должен быть разнесён с блоком обработки на 4–6 м и связан проводным соединением. Поэтому в блоке аналоговой обработки должен быть предусмотрен канал передачи аналогового сигнала. Наиболее предпочтительным может быть дифференциальный режим передачи.

При разработке принципиальной схемы была выбрана схема инструментального усилителя на трех операционных усилителях (ОУ).

Схема инструментального усилителя имеет симметричный вход, что позволяет обеспечить протекание тока. Схему дифференциального усилителя нецелесообразно применить в данном случае, так как она имеет несимметричный вход и это может повлиять на наличие синфазной составляющей.

Поэтому дифференциальный усилитель может корректно работать только с источником сигнала с низкоимпедансным выходом. В связи с этим использование данного вида усилителя в связке с катушкой индуктивности (источником сигнала) может привести к некорректной работе последней и может возникнуть дисбаланс катушки индуктивности. Так же для передачи дифференциального сигнала нужно защищать катушку индуктивности от влияния сопротивления.

Для моделирования схемы была выбрана программа LTspice 17. Так как программа является зарубежной, библиотека компонентов выполнена по европейскому условно графическому обозначению. Операционный усилитель был выбран марки AD8671 ключевым параметром, которым является низкий уровень собственного шума.

На рисунке 3.3 изображена модель входного тракта на трех ОУ. Первая часть схемы (А) – блок, обеспечивающий высокое входное сопротивление (находится в датчике) и преобразует входной сигнал в дифференциальный. Дифференциальный сигнал используется для передачи сигнала на расстояния и является помехоустойчивым из-за наводок синфазной составляющей. Вторая часть схемы (Б) – дифференциальный усилитель (размещена в блоке обработки), преобразует входной дифференциальный сигнал в однополярный, устраняя при этом синфазные помехи. В предложенной модельной схеме L1 является излучателем магнитной составляющей, а L2 чувствительным элементом.

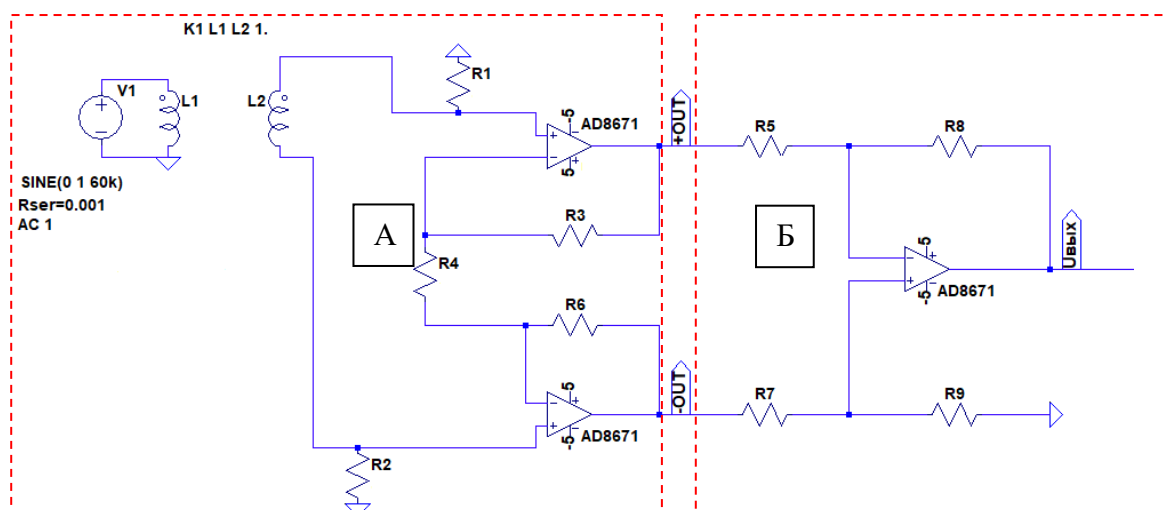


Рисунок 3.3 – Модель входного тракта на трех ОУ

В работе [1, 2] использовалась схема инструментального усилителя с коэффициентом усиления первичного усилителя (А) равным 10, а вторичного (Б) – 1. В нынешней разработанной схеме коэффициент усиления первичного каскада составляет 26, а вторичного каскада составляет 1.

Расчет дифференциального коэффициента усиления модели входного тракта, где $R5=R7=R8=R9=1$ кОм; $R3=R6=10$ кОм; $R4=390$ Ом.

$$K_{u1} = \frac{R3+R4+R6}{R4} = \frac{10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3 + 390}{390} = 52 \quad (3.1)$$

$$K_{u2} = \frac{R8}{R5} = \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = 1 \quad (3.2)$$

$$K_{u, \text{диф}} = \left(1 + \frac{R3 \cdot 2}{R4}\right) \cdot \frac{R8}{R5} = \left(1 + \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^3}{390}\right) \cdot \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = 52$$

3.3.2 Моделирование фильтров верхних и нижних частот

В связи с тем, что промышленные частоты большие по амплитуде и составляют порядка 50–60 Гц, их необходимо отфильтровывать для снижения влияния на целевой сигнал. В дальнейшем предполагается использовать 12-битный аналогово-цифровой преобразователь с частотой дискретизации от 1 МГц до 2,4 МГц. Поэтому, для устранения эффекта зеркальных частот, на частоте ($f_{\text{дискретизации}} - f_{\text{в}}$) сигнал должен быть ослаблен на величину динамического диапазона АЦП, то есть на 72 дБ.

Результатирующие требования к фильтрам по крутизне коэффициента передачи изображены на рисунке 3.4, где по уровню в минус 3 дБ указывается полоса пропускания в диапазоне от 500 Гц до 10 кГц.

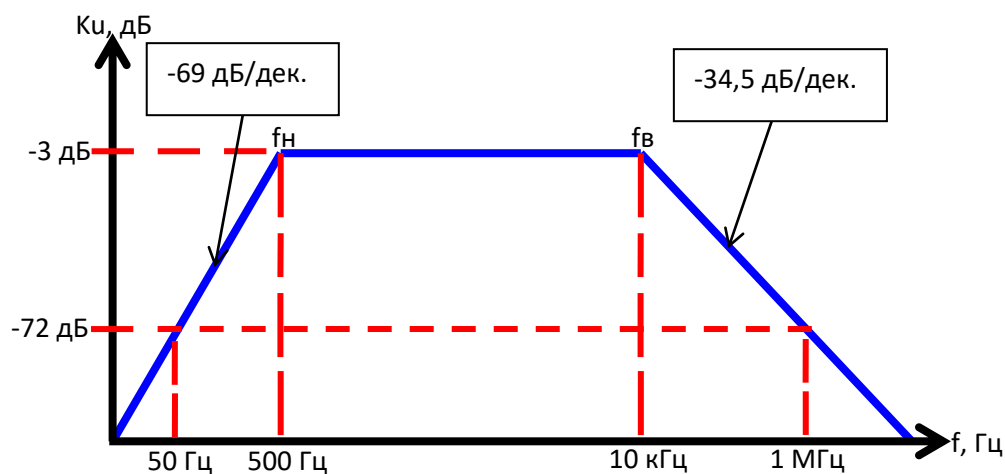


Рисунок 3.4 – Сигнал на выходе активных фильтров

Из графика требований для активных фильтров следует, что в левой части графика требуется обеспечить затухание за одну декаду, а в правой – за две.

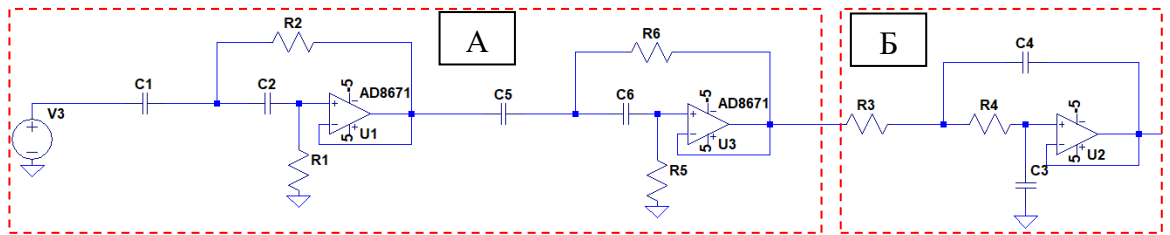
Активные фильтры выбирались из нескольких видов: Баттерворта, Чебышева, Бесселя.

Для проектирования была выбрана схема активного фильтра Баттерворта, фильтры этого класса отличаются от других методом проектирования. Фильтр Баттерворта проектируется так, чтобы его амплитудно-частотная характеристика была максимально гладкой на частотах полосы пропускания. Фильтр имеет относительно невысокую чувствительность к отклонениям значений элементов. Фильтр Баттерворта выполнен на основе структуры Саллена-Кея, то есть имеет второй порядок и реализуется в виде схемы с двумя резисторами, двумя конденсаторами и активным элементом в качестве которого используется ОУ [27].

Фильтры Баттерворта обладают ключевыми параметрами: частота среза и добротность. Коэффициент передачи на фильтре составляет 1.

Исходя из этого, в модели выбраны активные фильтры Баттерворта верхних частот четвертого порядка и нижних частот второго порядка.

На рисунке 3.5 представлена модель активных фильтров Баттерворта верхних частот четвертого порядка и нижних частот второго порядка.



А – ФВЧ четвертого порядка; Б – ФНЧ второго порядка

Рисунок 3.5 – Модель схемы блока фильтрации

Частота среза рассчитывается по формуле (3), а добротность по (4) [28].

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}} \quad (3.3)$$

$$Q_c = \frac{\sqrt{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}}{(R1 + R2) \cdot C2} \quad (3.4)$$

В модели фильтра могут присутствовать как парные, так и не парные электронные компоненты.

Если $R1=R2=R$; $C1=C2=C$, то выражение для расчета частоты среза примет следующий вид:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (3.5)$$

Выбор номиналов компонентов для блока фильтров происходил следующим образом (на рисунке 3.2 представлены ограничения полосы пропускания): $f_{НЧ} = 500$ Гц; $f_{ВЧ} = 10$ кГц.

Для конденсаторов: $C_1 = C_2 = C$, а для резисторов: $R1 = R2 = R$.

Для схемы активного ФВЧ четвертого порядка резисторы выбирались по ряду E12, для того что бы обеспечить ток потребления приемлемым и не возникали высокие шумы, целесообразно использовать номиналы резисторов в пределах от 1 до 10кОм. Был выбран резистор номиналом: $R=6,8$ кОм.

Из формулы частоты среза выражается параметр C .

$$C_1 = C_2 = C = \frac{1}{2 \pi f_c R} \quad (3.6)$$

$$C = \frac{1}{2 \pi \cdot 500 \cdot 6.7 \cdot 10^3} = 47 \text{ нФ} \quad (3.7)$$

Для схемы активного ФНЧ второго порядка были выбраны резисторы номиналом 1,5 кОм.

Из формулы частоты среза выражается параметр C .

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1.5 \cdot 10^3} = 10 \text{ нФ} \quad (3.8)$$

Для ФВЧ были выбраны оптимальные номиналы резисторов $R=8,2$ кОм; для ФНЧ: $R=1$ кОм. Резисторы выбраны из доступности и из графика заданной АЧХ.

На рисунке 3.6 представлена модельная схема фильтров Баттерворда с рассчитанными номиналами компонентов.

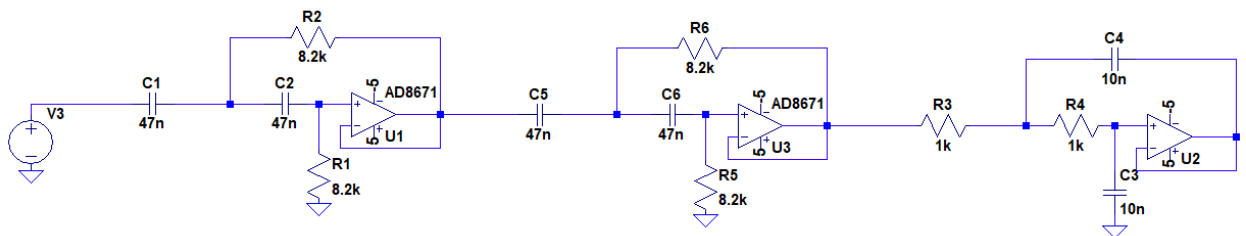


Рисунок 3.6 – Модель фильтров Баттерворта

На рисунке 3.7 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) модели фильтров Баттерворта. АЧХ смоделированного фильтра удовлетворяет требованию к фильтру указанному на рисунке 3.4.

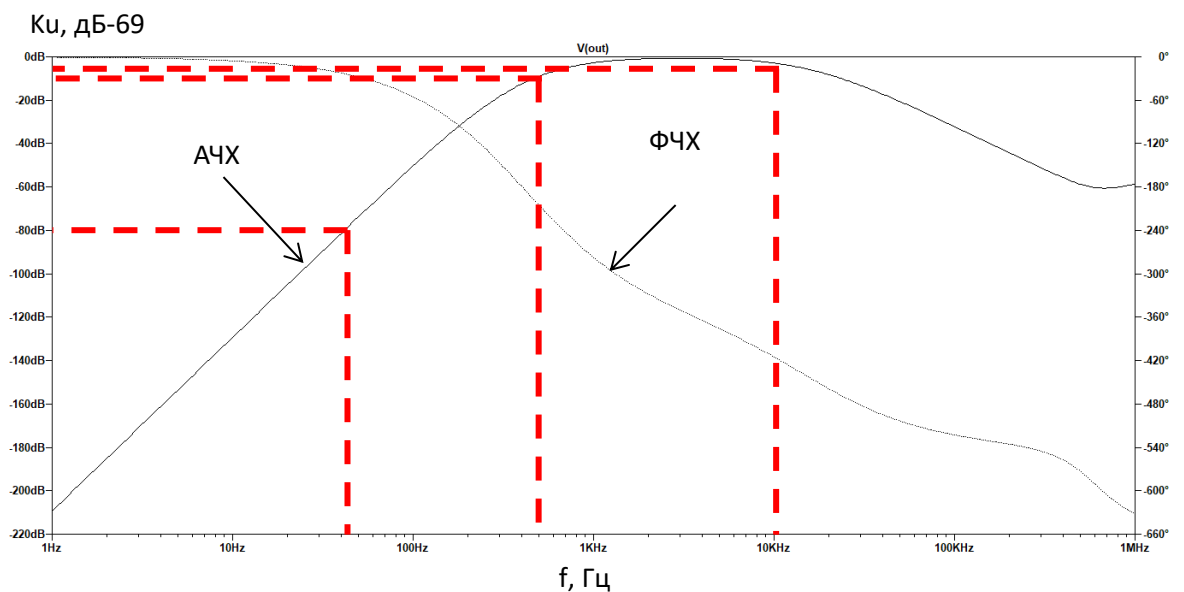


Рисунок 3.7 – АЧХ блока фильтров

Из АЧХ видно, что на частоте в 50 Гц ослабление составляет минус 73 дБ, на частоте 500 Гц коэффициент усиления составляет минус 9 дБ, на уровне 10 кГц коэффициент усиления составляет минус 3дБ.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что структура фильтра удовлетворяет поставленным требованиям к разработке. Уровень на частоте 500 Гц в минус 9 дБ обусловлен порядком фильтром.

На рисунке 3.8 представлена модель схемы. Первый каскад (А) схемы включает в себя схему датчика первичной регистрации, второй каскад (Б) схемы включает в себя блок усиления и фильтрации.

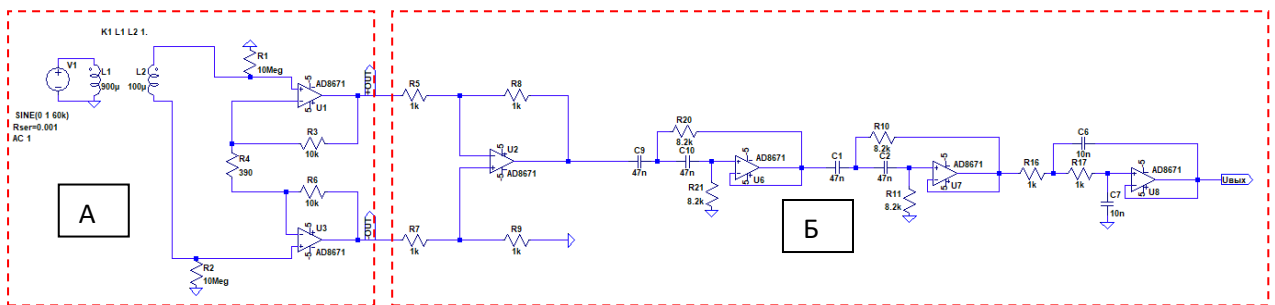


Рисунок 3.8 – Модель схемы

На рисунке 3.9 представлена АЧХ модельной схемы.

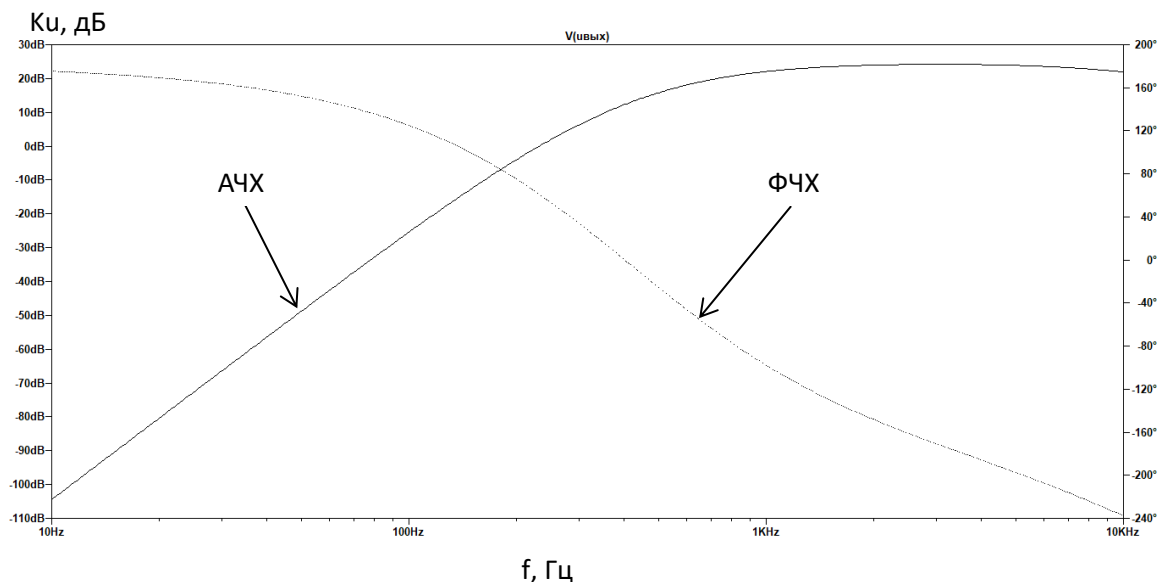


Рисунок 3.9 – АЧХ модели схемы

Принципиальная схема индукционного датчика так же должна содержать схему однополярного питания, для обеспечения средней точки,

схема содержит в себе комплементарную пару, на которой строится выходной каскад первичной схемы усилителя.

На рисунке 3.10 представлена схема однополярного питания.

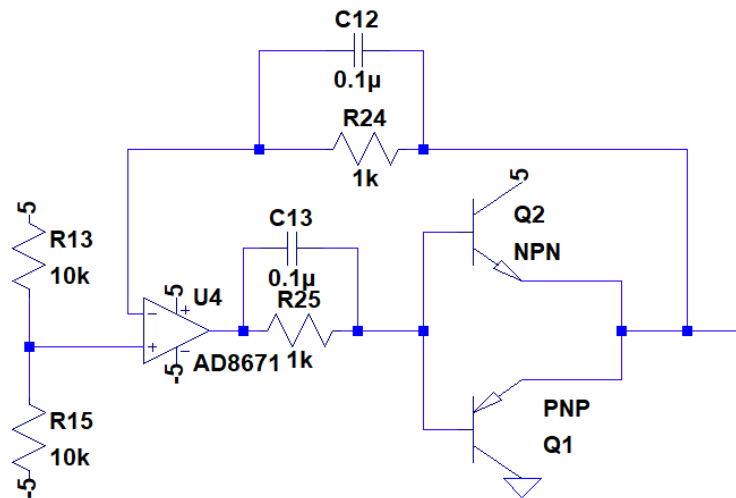


Рисунок 3.10 – Модель однополярного питания схемы

На рисунке 3.11 изображена конечная модель входного тракта. Схема разделена на три блока. Блок А – первичный усилитель обеспечивает высокое входное сопротивление (находится в электромагнитном датчике) и преобразует входной сигнал в дифференциальный. Дифференциальная пара используется для передачи сигнала на расстоянии и является помехоустойчивой из-за наводок синфазной составляющей. Блок Б – дифференциальный усилитель и блок фильтров (размещаются в блоке обработки), преобразует входной дифференциальный сигнал в однополярный, устраняя при этом синфазные помехи, которые могли навестись на линию передачи; блок фильтров служит для устранения промышленных частот (50–60 Гц), которые оказывают влияние на сигнал. Блок В – однополярное питание для обеспечения опорного напряжения, схема содержит в себе комплементарную пару биполярных транзисторов, которая служит для уменьшения выходного сопротивления. В предложенной модельной схеме L1 является излучателем магнитной составляющей, а L2 чувствительным элементом.

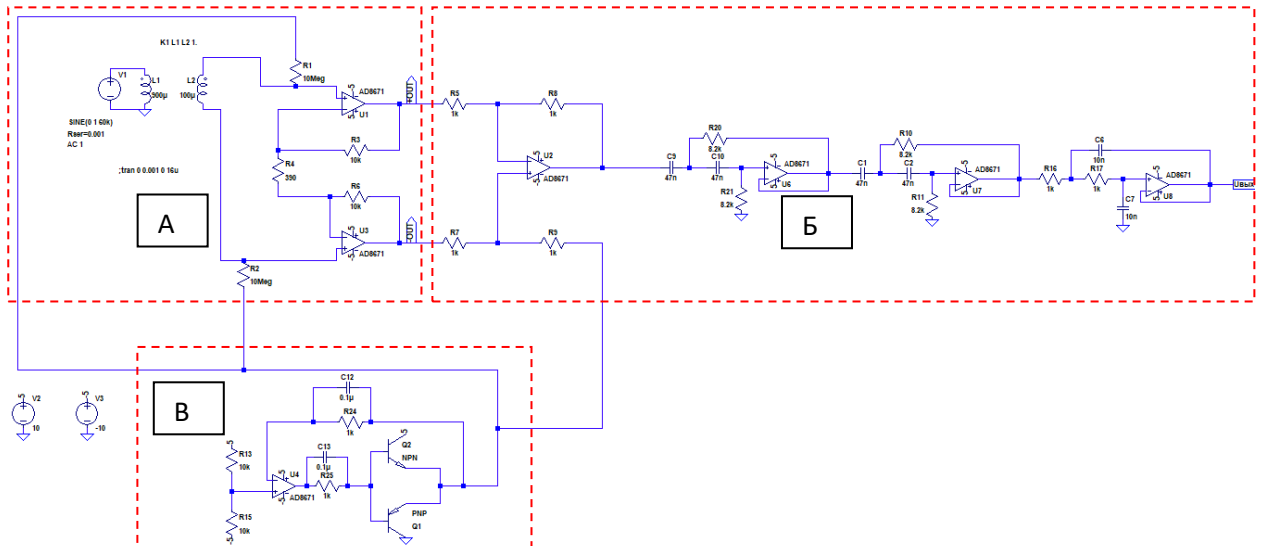


Рисунок 3.11 – Модель схемы

Далее были разработаны схемы электрические принципиальные: а) КУДР.411525.001 ЭЗ усилитель первичный; б) КУДР.411539.001 ЭЗ усилитель дифференциальный. Схемы электрические принципиальные соответствуют требованиям ГОСТ 2.702-2011 – правила выполнения электрических схем. Название и номиналы элементов электрических схем указаны в перечнях элементов: а) КУДР.411525.001 ПЭЗ усилитель первичный; б) КУДР.411539.001 ПЭЗ усилитель дифференциальный. Так же была разработана схема электрическая структурная (КУДР.411169.001 Э1 приемного блока для устройства обнаружения БПЛА).

На рисунке 3.12 продемонстрированы графики АЧХ и ФЧХ конечной модельной схемы.

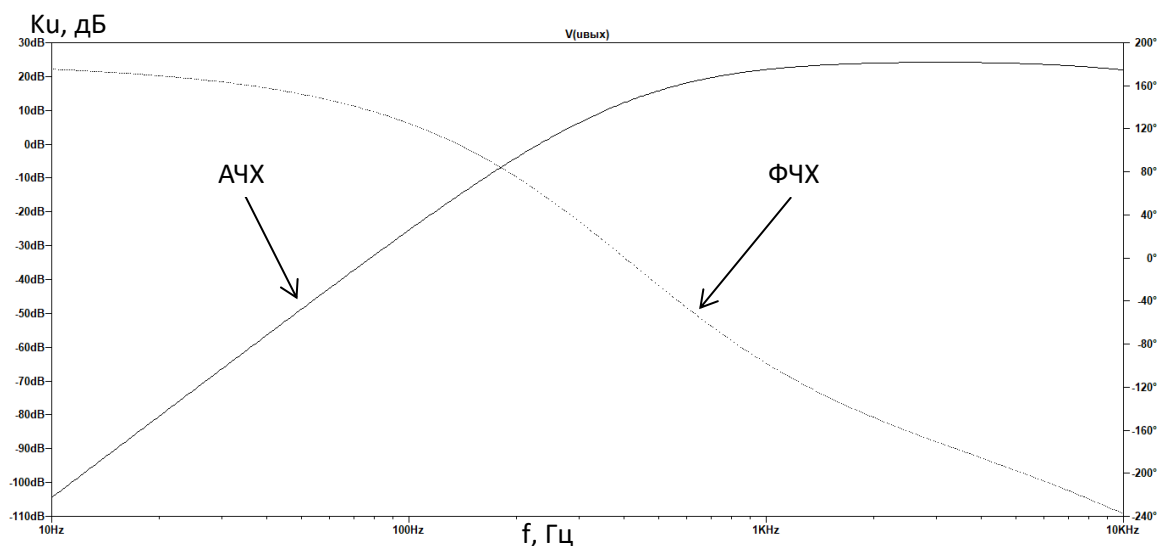


Рисунок 3.12 – Сигнал на выходе схемы

3.4 Построение математических моделей индукционного датчика и кольца Гельмгольца

Расчетная часть катушки индуктивности и кольца Гельмгольца была выполнена в программе Mathcad 14.

3.4.1 Расчет индуктивности

Чувствительный элемент имеет форму шести ступенчатого конуса. Для того чтобы выполнить намотку медной проволоки на каждую ступень был произведен расчет индуктивности, количества витков, магнитной проницаемости.

На рисунке 3.11 представлена модель чувствительного элемента с нумерацией ступеней.

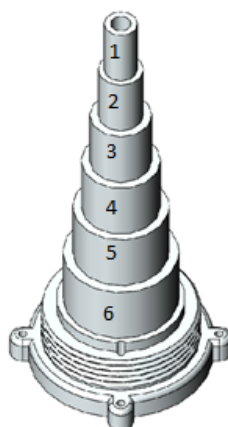


Рисунок 3.11 – Модель чувствительного элемента

Таблица 3.1 – Начальные параметры каждой ступени чувствительного элемента

Высота H , м	Диаметр d , м	Радиус $r = \frac{d}{2}$, м
$H1=0,025$	$d1=0,0129$	$r1=6,45 \cdot 10^{-3}$
$H2=0,025$	$d2=0,0175$	$r2=8,75 \cdot 10^{-3}$
$H3=0,025$	$d3=0,0241$	$r3=0,012$
$H4=0,025$	$d4=0,0306$	$r4=0,015$
$H5=0,025$	$d5=0,0373$	$r5=0,019$
$H6=0,025$	$d6=0,045$	$r6=0,023$

Так как ступени имеют цилиндрическую форму, то объем цилиндра вычисляется по формуле (3.9).

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot H \quad (3.9)$$

Площадь поперечного сечения каждого цилиндра вычисляются по формуле 3.10.

$$S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \quad (3.10)$$

Таблица 3.2 – Результаты расчета объема и площади цилиндров

Объем V , м ³	Площадь S , м ²
$V1=3,267 \cdot 10^{-6}$	$S1=1,307 \cdot 10^{-4}$
$V2=6,013 \cdot 10^{-6}$	$S2=2,405 \cdot 10^{-4}$
$V3=1,14 \cdot 10^{-5}$	$S3=4,562 \cdot 10^{-4}$
$V4=1,839 \cdot 10^{-5}$	$S4=7,354 \cdot 10^{-4}$
$V5=2,732 \cdot 10^{-5}$	$S5=1,093 \cdot 10^{-3}$
$V6=3,976 \cdot 10^{-5}$	$S6=1,59 \cdot 10^{-3}$

Так как по катушке протекает электрический ток I , который создает в окружающем пространстве магнитное поле, то в результате этого катушка пронизывается собственным магнитным потоком Φ , который пропорционален току в катушке, создавшему магнитное поле и это можно видеть из основной формулы (3.11).

$$\Phi = L \cdot I \quad (3.11)$$

где L – индуктивность [Гн].

Индуктивность зависит от размеров, формы проводника, магнитных свойств среды. По формуле (3.12) рассчитывалась индуктивность каждой ступени.

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{n^2}{l} S \quad (3.12)$$

где μ – магнитная проницаемость феррита = 2500;

$$\mu_0 \text{ – магнитная постоянная} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}};$$

n – количество витков катушки;

l – длина намотки, $l=H$;

S – площадь сечения.

Магнитный поток катушки на ферритовом стержне не замкнут целиком внутри феррита и каждая силовая линия проходит и по ферритовому стержню и по воздуху. Индуктивность зависит от магнитной проницаемости ферритового стержня и его размеров; размеров катушки; взаимного соотношения размеров катушки и стержня; положения катушки относительно центра стержня [29, 30].

Расчет индуктивности катушки на ферритовом стержне основан на определении относительной эффективной проницаемости стержня (формула 3.13), т.е. во сколько раз возрастет индуктивность катушки с воздушным сердечником, если внутрь нее вставить ферритовый стержень

$$\mu_e = \frac{Lf}{L_{air}} = \frac{1+x}{\frac{1}{k} + \frac{x}{\mu f e}} \quad (3.13)$$

где $\frac{Lf}{L_{air}}$ – отношение индуктивности катушки с ферритом к индуктивности той же катушки без феррита.

Ниже приведены формулы для вычисления коэффициентов x , k , $\mu f e$.

$$l' = lc + 0,45 \cdot dc \quad (3.14)$$

$$\varphi_{\text{max}} = \frac{1}{\frac{(lf-lc)^{1.4}}{1 + \frac{df}{5 \cdot \mu}}} \quad (3.15)$$

где l_f – длина сердечника = 0,15 м.

$$C_{anf} = 0,5 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{(l_f - l_c)}{(\ln(2 \cdot \frac{l_f + d_f}{d_f}) - 1)} \quad (3.16)$$

где ε_0 – электрическая постоянная = $8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$.

$$k = \left(\frac{(\varphi_{\varphi max} + \frac{C_{anf}}{\varepsilon_0}) + 2 \cdot d_f}{2 \cdot d_c} \right) \quad (3.17)$$

$$x = 5.1 \cdot \frac{(\frac{l'}{d_c})}{(1 + 2,8 \cdot (\frac{d_c}{l'}))} \quad (3.18)$$

По формуле (3.19) рассчитывается эквивалентная магнитная проницаемость.

$$\mu_{fe} = (\mu - 1) \cdot \left(\frac{d_f}{d_c} \right)^2 + 1 \quad (3.19)$$

где l_c – длина катушки; d_c – диаметр.

На рисунке 3.12 представлена модель соленоида.

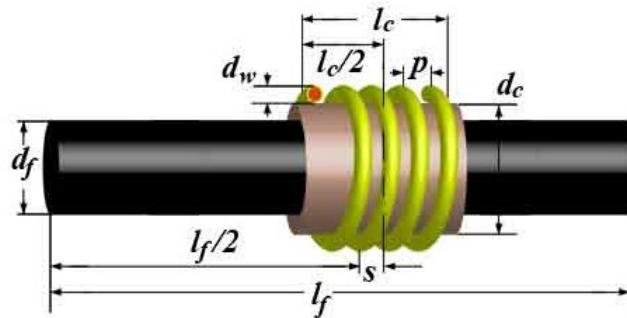


Рисунок 3.12 – Модель соленоида

Параметр μ_{fe} учитывает случай, когда обмотка не прилегает к стержню, т.е. между стержнем и обмоткой существует радиальный зазор.

Параметр C_{anf} учитывает влияние частей стержня, которые выступают за пределы катушки. Эти части уменьшают магнитное сопротивление внешней части магнитной цепи и также увеличивают индуктивность [29].

Из формулы (3.20) выведем уравнения для расчета количества витков для каждой ступени, где $\Phi_1 = \Phi_2$.

$$\begin{cases} \Phi_1 = l_1 \cdot I \\ \Phi_2 = l_2 \cdot I \end{cases} \quad (3.20)$$

$L_1 = L_2$, индуктивность каждой ступени должна быть одинаковой.

$$\mu_{fe1} \cdot \mu_0 \cdot \frac{n1^2}{l} \cdot s1 = \mu_{fe2} \cdot \mu_0 \cdot \frac{n2^2}{l} \cdot s2 \quad (3.21)$$

$$\mu_{fe1} \cdot n1^2 \cdot S1 = \mu_{fe2} \cdot n2^2 \cdot S2 \quad (3.22)$$

Количество витков для каждой ступени находится по формуле (3.23).

$$n2 = \sqrt{\frac{\mu_{fe1} \cdot n1^2 \cdot S1}{S2 \cdot \mu_{fe2}}} \quad (3.23)$$

В предыдущей модели использовалось 1000 витков, поэтому выражение для вывода количества витков первой ступени будет иметь следующий вид:

$$1000 = n1 + \sqrt{\frac{\mu_{fe1} \cdot n1^2 \cdot S1}{S2 \cdot \mu_{fe2}}} + \sqrt{\frac{\mu_{fe1} \cdot n1^2 \cdot S1}{S3 \cdot \mu_{fe3}}} + \sqrt{\frac{\mu_{fe1} \cdot n1^2 \cdot S1}{S4 \cdot \mu_{fe4}}} + \sqrt{\frac{\mu_{fe1} \cdot n1^2 \cdot S1}{S5 \cdot \mu_{fe5}}} + \sqrt{\frac{\mu_{fe1} \cdot n1^2 \cdot S1}{S6 \cdot \mu_{fe6}}}$$

Далее получаем: $1000 = n1 \cdot 5,772$.

Количество витков для первой ступени получаем по формуле (3.24).

$$n1 = \frac{1000}{5,772} = 174 \quad (3.24)$$

Но так как количество слоев было меньше единицы, то было принято решение увеличить количество витков, чтобы заполнить ступень медной проволокой и количество слоев стало больше единицы, количество витков для первой ступени находится из выражения (3.25).

$$n1 = \frac{1715}{5,772} = 297 \quad (3.25)$$

Индуктивность для каждой ступени находится из формулы (3.26).

$$L1 = \frac{\mu_{fe1} \cdot \mu_0 \cdot n1^2 \cdot S1}{H1} = 0,013 \text{ Гн} \quad (3.26)$$

Индуктивность для всех ступеней одинаковая, общая индуктивность находится по формуле (3.27).

$$L_{\text{общ}} = L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 = 0,078 \text{ Гн} \quad (3.27)$$

Количество витков одного слоя определяется по формуле (3.28).

$$Nn = \frac{H1}{Dp} = \frac{0,025}{0,00009} = 278, \quad (3.28)$$

где Dp – диаметр проволоки = 0,0009 м.

Количество слоев для каждой ступени вычисляется по формуле (3.29).

$$nn = \frac{n1}{Nn} = 1,07 \quad (3.29)$$

Таблица 3.3 – Расчеты первой части для каждой ступени по выше изложенным формулам

№ ступени	l'	$\varphi_{\varphi max}$	$Canf$	k	x	μfe	μe
1	0,031	0,996	$6,496 \cdot 10^{-13}$	3,453	5,606	962,096	22,361
2	0,033	0,996	$6,496 \cdot 10^{-13}$	2,545	3,847	533,24	12,111
3	0,036	0,996	$6,496 \cdot 10^{-13}$	1,848	2,632	276,367	6,596
4	0,039	0,996	$6,496 \cdot 10^{-13}$	1,456	2,013	171,806	4,313
5	0,042	0,996	$6,496 \cdot 10^{-13}$	1,194	1,633	115,955	3,092
6	0,045	0,996	$6,496 \cdot 10^{-13}$	0,99	1,355	79,981	2,293

Таблица 3.4 – Расчеты второй части для каждой ступени по выше изложенным формулам

№ ступени	n	$L, Гн$	nn	k
1	298	0,013	1,07	3,453
2	297	0,013	1,071	2,545
3	292	0,013	1,054	1,848
4	285	0,013	1,027	1,456
5	277	0,013	0,995	1,194
6	266	0,013	0,958	0,99

3.4.2 Расчет кольца Гельмгольца

Каждая катушка Гельмгольца образована витками медных проводов, при прохождении электрического тока по ним генерируется магнитное поле.

В таблице 3.5 приведены начальные параметры для расчета математического расчета кольца Гельмгольца.

Таблица 3.5 – Начальные параметры для расчета кольца Гельмгольца

Название	Размерность
Количество витков, N	38
Диаметр медного провода, d	0,005 м
Диаметр круга, D	0,5 м
Радиус катушки, r	0,25 м
Активное сопротивление, Ra	11,44 Ом
Индуктивность колец, L	1,273 мГн
Напряжение, поданное с генератора, U	100 мВ
Частота, поданная с генератора, f	5 кГц
Расстояние по оси катушек, x	0,27 м

По формуле (3.30) было найдено реактивное сопротивление кольца.

$$Rr = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 1,273 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ Ом} \quad (3.30)$$

Сила тока протекающего по виткам катушек колец при заданном напряжении, вычисляется по формуле (3.31).

$$I = \frac{U}{Rr + Ra} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{40 + 11,44} = 0,0019 \text{ А} \quad (3.31)$$

Суммарный модуль магнитного поля может быть получен из закона Био-Савара-Лапласа представленного в формуле (3.32).

$$B = \frac{\mu_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot I \cdot r^2}{4 \cdot \pi \cdot (r^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,0019 \cdot 0,25^2}{4 \cdot \pi \cdot (0,25^2 + 0,27^2)^{\frac{1}{2}}} = 2,075 \cdot 10^{-10} \text{ Тл} \quad (3.32)$$

По формуле (3.33) выражается магнитная индукция в геометрическом центре двух колец Гельмгольца [31].

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{r} = 0,71 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 38 \cdot 0,0019}{0,5} = 2,576 \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \quad (3.33)$$

Магнитное поле, создаваемое кольцами Гельмгольца, в каждой точке продольной оси X вычислялось по формуле (3.34).

$$Bx = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I \cdot r^2 \cdot \left(\left(r^2 + \left(x + \frac{r}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} + \left(r^2 + \left(x - \frac{r}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \right) =$$

$$= 7,643 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} \quad (3.34)$$

На рисунке 3.13 представлено распространение магнитных силовых линий поля при работе колец Гельмгольца [31].

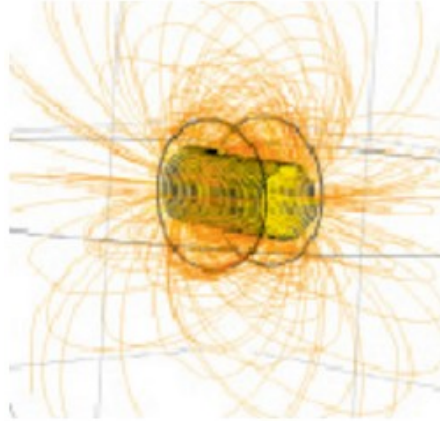


Рисунок 3.13 – Распространение магнитных линий кольца Гельмгольца

4 Конструкторская часть

Разрабатываемый приемный блок для устройства обнаружения БПЛА, должен соответствовать техническим, конструктивно-технологическим, эксплуатационным и экономическим требованиям, которые изложены в техническом задании.

К конструктивно-технологическим требованиям относятся: обеспечение базового принципа построения конструкции, технологичности, минимизация номенклатуры составных изделий.

К эксплуатационным требованиям относятся: простота эксплуатации и обслуживания, массогабаритные показатели устройства, надежность, ремонтпригодность и т.п.

4.1 Проектирование печатных плат

На основе спроектированных схем, продемонстрированных в пункте 3, построены топологии печатных плат (ПП) усилителя первичного индукционного датчика и усилителя дифференциального.

Точность изготовления ПП зависит от комплекса технологических параметров и с практической точки зрения определяет основные параметры элементов ПП. В первую очередь это относится к минимальной ширине проводников, минимальному зазору между элементами проводящего рисунка (это все то, что на плате выполнено из металла) и к ряду других параметров.

В процессе конструирования печатной платы определяется: конфигурация функциональных узлов (ФУ), габаритные размеры, рациональное взаимное положение навесных элементов; осуществляется трассировка соединений, разработка и оформление чертежа печатной платы в соответствии с требованиями ЕСКД по ГОСТу 2.417-91 (КУДР.758741.001 усилитель первичный; КУДР.758741.002 усилитель дифференциальный).

Для проектирования печатной платы используется комплексная система автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронных средств – Altium Designer 17. Программа включает в себя работу с принципиальными схемами, создание и редактирование библиотек, трассировку печатных плат

(ПП), эмуляцию работы принципиальной схемы, просмотр и редактирование 3D-вида компонентов, добавление STEP-моделей на ПП.

В данной работе разработаны печатные узлы, в которых используется смешанный монтаж.

Первым этапом проектирования ПП создана интегрированная библиотека компонентов.

В интегрированной библиотеке представлены символьные изображения и конструкторско-технологические образы и проведена их взаимосвязь. Символьное изображение (файл .SchLib) представляет собой условно графическое обозначение (УГО) компонента и используется при создании принципиальной электрической схемы. Посадочные места (файл .PcbLib) содержат сведения о типе выводов (штыревые или планарные), конструктиве корпуса и его 3D-виде.

В библиотеке описан каждый тип компонента, т.е. для каждого элемента создано два файла: файл .SchLib и файл .PcbLib, далее после успешной компиляции проекта библиотеки получить готовую встраиваемую интегрированную библиотеку компонентов – файл .IntLib.

Создание интегрированной библиотеки компонентов включает три стадии:

- 1) создание УГО символа компонента в соответствии с ГОСТом;
- 2) создание посадочного места и корпуса радиоэлектронного компонента;
- 3) компиляция проекта библиотеки.

На рисунке 4.1 приведено создание графического обозначения операционного усилителя (ОУ) AD8671.

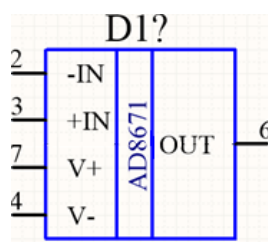


Рисунок 4.1 – Создание графического обозначения ОУ

На рисунке 4.2 продемонстрировано посадочное место для операционного усилителя AD8671.

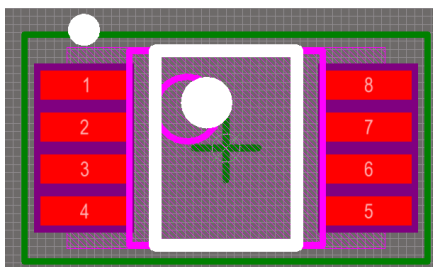


Рисунок 4.2 – Посадочное место ОУ

В интегрированной библиотеке были созданы следующие компоненты:

- 1) операционные усилители (ОУ): AD 8671, AD 8672 в корпусах MSOP8;
- 2) SMD резисторы типоразмера: 0603, 0805, 1206;
- 3) SMD конденсаторы типоразмера: 0603;
- 4) транзисторы npn и pnp в корпусе: SOT23;
- 5) разъемы: CWF2, CWF4;
- 6) контактная площадка, сделана под щуп осциллографа, предназначена для оценивания неисправностей элементов схемы, а также для просмотра амплитуды, напряжения и формы сигнала.

Топология печатной платы представляет собой наглядное изображение проектируемой платы.

Топология включает в себя: границы ПП, посадочные места, электрические соединения, печатные проводники, переходные отверстия (ПО) и крепежные, маркировку элементов и прочую информацию, необходимую для удобства проектирования, изготовления и эксплуатации изделия.

Большое влияние на электрические параметры схемы оказывает форма, длина и взаимное расположение проводников на плате. Увеличение длины в ряде случаев приводит к снижению быстродействия схемы. Следует также избегать проводников сложной формы, что может привести к возникновению паразитной индуктивности, которая вместе с монтажной ёмкостью влияет на чувствительность, помехоустойчивость и т.д.

Основные требования к созданию вариантов компоновок печатных плат:

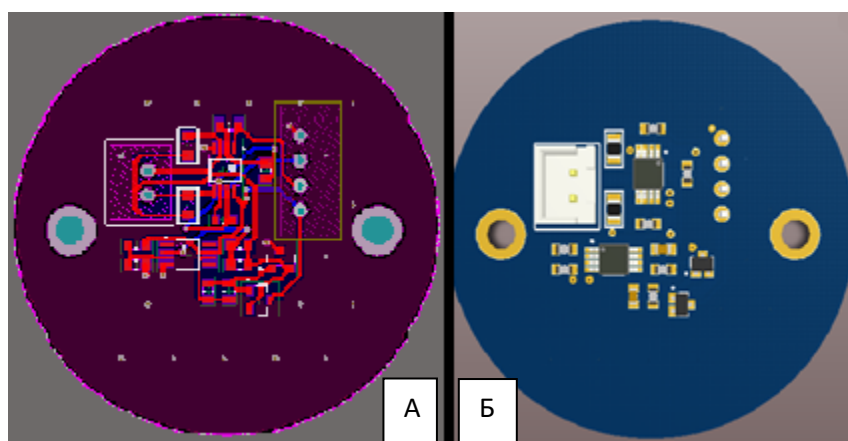
1) необходимо рационально размещать проводники на платах, избегая создания узких мест: протяженность проводника в узких местах следует по возможности ограничивать;

2) необходимо избегать острых углов и резких перегибов проводника; а также не выполнять проводники длиной более 70 мм;

3) основная ширина дорожек выбрана 0,4 мм; ширина дорожек в пробельных местах (выводы операционного усилителя) 0,3 мм.

Плата печатная усилителя первичного спроектирована по второму классу точности (ГОСТ Р53429-2009). Плата печатная усилителя дифференциального спроектирована по третьему классу точности, данный класс точности выбран, потому что в схеме используются микросхемы. Шаг координатной сетки составляет 1,25 мм, что обусловлено наличием разъемов и микросхем операционных усилителей, с расстоянием между выводами 0,25 мм. Конструкция печатных плат выбрана двухсторонней (ДПП), это обусловлено следующими преимуществами по сравнению с односторонней печатной платой (ОПП), ДПП позволяет: избавиться от перемычек; уменьшить габариты ПП за счет компоновки; снизить материалоемкость; повысить надежность; увеличить плотность монтажа.

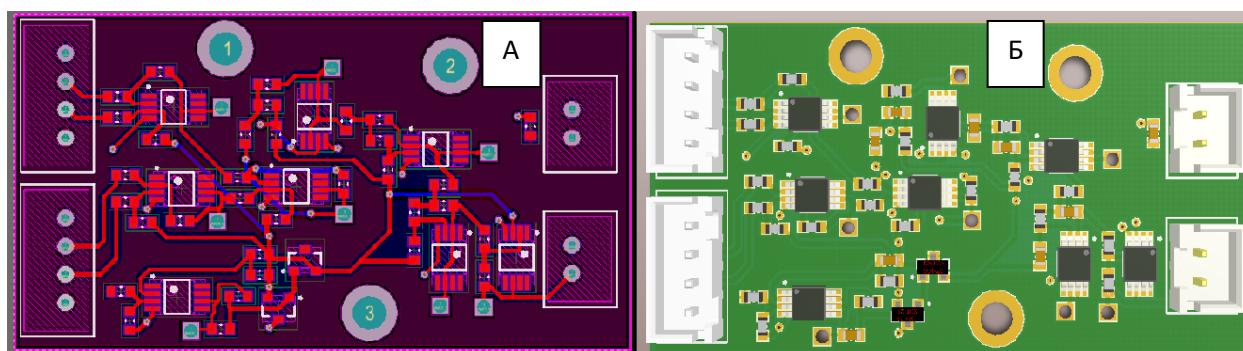
На рисунке 4.3 изображена топология печатной платы усилителя первичного индукционного датчика и ее 3D-вид. Размещение ЭРЭ и трассировка дорожек выполнена на двух сторонах печатного узла. Плата имеет форму окружности $\varnothing 42 \times 1,5$ мм, это обусловлено тем, что индукционный датчик имеет цилиндрическую форму. Верхний и нижний слои ПП залит земляным полигоном.



А – Топология ПП; Б – 3D-вид.

Рисунок 4.3 – Печатный узел усилителя первичного

На рисунке 4.4 изображена топология печатной платы дифференциального усилителя и ее 3D-вид. Размещение ЭРЭ и трассировка дорожек выполнена на двух сторонах печатного узла. Плата имеет прямоугольную форму $55 \times 30 \times 1,5$ мм. Верхний слой печатного узла залит слоем питания, это выполнено для удобства трассировки и сохранения минимального расстояния между ЭРЭ это необходимо для уменьшения наводок. Нижний слой залит земляным полигоном.



А – топология ПП; Б – 3D-вид.

Рисунок 4.4 – Печатный узел усилителя дифференциального

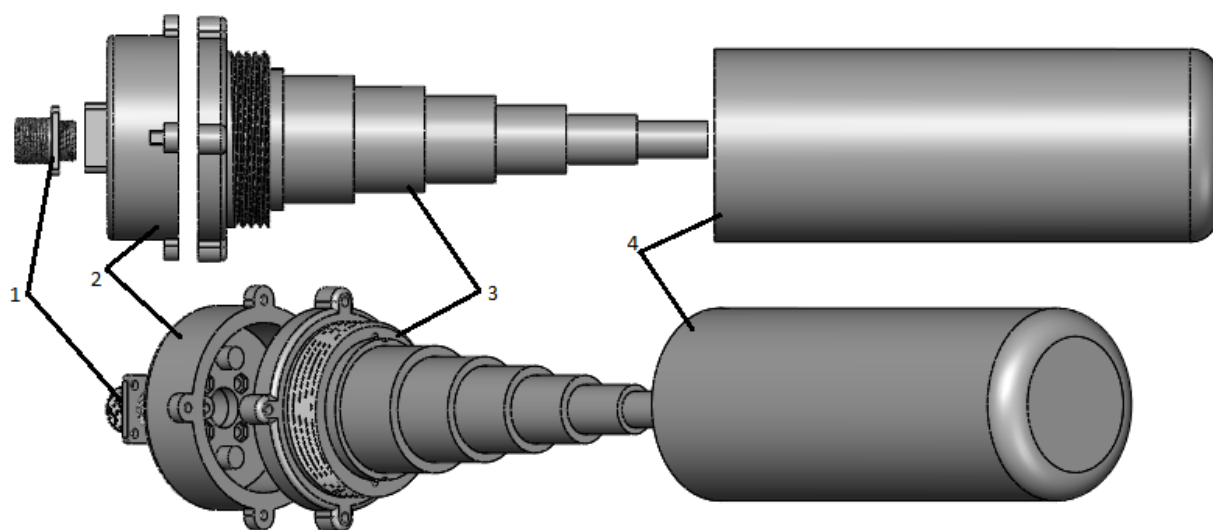
4.2 Проектирование конструкции изделия

При моделировании корпуса индукционного датчика, было принято решение разработать сменные чувствительные элементы, которые предполагают изменение диаграммы направленности за счет своих конструктивных свойств.

При проектировании датчика использовалась среда моделирования SOLIDWORKS 2018.

Для конструкции датчика был выбран стержневой ферритовый сердечник (магнитопровод) M2500HMC1 с начальной магнитной проницаемостью 2500. Магнитопровод необходим для улучшения чувствительности индукционного датчика.

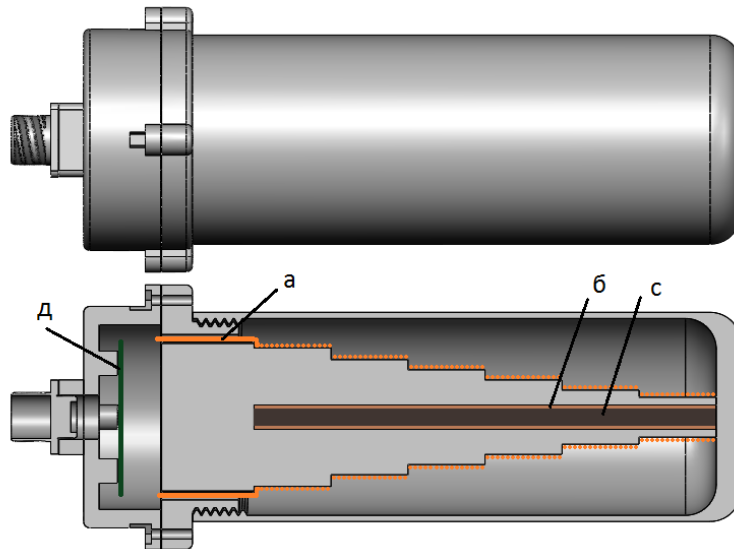
На рисунке 4.5 изображена модель корпуса индукционного датчика в разборе, в ней предусмотрена смена каркаса чувствительного элемента для изучения влияния его формы на диаграмму направленности.



1 – разъем 2РМТ22Б4ШЗВ1В; 2 – корпус печатного узла;
3 – каркас чувствительного элемента; 4 – корпус датчика.

Рисунок 4.5 – Модель индукционного датчика в разборе

Модель индукционного датчика в собранном виде изображена на рисунке 4.6.



а – медная обмотка; б – поролоновая прокладка;
с – ферритовый стрежень; д – печатная плата.

Рисунок 4.6 – Модель индукционного датчика в сборе

На рисунке 4.7 представлена цилиндрически укороченная форма чувствительного элемента.

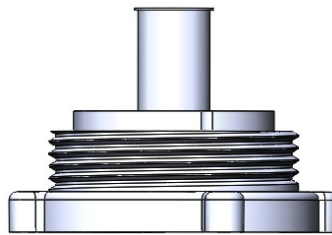


Рисунок 4.7 – Модель цилиндрически укороченного чувствительного элемента

На рисунке 4.8 представлен корпус печатного узла который будет соединен с чувствительным элементом четырьмя болтами и гайками М3, сверху будет прикручен корпус с шагом резьбы 3 мм, такой шаг должен успешно распечататься на 3D-принтере.

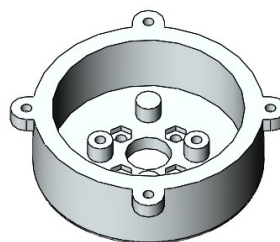


Рисунок 4.8 – Корпус печатного узла

Результат печати корпуса индукционного датчика можно увидеть на рисунке 4.9, полученная конструкция соответствует поставленным требованиям.

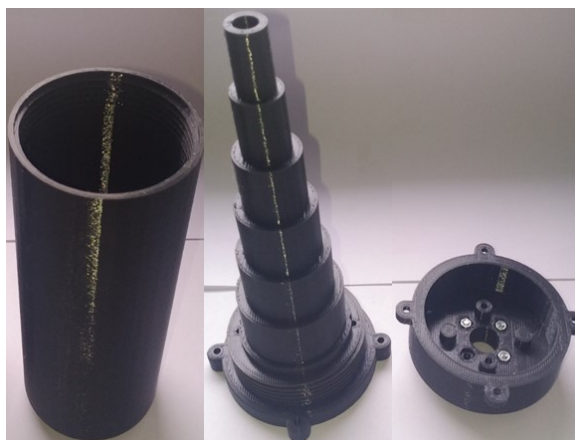


Рисунок 4.9 – Корпус индукционного датчика

На рисунке 4.10 представлена сборка индукционного датчика.

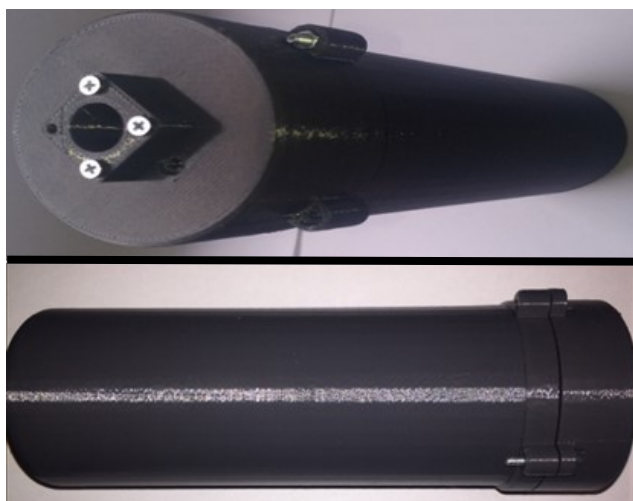


Рисунок 4.10 – Сборка корпуса индукционного датчика

Далее был смоделирован корпус блока усиления и фильтрации.

Для изучения влияния формы чувствительного элемента был спроектирован корпус для печатной платы усилителя.

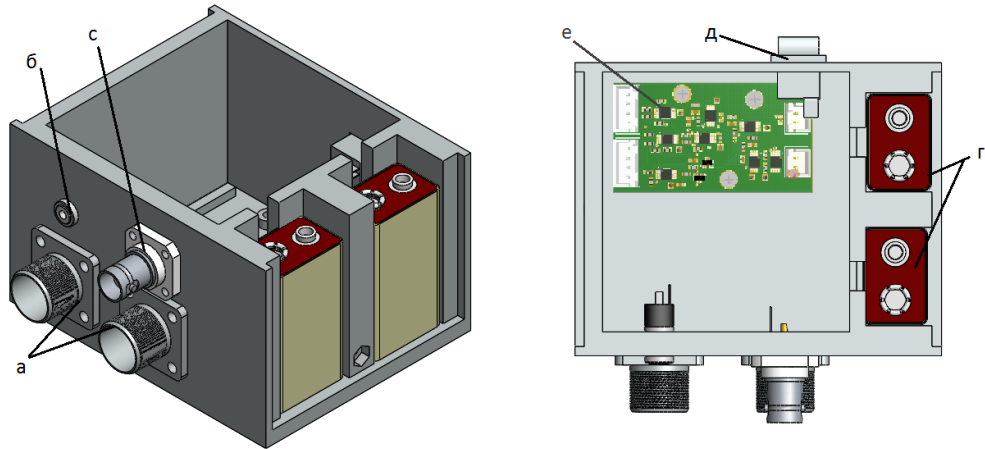
Модель корпуса усилителя дифференциального представлена на рисунке 4.11, в прообразе используются:

а) разъем 2PMT22Б4ШЗВ1В используется для подключения индукционных датчиков;

б) разъем AUX IN 3,5 мм используется для подключения усилителя к персональному компьютеру;

с) разъем BNC может быть подключён через коаксиальный кабель к осциллографу для проверки сигнала с усилителя;

д) кнопка питания для бля удобного пользования во время тестов.



а – разъем 2PMT22Б4Щ3В1В; б – разъем AUX IN 3,5 мм; с – разъем BNC; д – кнопка питания; г – батарейки крона; е – печатная плата усилителя.

Рисунок 4.11 – Корпус усилителя дифференциального

Крышка корпуса усилителя представлена на рисунке 4.12, крепится будет двумя болтами и гайками М3 по бокам.

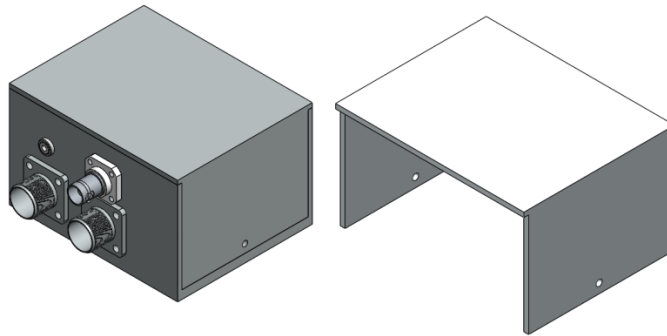


Рисунок 4.12 – Крышка корпуса

На рисунке 4.13 представлен результат печати корпуса усилителя на 3D- принтере.

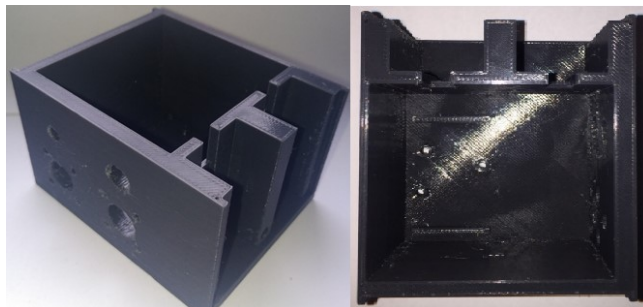


Рисунок 4.13 – Распечатанный корпус усилителя

Далее были разработаны следующие конструкторские документы:

- КУДР.745313.004 Кожух индукционного датчика;
- КУДР.745313.003 Корпус ступенчатого чувствительного элемента;
- КУДР.745313.002 Основание усилителя первичного;
- КУДР.745352.003 Основание усилителя дифференциального;
- КУДР.745352.002 Крышка корпуса усилителя дифференциального.

4.3 Расчеты надежности

Согласно ГОСТ 16325 – «Машины вычислительные электронные цифровые общего назначения. Общие технические требования» [32], показателями надежности электронной аппаратуры являются:

- интенсивность отказов λ ;
- среднее время безотказной работы T_0 .

Произведем расчет надежности для индукционного датчика.

Интенсивность отказов показывает, какая в среднем часть однотипных элементов выходит из строя за единицу времени и определяется на основании практических данных.

Среднее время безотказной работы – это средняя продолжительность работы изделия до отказа:

$$T_0 = (\sum_{i=1}^m N_i \cdot \lambda_i \cdot K)^{-1}, \quad (4.1)$$

где m – число типов элементов;

λ_i – интенсивность отказов элементов i -го типа;

N_i – количество однотипных элементов;

K – обобщенный эксплуатационный коэффициент, выбираемый в зависимости от вида РЭУ или условий его эксплуатации ($K=1$, т.к. эксплуатация в лабораторных условиях).

С применением формулы (4.1) проведен расчет надежности разрабатываемых блоков, при этом принято, что отказ одного элемента приведет к отказу всего блока.

Исходными данными для расчета служат справочные данные по интенсивности отказов элементов [33, 34].

Результаты расчета интенсивности отказа однотипных элементов для индукционного датчика приведены в таблице 4.1, для усилителя дифференциального в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Исходные данные и расчет интенсивности отказа однотипных элементов индукционного датчика

Тип элемента	N_i	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$	$N_i \cdot \lambda_i \cdot 10^{-6}$
Конденсаторы SMD	2	0,0479	0,0958
Микросхемы аналоговые	2	3,5	7
Резисторы SMD до 0,5 Вт	9	0,133	1,197
Транзисторы SMD	2	0,15	0,3
Разъёмы CWF2,4	2	0,5	1
Печатная плата	1	0,7	0,7

По формуле (4.1) было вычислено среднее время безотказной работы.

$$T_0 = (\sum_{i=1}^m N_i \cdot \lambda_i \cdot K)^{-1} = (0,0958 \cdot 10^{-6} + 7 \cdot 10^{-6} + 1,197 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-6} + 0,7 \cdot 10^{-6})^{-1} = 97155 \text{ ч.}$$

Таблица 4.2 – Исходные данные и расчет интенсивности отказа однотипных элементов корпуса усилителя дифференциального

Тип элемента	N_i	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$	$N_i \cdot \lambda_i \cdot 10^{-6}$
Конденсаторы SMD	9	0,0479	0,4311
Микросхемы аналоговые	8	3,5	28
Резисторы SMD до 0,5 Вт	24	0,133	3,192
Транзисторы SMD	2	0,15	0,3
Разъёмы CWF2,4	4	0,5	2
Печатная плата	1	0,7	0,7

По формуле (4.1) было вычислено среднее время безотказной работы.

$$T_0 = (\sum_{i=1}^m N_i \cdot \lambda_i \cdot K)^{-1} = (0,4311 \cdot 10^{-6} + 28 \cdot 10^{-6} + 3,192 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} + 0,7 \cdot 10^{-6})^{-1} = 28882 \text{ ч.}$$

Общее среднее время безотказной работы печатных узлов приемного блока составляет: $T_{0\text{общ}} = 97155 + 28882 = 126037$ ч. Это примерно 14 лет непрерывной работы.

5 Технологическая часть

Под печатным узлом понимается плата печатная со смонтированными на ней ЭРЭ.

Печатный узел относится к категории сборочных единиц, поэтому при формулировании требований к его технологичности необходимо учитывать:

- 1) возможность бездефектной сборки;
- 2) применение групповых высокопроизводительных способов пайки и контроля;
- 3) возможность точного базирования ПП и автоматической подачи ЭРЭ.

Технологический процесс сборки ПУ состоит из ряда более мелких технологических процессов и операций, выполняемых на производстве:

1. Технологический процесс подготовки ЭРЭ к монтажу: распаковка из первичной тары поставщика и контроль на механические повреждения.

2. Технологический процесс сборки и монтажа: установка ЭРЭ на ПП, пайка ЭРЭ, отмывка, сушка и контроль качества паяных соединений.

После изготовления ПУ направляют на слесарно-сборочные операции и установку в корпус.

Схемы сборочного состава усилителя первичного и усилителя дифференциального приведены в КУДР.411525.001 Д1, КУДР.411539.001 Д1.

Технологические схемы сборки усилителя первичного и усилителя дифференциального приведены в КУДР.411525.001 Д2, КУДР.411539.001 Д2.

5.1 Выбор и обоснование технологии изготовления печатных плат

В соответствии с ГОСТ Р53429-2009 – «Платы печатные. Основные параметры конструкции», плата печатная усилителя первичного спроектирована по второму классу точности, а ПП усилителя дифференциального спроектирована по третьему классу точности, данный класс точности выбран, потому что в схеме используются микросхемы. Шаг координатной сетки составляет 1,25 мм, что обусловлено наличием разъемов и микросхем операционных усилителей, с расстоянием между выводами 0,25 мм.

Класс точности ПП определяет минимально допустимые параметры ПП.

В соответствии с действующими стандартами, для изготовления ДПП был выбран комбинированно позитивный метод.

5.1.1 Выбор и обоснование материала платы печатной

В качестве материалов для изготовления ПП используются фольгированные и нефольгированные диэлектрики. Важнейшими требованиями к диэлектрическим материалам являются:

- 1) хорошие диэлектрические свойства;
- 2) высокая механическая прочность;
- 3) хорошая термостойкость;
- 4) хорошая химическая прочность;
- 5) незначительная зависимость электрических и механических свойств от климатических воздействий;
- 6) хорошая обрабатываемость;
- 7) низкая стоимость.

Наиболее широкое распространение при производстве ПП объектов радиоэлектронных средств специального назначения получил стеклотекстолит.

Характеристики стеклотекстолита приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики стеклотекстолита

Характеристика материала	Стекло-текстолит
Удельное поверхностное сопротивление, Ом, не менее	$1 \cdot 10^{12}$
Удельное объемное сопротивление, Ом·м, не менее	$1 \cdot 10^{10}$
Тангенс угла диэл. потерь при частоте 1 МГц, не более	0,025
Сопротивление изоляции, МОм	10000
Рабочая температура, °С	-60 до +105
Относит. влажность воздуха, % (при температуре, °С)	98 (40)
Стойкость к припою при 260 °С, секунд	10

Продолжение таблицы 5.1

Характеристика материала	Стекло-текстолит
Диэлектрическая проницаемость при частоте 1 МГц, не менее	6
Прочность сцепления фольги с диэлектриком, Н/3 мм	3,0

Для фольгирования диэлектрического основания можно использовать медную, алюминиевую или никелевую фольгу. Однако алюминиевая фольга уступает медной из-за плохой пайки, а никелевая из-за высокой стоимости. Следовательно, больше всего подходит медная фольга.

Медная фольга выпускается различной толщины. Стандартные толщины фольги наиболее широкого применения – (17,5; 35; 50; 70; 105) мкм. Была выбрана медная фольга толщиной 35 мкм.

Поскольку в качестве материала ПП был выбран стеклотекстолит, то в соответствии с ГОСТ Р 53429 – 2009 толщина ПП должна быть не менее (1,5–2,5) мм. Толщина ПП выбрана 1,5 мм.

В результате материалом для печатных узлов приемного блока был выбран стеклотекстолит фольгированный двусторонний СФ-2-35 ГОСТ 10316-78 толщиной 1,5 мм.

6 Технико-экономическое обоснование разработки

Расчет затрат на материалы и комплектующие приемного блока приведены в таблице 6.1, расчет проводился без учета сборки и монтажа.

Таблица 6.1 – Затраты на материалы и покупные изделия

Наименование	Стоимость, руб.	Количество, шт.	Итого, руб.
Контакты для батареек типа "Крона" с проводами KLS5-BC9V-02-150	16	1	16
Элемент питания алкалиновый VARTA LONGLIFE (Крона) 9В	300	1	300
Стержневой ферритовый сердечник M2500HMC1 C5x150	124	2	248
Корпуса приемного блока	400	1	400
Проволока медная электротехническая 0,09 ММ ТУ16-705.492-2005	310	1	310
Вилка 2РМТ22Б4ШЗВ1В	760	3	2280
Разъем AUX IN 3,5 мм	40	1	40
Разъем BNC	71	1	70
Кабель mini jack 3,5 мм	170	1	170
Вилка 2РМД18КПН18Г5В	610	2	1220
Кабель 4 pin 5 м	220	1	220
Кнопка питания	50	1	40
Провода с разъемом JST PH-2	40	3	120
Провода с разъемом JST PH-4	40	3	120
Винт М3х16 DIN 7985	3	2	6
Винт М3х20 DIN 7985	3	8	24
Винт М3х12 DIN 7985	3	8	24
Винт М3х10 DIN 7985	3	5	15
Гайка М3 DIN 934	2	23	46

Продолжение таблицы 6.1

Наименование	Стоимость , руб.	Количество , шт.	Итого, руб.
Плата печатная	150	2	300
Керамический чип конденсатор 0603 X7R 47 нФ 50В 10%	5	4	20
Керамический чип конденсатор 0,1 мкФ X7R 50В 10% 0603	10	5	50
Керамический чип конденсатор 0603 X7R 10 нФ 50В 10%	11	2	22
Микросхема AD8671ARMZ	208	9	1872
Микросхема AD8672ARMZ	197	1	197
Транзистор BC847	3	2	6
Транзистор BC857	3	2	6
Резистор чип 0603	2	31	62
Резистор чип 0805	3	2	6
Разъем CWF-2	7	3	21
Разъем CWF-4	7	3	21
Итого			8252

Расчет затрат на материалы составил 8252 рублей.

7 Сборка и тестирование приемного блока

7.1 Сборка и тестирование индукционного датчика

Сборка индукционного датчика происходила по следующему алгоритму:

- 1) монтаж печатного узла;
- 2) тестирование печатного узла;
- 3) намотка катушки индуктивности;
- 4) сборка и тестирование датчика.

7.1.1 Монтаж и тестирование печатного узла усилителя первичного

Первым этапом сборки индукционного датчика был монтаж печатного узла первичного усилителя.

На рисунке 7.1 продемонстрирован выполненный монтаж печатного узла усилителя первичного.



Рисунок 7.1 – Печатный узел индукционного датчика

Тестирование печатного узла осуществлялось следующим способом, на печатный узел подавалось напряжение порядка 9 В и на двух выходах печатного узла должно быть напряжение 4,5 В. Измерение напряжения проводилось с помощью осциллографа. Так же тестировался входной тракт усилительного каскада, куда подключается намотка сердечника, при касании пинов на экране осциллографа должно быть видно колебание шума.

7.1.2 Намотка ступенчатого чувствительного элемента

По выше изложенным расчетам в пункте 3.4 известно, какое количество витков нужно намотать на каждую ступень каркаса чувствительного элемента.

Факторы, влияющие на индуктивность катушки:

1) катушка с большим количеством витков имеет более высокую индуктивность по сравнению с катушкой с меньшим количеством витков;

2) более длинная катушка имеет меньшую индуктивность. Это связано с тем, что магнитное поле менее компактной катушки слабое, и оно не может хорошо концентрироваться в растянутой катушке;

3) катушка с большим диаметром имеет более высокую индуктивность;

4) для увеличения индуктивности применяют сердечник из материала с высокой магнитной проницаемостью. Сердечники с более высокой магнитной проницаемостью позволяют получить более высокую индуктивность. Сердечники, изготовленные из магнитной керамики – феррита, часто используются в катушках и трансформаторах различных электронных устройств, так как у них очень низкие потери на вихревые токи.

Чтобы практическая реализация была наиболее приближенной к расчетным параметрам, катушка наматывалась виток к витку.

На рисунке 7.2 продемонстрирован станок для намотки катушки. Так как чувствительный элемент изготовлен при помощи 3D печати, его корпус имеет волокнистую структуру и это мешает плотно намотать проволоку, поэтому корпус чувствительного элемента был обмотан молярным скотчем.

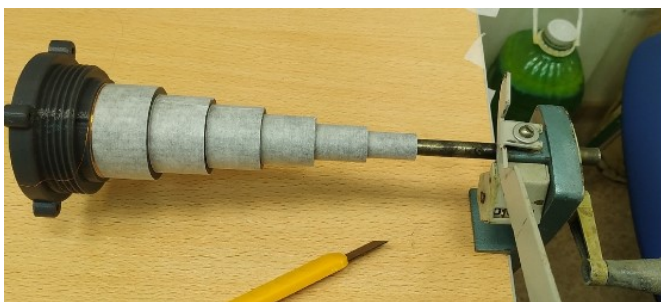


Рисунок 7.2 – Намотка чувствительного элемента

На рисунке 7.3 представлена намотанная ступенчатая катушка индуктивности.



Рисунок 7.3 – Чувствительный элемент

В таблице 7.1 представлен перечень количества витков намотанных на каждую ступень.

Таблица 7.1 – Перечень, количеств витков намотанных на каждую ступень чувствительного элемента

№ ступени	Количество витков
1	280
2	302
3	272
4	360
5	275
6	225

Выводы: Общее количество витков – 1715; индуктивность измеренная на измерителе иммитанса без сердечника составляет 14,48 мГн; индуктивность измеренная на измерителе иммитанса с сердечником составляет 109,8 мГн; общее сопротивление катушки 400 Ом. Погрешность в измерение индуктивности предположительна, связана с намоткой количества витков для каждой ступени. По сравнению с расчетами, проделанными в пункте 2.1, из этого можно сделать вывод, что рассчитанная индуктивность равна 78 мГн, а на практике получилась 109,8 мГн.

7.1.3 Сборка и тестирование ступенчатого индукционного датчика

После монтажа печатного узла и намотки чувствительного элемента, были обжаты провода для разъемов. Провода для двух выводного разъема были припаяны к чувствительному элементу, провода для четырех выводного разъема были припаяны к разъему, который подключен к усилителю.

На рисунке 7.4 представлена серия снимков индукционного датчика в разборе. Где А – корпус платы печатной усилителя первичного; Б – пины для подключение чувствительного элемента к плате усилителя; В – разъем для передачи данных на усилитель дифференциальный.

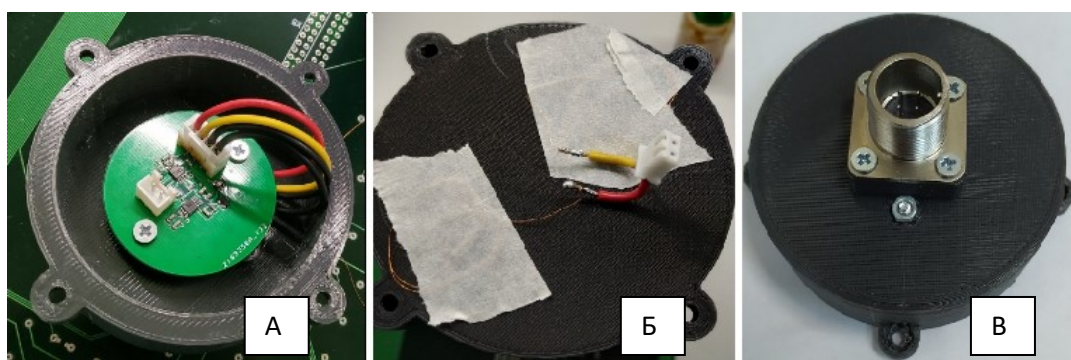


Рисунок 7.4 – Индукционный датчик в несобранном виде

На рисунке 7.5 представлен сердечник с наклеенным защитным покрытием. Покрытие наклеено для плотной фиксации сердечника в корпусе чувствительного элемента.



Рисунок 7.5 – Сердечник

На рисунке 7.6 представлен индукционным датчик в собранном виде.



Рисунок 7.6 – Индукционный датчик

Тестирование индукционного датчика проводилось с помощью кольца Гельмгольца, датчик был помещен в центр между двух колец, на кольцо с генератора подавался сигнал синусоиды с частотой в 5 кГц, индукционный датчик был подключен к осциллографу и запитан от лабораторного блока питания, и на экране осциллографа была видна синусоида. Данное тестирование было проделано и для датчика предыдущей версии с чувствительным элементом цилиндрической формы, чтобы сравнить результаты.

На рисунке 7.7 представлен индукционный датчик, находящийся в кольце Гельмгольца.

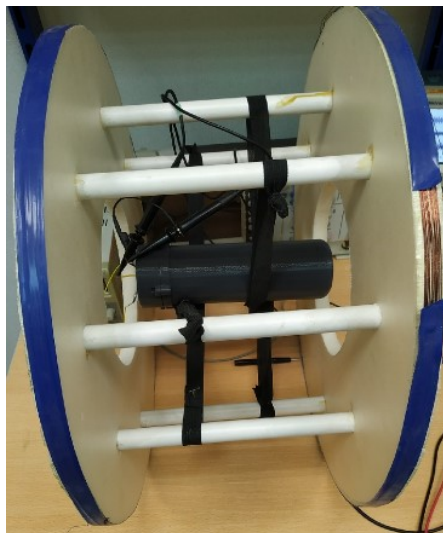


Рисунок 7.7 – Индукционный датчик в кольце Гельмгольца

На рисунке 7.8 представлены осциллограммы двух датчиков в кольце Гельмгольца, А – осциллограмма индукционного датчика с цилиндрическим

чувствительным элементом; Б – осциллограмма индукционного датчика со ступенчатым чувствительным элементом.

На осциллограммах видно три сигнала, это связано с тем, что выход дифференциальный (верхняя и нижняя синусоида) и осциллограф работает в математическом вычитании (синусоида по середине).

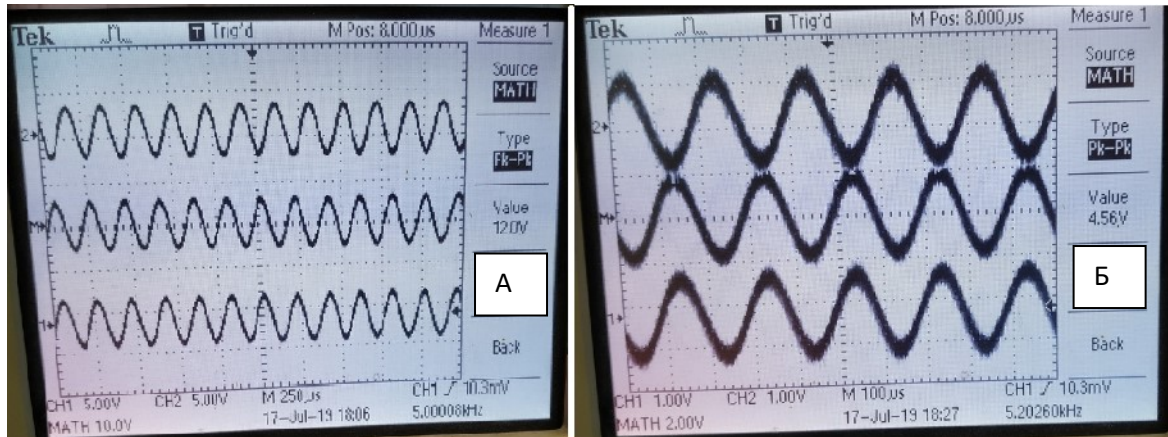


Рисунок 7.8 – Осциллограммы индукционных датчиков

После сравнения результатов, было принято решение усилить коэффициент усиления с 51 до 510.

На рисунке 7.9 представлена осциллограмма индукционного датчика со ступенчатым чувствительным элементом коэффициент усиления которого равен 510.

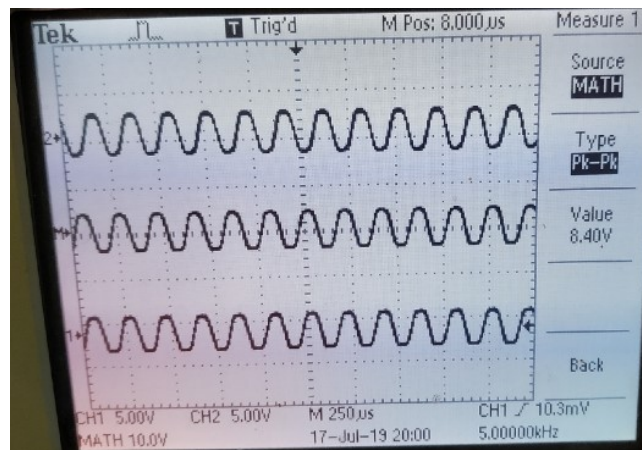


Рисунок 7.9 – Осциллограмма индукционного датчика

Из полученного результата видно, что схема первичного каскада с усилением в 510 раз почти полностью повторяет прежний индукционный датчик, который использовался в шахтных сооружениях.

7.1.4 Исследование ступенчатого индукционного датчика

После того как индукционный датчик был собран и протестирован, он был подключен к усилителю, для исследования макета индукционного датчика. Исследование проводилось в два этапа, в первом этапе было проведено исследование с индукционным датчиком со ступенчатым чувствительным элементом, во втором этапе с индукционным датчиком имеющего цилиндрическую форму чувствительного элемента.

На рисунке 7.10 представлена спектрограмма электромагнитного излучения двигателей БПЛА расстояние ступенчатого индукционного датчика, от объекта исследования составляет 30 см. Белыми стрелками на спектрограмме показана работа двигателей БПЛА.

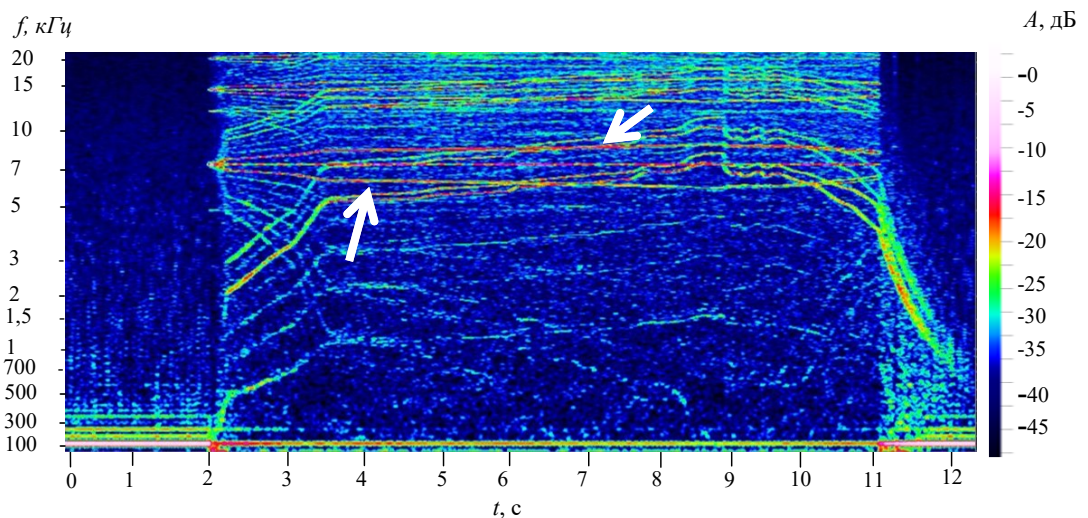


Рисунок 7.10 – Зарегистрированная спектрограмма ЭМИ БПЛА с использованием ступенчатого чувствительного элемента

На рисунке 7.11 представлена спектрограмма электромагнитного излучения двигателей БПЛА расстояние ступенчатого индукционного датчика, от объекта исследования постепенно увеличивается до 2 м. Белой стрелкой на спектрограмме показана работа двигателей БПЛА.

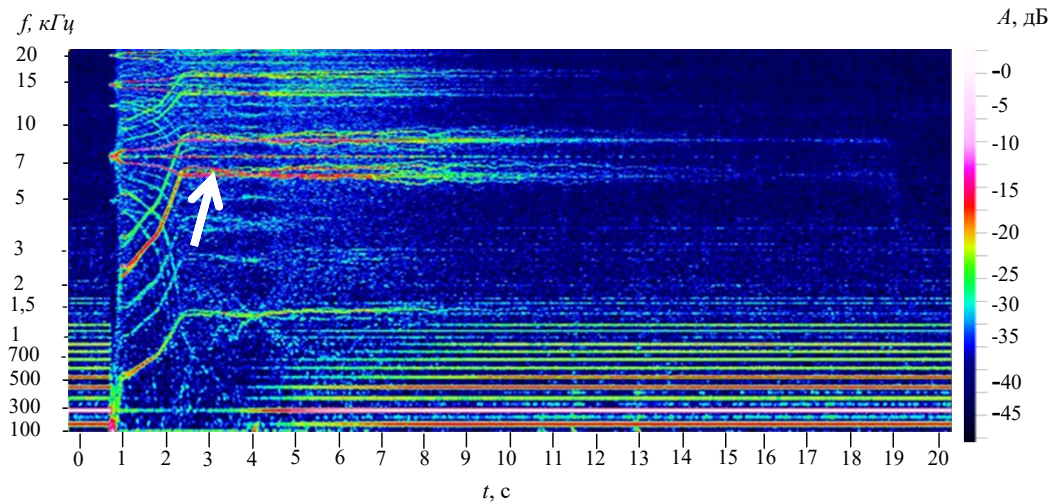


Рисунок 7.11 – Зарегистрированная спектрограмма ЭМИ БПЛА

На рисунке 7.12 представлена спектрограмма электромагнитного излучения двигателей БПЛА расстояние цилиндрического индукционного датчика, от объекта исследования постепенно удалялось до 2 м. Белой стрелкой на спектрограмме показана работа двигателей БПЛА.

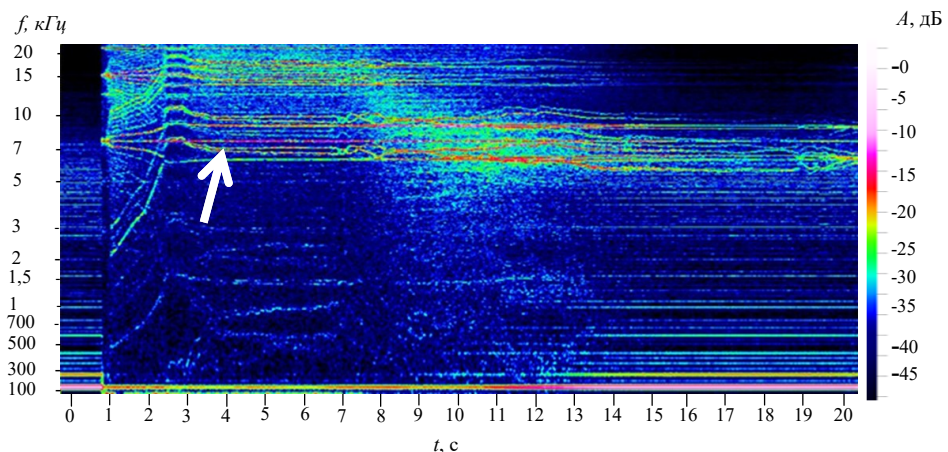


Рисунок 7.12 – Зарегистрированная спектрограмма ЭМИ БПЛА с использованием цилиндрического чувствительного элемента

Из спектрограмм видно, что индукционный датчик, имеющий цилиндрический чувствительный элемент, обладает большей чувствительностью, чем ступенчатый индукционный датчик.

На рисунке 7.13 представлена спектрограмма с использованием индукционного датчика с цилиндрическим чувствительным элементом, где БПЛА плавно удалялся на расстояние 2 м. Белой стрелкой на спектрограмме показана работа двигателей БПЛА.

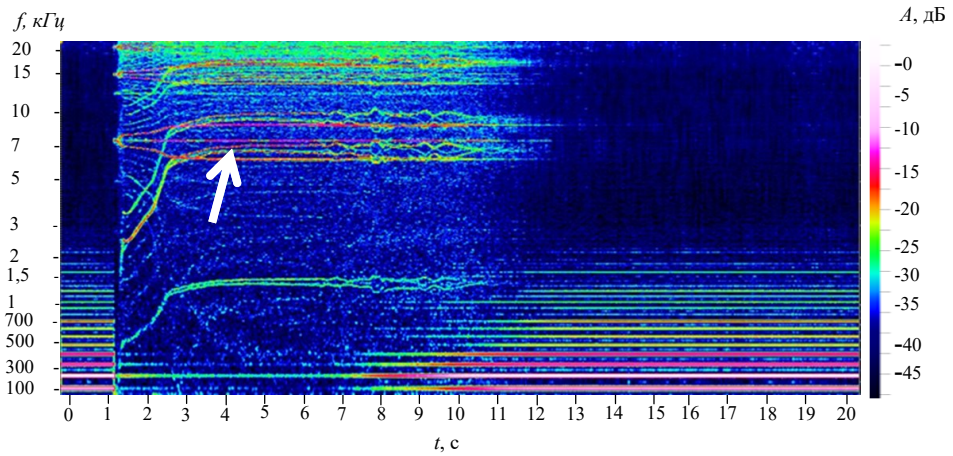


Рисунок 7.13 – Спектрограмма ЭМИ БПЛА с цилиндрическим чувствительным элементом

На рисунке 7.14 представлен спектральный анализ ступенчатого индукционного датчика, при удалении дрона на 2 м от датчика.

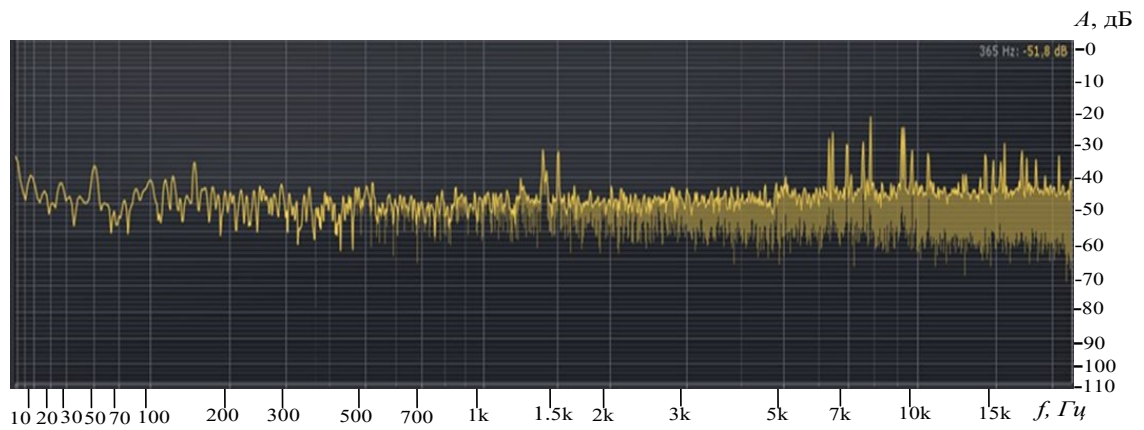


Рисунок 7.14 – Спектральный анализ ступенчатого ИД

На рисунке 7.15 представлен спектральный анализ индукционного датчика с цилиндрическим чувствительным элементом, при удалении дрона на 2 м от датчика.

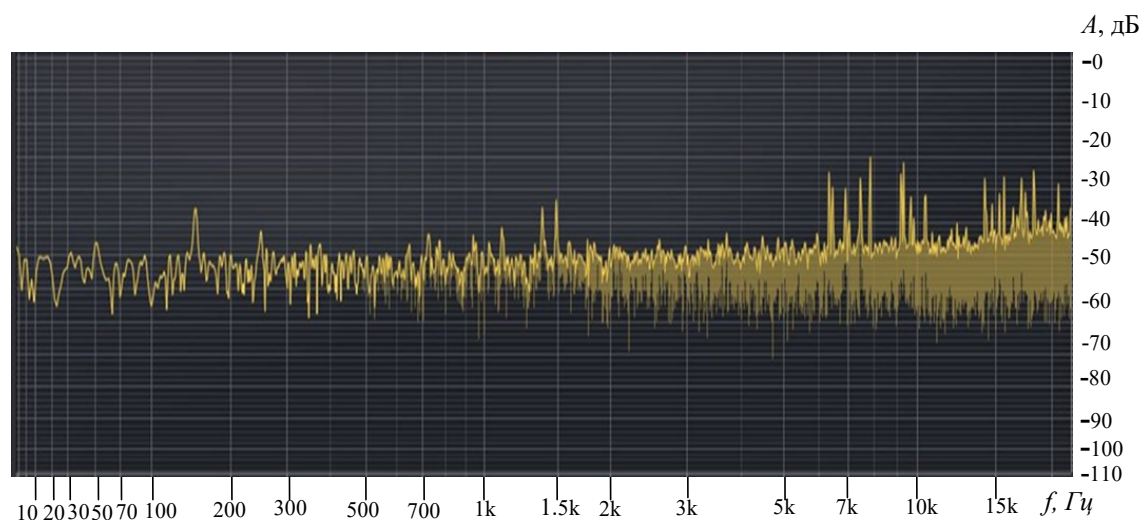


Рисунок 7.15 – Спектральный анализ цилиндрического ИД

Из рисунка 7.15 цилиндрического датчика видно, что спектр имеет наклон и входит в явление резонанса в районе 20–30 кГц, а по спектрограмме ступенчатого индукционного датчика (рисунок 7.14) резонанса не видно. Из этого можно сделать вывод, что резонанс ступенчатого индукционного датчика значительно выше по частоте, чем целевая полоса пропускания по сравнению с цилиндрическим датчиком, у ступенчатого датчика на частоте в 10 кГц явление резонанса не наблюдается. Физически явление резонанса не определялось.

7.2 Сборка и тестирование дифференциального усилителя

Сборка блока проводилась по следующему алгоритму:

1. Монтаж печатного узла;
2. Тестирование печатного узла;
3. Изготовление кабельных сборок для передачи сигнала и питания;
4. Крепление в корпус разъемов и их пайка.

На рисунке 7.16 представлен дифференциальный усилитель, который содержит в себе следующие виды разъемов: а) 2PMT22Б4ШЗВ1В используется для подключения индукционных датчиков; б) AUX IN 3,5 мм используется для подключения усилителя к персональному компьютеру; в) BNC предназначен для подключения усилителя к осциллографу для верификации сигнала.

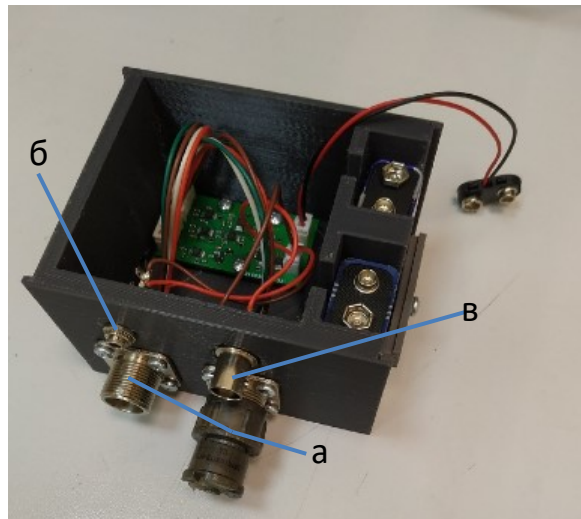


Рисунок 7.16 – Дифференциальный усилитель

Тестирование блока проводилось с использованием кольца Гельмгольца, в которое был помещен индукционный датчик, и генератора сигнала (рисунок 7.17), на генераторе – Tektronix AFG 3021B, выставлялась частота в 5 кГц и амплитуда в 1 В. В кольце Гельмгольца создается однородное магнитное поле заданной частоты и амплитуды, которое регистрируется индукционным датчиком, таким образом на осциллографе видно два сигнала: а) сигнал с генератора поданный на кольцо; б) сигнал с выхода блока усиления и фильтрации.

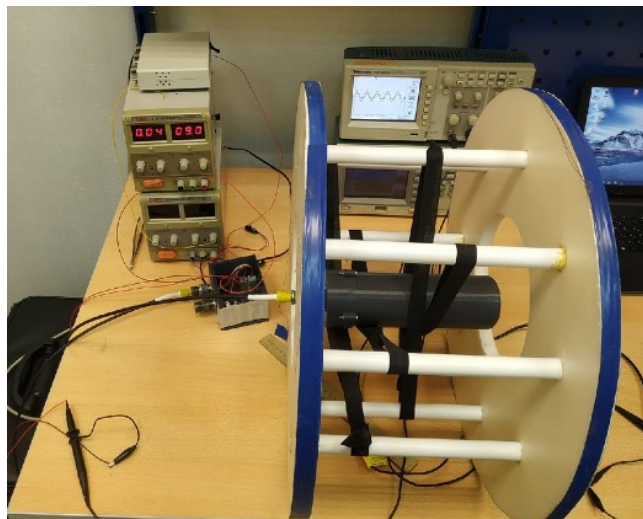


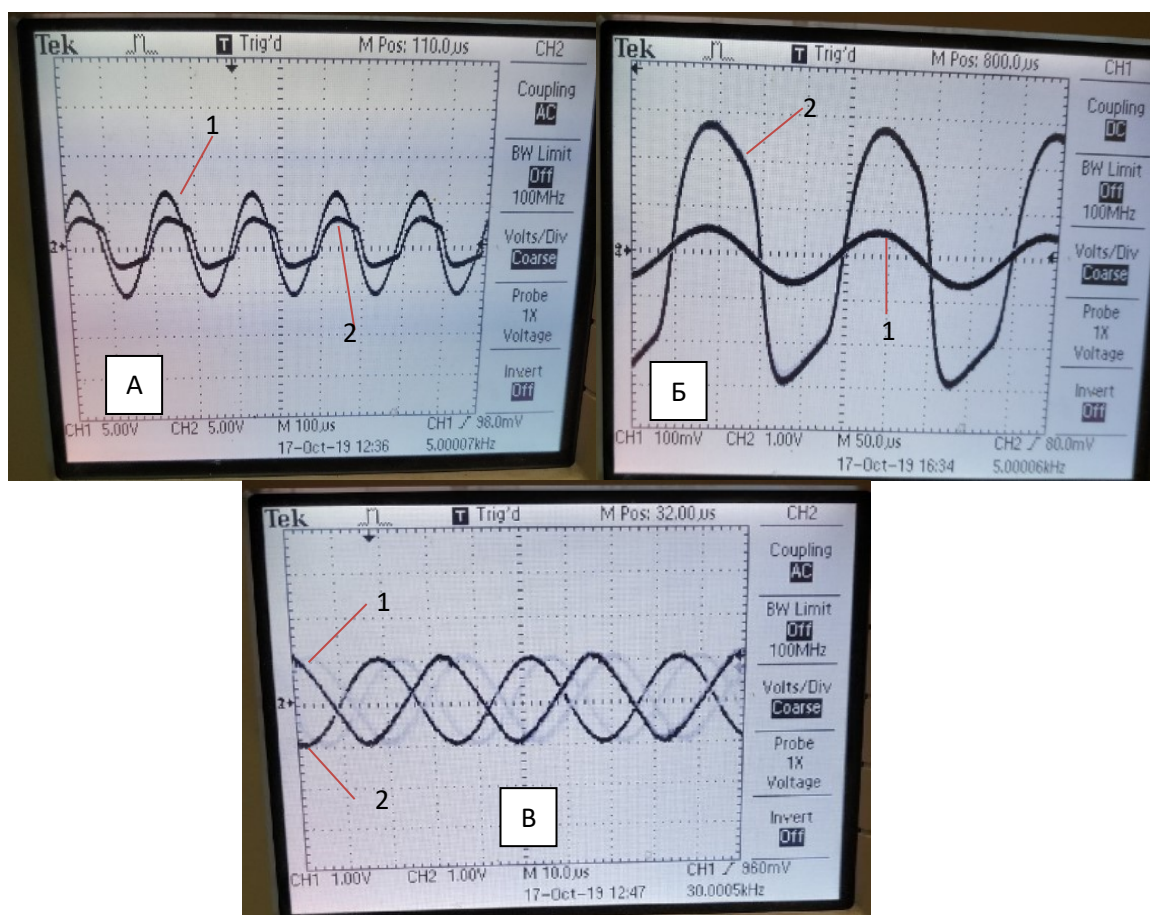
Рисунок 7.17 – Тестирование с использованием кольца Гельмгольца

На рисунке 7.18 представлены значения амплитуды и частоты, которые задавались в генераторе, для генерирования электромагнитного поля в кольце Гельмгольца.



Рисунок 7.18 – Задаваемые значения в генераторе сигнала

На рисунке 7.19 представлены измеренные осциллограммы. В результате изменения частоты и амплитуды сигнала на генераторе в кольце Гельмгольца возникали поля разной однородности, осциллограф одним щупом был подключен к кольцу с генератором, другим к выходу блока усиления и фильтрации сигнала, таким образом, на осциллограммах видно две синусоиды. Равномерная синусоида – сигнал с генератора, скошенная синусоида – сигнал с блока усиления и фильтрации. А – сигнал поданный на кольцо с амплитудой 100 мВ и частотой в 5 кГц; Б – сигнал с амплитудой 1 В и частотой в 5 кГц; С – сигнал поданный на кольцо с амплитудой 1 В и частотой 30 кГц.



1 – сигнал с генератора;

2 – сигнал с выхода блока усиления и фильтрации.

Рисунок 7.19 – Полученные осциллограммы выходного сигнала с блока усиления и фильтрации

Таким образом, выполнена проверка корректности прохождения сигнала через систему датчик – усилитель, это проводилось для оценки линейности передачи сигнала. Скосы синусоид, которые видны на выше представленных осциллограммах могли произойти в результате того, что усилитель находился в перегрузке из за выставленной на генераторе большой амплитуды, в печатном узле имеются фильтры высоких и низких частот, которые могли повлиять на сигнал с высокой амплитудой.

7.3 Намотка укороченного цилиндрического чувствительного элемента

По аналогии с намоткой ступенчатого чувствительного элемента, была выполнена намотка равномерного цилиндрического каркаса, количество витков составляет 1715 в 6 слоев, индуктивность катушки 100 мГн

(индуктивность ступенчатого чувствительного элемента равна 109 мГн, а количество витков составляет 1715), сопротивление катушки 300 Ом. Данная конструкция предназначена для исследования формы чувствительного элемента от количества витков.

На рисунке 7.20 представлена намотка катушки на каркас чувствительного элемента.

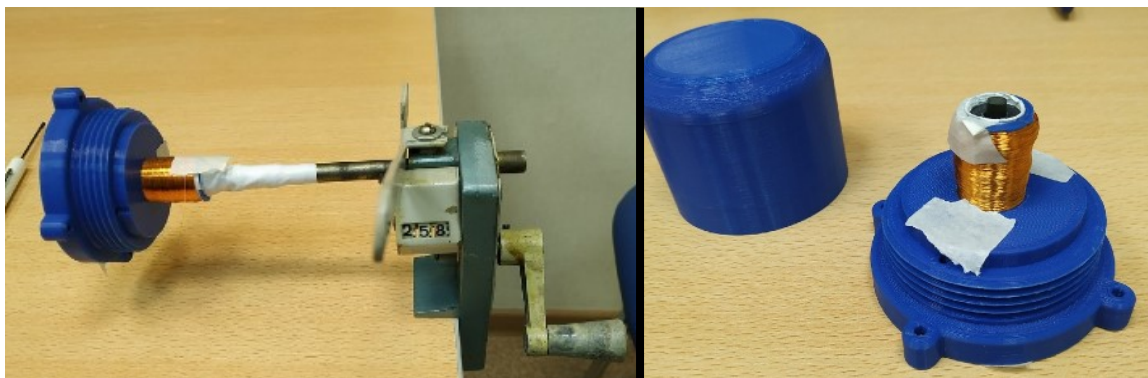


Рисунок 7.20 – Намотка катушки индуктивности

После сборки датчика было проведено тестирование (рисунок 7.21),

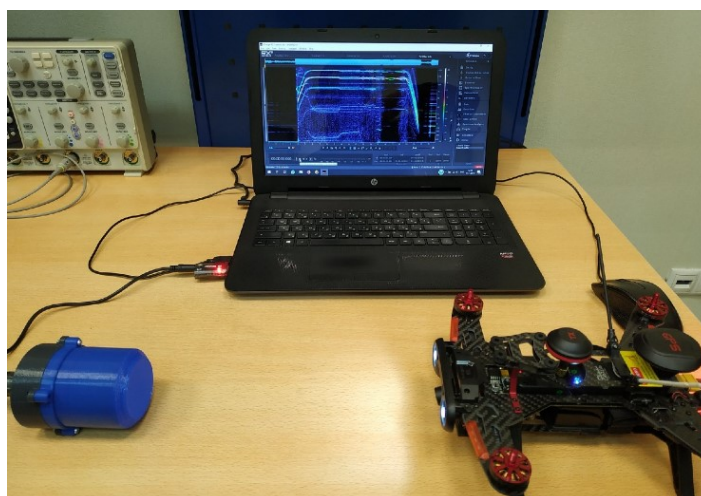


Рисунок 7.21 – Тестирование чувствительного элемента

7.4 Сравнительный анализ чувствительных элементов индукционного датчика

На рисунке 7.22 продемонстрированы конструкции чувствительных элементов индукционного датчика: а – цилиндрическая форма на 1000 витков с неравномерной медной намоткой; б – цилиндрическая укороченная форма

на 1715 витков в 6 слоев с равномерной медной намоткой; в – ступенчатая форма на 1715 витков [5].

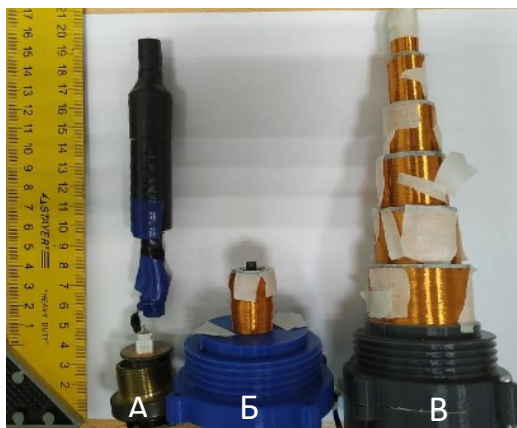


Рисунок 7.22 – Конструкции чувствительных элементов индукционного датчика

В ходе проведения исследований было выявлено, что промышленная частота 50 Гц вносит электромагнитные помехи на входной тракт усилительного каскада, это обусловлено работой люминесцентных ламп, электронно-вычислительных машин и т.д. Ранее было определено, что для уменьшения влияния помех эксперименты нужно проводить за чертой города, но в виду погодных условий исследование проводилось в лаборатории с выключенным светом в выходной день.

На рисунке 7.23 продемонстрирована экспериментальная установка, которая включает в себя: а – цилиндрический чувствительный элемент на 1000 витков с неравномерной медной намоткой; б – ступенчатый чувствительный элемент; в – цилиндрический чувствительный элемент на 1715 витков в 6 слоев с равномерной медной намоткой.

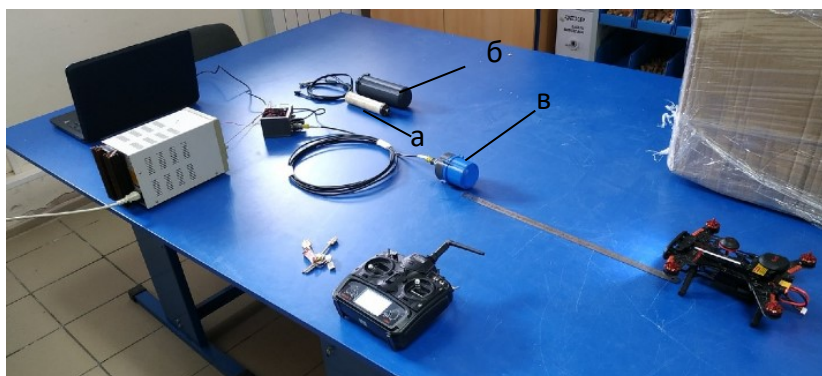


Рисунок 7.23 – Исследование электромагнитного излучения от БПЛА

На рисунке 7.24 представлена зарегистрированная спектрограмма электромагнитного излучения БПЛА с использованием трех форм чувствительных элементов: А – цилиндрическая; Б – ступенчатая; В – цилиндрическая укороченная. Объект исследования находился на близком расстоянии от индукционного датчика для более точного сравнительного анализа. Пунктиром обозначена спектральная область с наибольшей концентрацией спектральных составляющих присущих БПЛА.

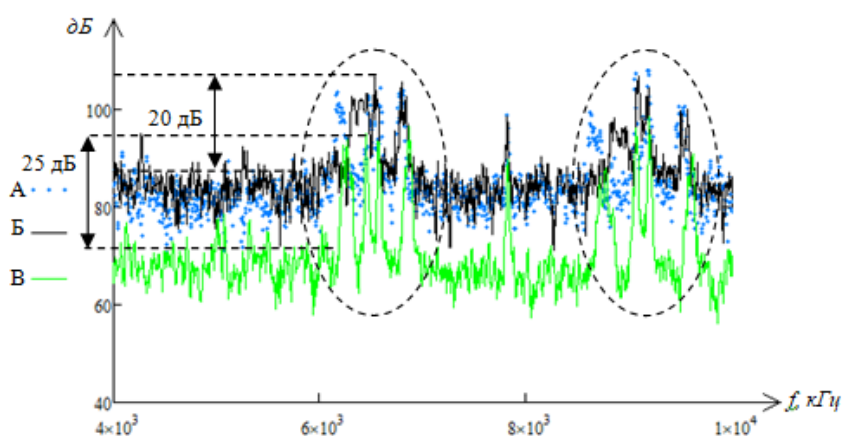


Рисунок 7.24 – Исследование ЭМИ от БПЛА

Вывод: у ступенчатого чувствительного элемента увеличенные диаметры катушек по сравнению с сердечником и разрывы в каркасе на практике вносят потери, уменьшая результирующую чувствительность. У укороченного цилиндрического датчика низкая чувствительность, но отношение сигнал/шум выше, чем у остальных датчиков. Возможно, это связано с самоэкранированием встречно направленными верхними слоями обмотки. Цилиндрический и ступенчатый чувствительный элемент по чувствительности сравнимы между собой. Оценка спектра показала, что соотношение сигнал/шум у укороченного чувствительного элемента больше и составляет порядка 25 дБ.

8 Заключение

В ходе выпускной квалификационной работы был разработан и изготовлен макет приемного блока для устройства обнаружения БПЛА по признаку собственного электромагнитного излучения. Были проведены испытания макета, которые показали, что данная разработка удовлетворяет требованиям ТЗ и подходит для решения поставленной задачи. Так же был разработан комплект конструкторской документации.

Списки используемых источников

1. An experimental detection of eletromagnetic radiation generated by unmanned aerial vehicles / A. Bombizov, S. Artishchev, A. Loschilov, N. Malyutin // AIP Conference Proceedings 1899, 060021 (2017); URL <https://doi.org/10.1063/1.5009892>.
2. Бомбизов А.А. Исследование электромагнитного и акустического излучения беспилотных летательных аппаратов в области низких частот / А.А. Бомбизов, А.Б. Петров, А.Г. Лоцилов // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники 2018, Том 21, No 1.– С. 57–61.
3. Петров А.Б. Разработка датчика первичной регистрации для задачи обнаружения беспилотного летательного аппарата / Петров А.Б., Захаров Р.А. // Материалы докладов VII Региональной научно-практической конференции «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 15 октября – 30 ноября 2018 г. – Томск: Из-во ТУСУРа, 2018. – С. 391 – 395.
4. Петров А.Б., Оценка конструкции ступенчатого индукционного датчика для задачи обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по признакам собственного электромагнитного излучения// Материалы докладов VIII Региональной научно-практической конференции «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 15 октября – 30 ноября 2019 г. – Томск: Из-во ТУСУРа, 2019.
5. Петров А.Б. Оценка чувствительности индукционного датчика для задачи обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) / А.Б. Петров // Научная сессия ТУСУР–2020: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–24 мая 2020 г.: в 4 частях. – Томск: 2020 – Ч.. – С. – .
6. Даник, Ю.Г. Анализ эффективности выявления тактичных беспилотных летательных аппаратов пассивными и активными способами сопряжения / Ю.Г. Даник, М.В. Бгайов // Проблемы создания испытания

применения и эксплуатации сложных информационных систем. – 2015. – С. 5–20.

7. Даник, Ю.Г. Анализ собственных излучений оборудования тактических беспилотных летательных аппаратов / Ю.Г. Даник, С.О. Дупелич // Проблемы создания испытания применения и эксплуатации сложных информационных систем. – 2015. – С. 5–20.

8. Hoffmann, F. Micro-Doppler based detection and tracking of UAVs with multistatic radar / F. Hoffmann, M. Ritchie, F. Fioranelli, A. Charlish, H. Griffiths // IEEE Radar Conf. (RadarConf) – 2016.

9. Harvey, B. Acoustic detection of a fixed-wing UAV/ B. Harvey, S. O'Young // Drones. – 2018. – N 4.

10. Kloet, N. Drone on: a preliminary investigation of the acoustic impact of unmanned aircraft systems (UAS) / N. Kloet et al. // 24th international congress on sound and vibration. – 2017.

11. Cabell, R. Measured noise from small unmanned aerial vehicles / R. Cabell, F. Grosveld, R. McSwain // Inter-noise and noise-con congress and conference proceedings. – 2016. – P. 345 – 354.

12. Milijakovic, D. Methods for attenuation of unmanned aerial vehicle noise / D. Milijakovic // International convention on information and communication technology electronics and microelectronics (MIPRO). – 2018. – P. 5.

13. Strauss, M. DREGON Dataset and methods for UAV-embedded sound source localization/ M. Strauss et al. // International conference on intelligent robots and systems (IROS). – 2018. – P. 8.

14. Филин, Е.Д. Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра / Е.Д. Филин, Р.В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – N 2. – С. 97–93.

15. Годунов, А.И. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами / А.И. Годунов, С.В. Шишков, Н.К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – N 2 (6).

16. Абдулов, Р. Н. Обеспечение визуальной скрытности разведывательных беспилотных летательных аппаратов нижнего эшелона от летательных средств верхнего эшелона в условиях гомогенного и гетерогенного загрязнения атмосферы аэрозолем / Р. Н. Абдулов, Н. А. Абдуллаев, Х. Г. Асадов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – N 4.

17. Barrett, R. UAV visual signature suppression via adaptive materials / R. Barrett, J. Melkert // Smart Structures and Materials 2005: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. – 2005. – P. 100–110.

18. Пашаев, Н.М. Тепловизуальный метод высотного обнаружения низколетящих дронов с электронно-цветовым камуфлированием поверхности / Н.М. Пашаев // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017.

19. Корепанов, С.Е. Алгоритмы обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием каналов технического зрения бортовых систем обработки информации и управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Корепанов Семен Евгеньевич. – М., 2016. – 238 с.

20. Шубин, Н. Ю. Нейросетевой алгоритм обнаружения малоразмерных объектов на облачных фонах / Н. Ю. Шубин, В.С. Муравьев, С.И. Муравьев. // Графикон' 2011 21-я международная конференция по компьютерной графике и зрению. – 2011. – С. 220 – 223.

21. Бархатов А.В. Пассивная когерентная радиолокация / А.В. Бархатов. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 163 с.

22. Еремин, Г.В. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО / Г.В. Еремин, А.Д. Гаврилов, И.И. Назарчук // Армейский вестник. – 2015.

23. Ripka, P. Advances in Magnetic Field Sensors // IEEE Sensors journal. – 2010. – Vol. 10, N 6. – P.1108 – 1116.

24. Щербаков Г.Н. Пути повышения помехоустойчивости магнитометрических средств поиска и их практическая реализация / Г.Н. Щербаков, М.А. Анцелевич, Д.Н. Удинцев // Специальная техника.– 2005.– № 3.– С.19 – 24.

25. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля / О. К. Хомерики. – М.: Энергоиздат, 1986. – 136 с.

26. Принцип действия датчиков магнитного поля – [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.devicesearch.ru.com/article/datchiki_magnitnogo_polu (дата обращения 25.05.2020).

27. Пейтон А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А. Дж. Пейтон, В. Волш. – М.: Бином, 1994 – 352 с.: ил. – ISBN 5-7503-0013-7. – С. 105–111.

28. Самоиндукция. Энергия магнитного поля – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://physics.ru/courses/op25part2/content/chapter1/section/paragraph21/theory.html#.XCNQMVwzaM8> (дата обращения: 13.12.2018).

29. Расчет индуктивности на ферритовом стержне – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://coil32.ru/man/ferrite-rod.html> (дата обращения: 26.06.2019).

30. Расчет индуктивности по заданным: количеству витков, диаметру каркаса и длине катушки – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/RU/calculator/coil-inductance> (дата обращения: 09.07.2019).

31. Расчет и моделирование магнитных полей, создаваемых системой «кольца Гельмгольца – соленоид» – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37081> (дата обращения: 11.07.2019).

32. ГОСТ 16325 – Машины вычислительные электронные цифровые общего назначения.

33. Интенсивность отказов элементной базы устройств.– [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://vunivere.ru/work64635> (дата обращения: 06.04.2020).

34. Начальные условия радиоэлементов.– [Электронный ресурс].– Режим доступа: https://studopedia.su/15_171833_raschet-pokazateley-intensivnosti-otkazov-elementnoy-bazi.html (дата обращения: 06.04.2020).

35. ОС ТУСУР 01-2013. Образовательный стандарт ВУЗа. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. – Томск: ТУСУР, 2013. – 57 с.