

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



ЗАХАРКИН Григорий Федорович

**РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО И  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ОХРАННОЙ  
СИГНАЛИЗАЦИИ С ВИНТОВЫМ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИМ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ**

05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации  
(информатизация и связь)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена в Учебно-научном центре «Информационная безопасность» Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,  
**Духан Евгений Изович**

Официальные оппоненты: **Кузяков Олег Николаевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, заведующий кафедрой кибернетических систем;

**Иванов Владимир Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, Войсковая часть 2337, г. Калининград, профессор кафедры № 35;

**Васьковский Владимир Олегович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, заведующий кафедрой магнетизма и магнитных наноматериалов;

Защита диссертации состоится «16» марта 2021 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 05.11.29 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1915>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Одной из важнейших задач государства в условиях проявления глобальных криминальных угроз по реализации обеспечения безопасности личности и общества является защита важных объектов от проникновения нарушителей. Наиболее эффективно решение данной задачи достигается при комплексном подходе, предусматривающем использование различных технических средств и физических принципов действия.

Важнейшим компонентом комплексной системы безопасности являются системы периметровой охранной сигнализации, служащие первым рубежом защиты охраняемых объектов от несанкционированного проникновения нарушителей. Данные системы в настоящее время классифицируются по физическому принципу действия на сейсмические, акустические, вибрационные, оптические, радиотехнические и комбинированные системы, по способу размещения чувствительного элемента — на маскируемые и заградительные, а по способу обнаружения — на активные и пассивные.

Для построения систем периметрового контроля обычно используются принципы активной СВЧ или оптической локации. В так называемых радиолучевых и радиоволновых системах для формирования требуемой зоны обнаружения применяются антенны, у которых диаграммы направленности ориентированы вдоль контролируемого рубежа. В активных радиотехнических системах весьма затруднено решение задачи идентификации объекта нарушения. По этой причине они имеют высокий уровень вероятности ложных тревог при пересечении зоны охраны птицами и животными, что является их основным недостатком.

Периметровые пассивные системы, работающие обычно в диапазонах низких, очень низких и крайне низких частот, свободны от указанного недостатка. Принцип действия этих систем основан на регистрации электромагнитного поля, вызванного объектом, обладающим магнитным моментом и движущимся в контролируемой зоне. Намагниченные предметы обычно имеются в амуниции потенциальных нарушителей, пересекающих зону контроля с диверсионными целями. Значительным магнитным моментом обладают также различные транспортные средства, используемые нарушителями для вторжения на объект.

В качестве чувствительного элемента, воспринимающего возникающее при движении намагниченного предмета электромагнитное поле, как правило, используются распределенные антенны индукционного типа. В теории систем безопасности антенны называются первичным магнитометрическим преобразователем (МП), а использующие их устройства — магнитометрическими системами обнаружения (МСО). В существующих изделиях МП выполнены на основе двух- и трехлинейных структур, которые предусматривают подземное размещение контуров большой площади с точной геометрией (рисунок 1).



Рисунок 1 — Монтаж двух- и трехлинейных магнитометрических антенн

Магнитометрические системы обнаружения по сравнению с другими системами обладают рядом уникальных свойств, что обуславливает их значительную востребованность практикой охраны протяженных рубежей объектов. Во-первых, пассивный принцип действия и возможность визуальной маскировки — скрытного размещения чувствительного элемента в грунте — делают маловероятным бесконтрольное преодоление зоны обнаружения подготовленным нарушителем. Во-вторых, МСО не реагируют на движение в зоне обнаружения животных, что весьма важно при организации рубежей охраны незаградительного типа в условиях биообмена (рисунок 2). Однако существующие изделия характеризуются большими массогабаритными параметрами, а также чрезвычайно высокими трудозатратами при монтаже и обслуживании чувствительного элемента и используются только для стационарных рубежей охраны.

В настоящее время востребованными являются периметровые быстроразвертываемые средства, предназначенные для оперативного прикрытия временных сигнализационных рубежей. Тактика применения средств предполагает их развертывание на пересеченной местности или в лесополосе. Большинство существующих быстроразвертываемых изделий имеют электроконтактный обрывной или двухпозиционный локационный принципы функционирования и либо работают в условиях прямой видимости, либо не обеспечивают требований по скрытности, либо характеризуются невысокими характеристиками обнаружения.

Перспективная идея реализации МСО предложена известным специалистом С.С. Звездинским, которая состоит в использовании винтового однолинейного магнитометрического преобразователя на основе полевого проводника. Исследования ученых из Калининградского пограничного института И.Н. Крюкова, В.А. Иванова, М.В. Бабешко, А.Н. Гомонова убедительно доказывают возможность создания системы обнаружения на основе винтового преобразователя с улучшенными эксплуатационными характеристиками и возможностью быстрого развертывания. Однако ранее использовавшееся математическое и программное обеспечение основывалось на моделях формирования информационных сигналов только для двух частных случаев движения объекта обнаружения относительно



Рисунок 2 — Причины срабатывания периметровых средств обнаружения

продольной оси магнитометрического преобразователя и имело ряд недостатков, в том числе не позволяло:

- выявлять возможную неравномерность продольной чувствительности системы обнаружения и разнообразие форм информационных сигналов;
- создавать репрезентативную исследовательскую базу данных информационных сигналов;
- моделировать работу блока принятия решений системы, базирующегося на современных алгоритмах нейронных сетей, и с учетом воздействия приборных шумов и шумов магнитного слоя Земли;
- определять границы применимости однолинейных МСО;
- разрабатывать рекомендации по построению и эксплуатации.

Таким образом, тема диссертации, посвященная разработке специального математического и программного обеспечения для систем охранной сигнализации с винтовым магнитометрическим преобразователем, находится в русле общих тенденций развития теории и техники комплексов физической защиты объектов и является актуальной. Результаты исследований представляют научный и практический интерес для построения периметровых сигнализационных систем нового типа с возможностью быстрого развертывания, разработка и внедрение которых повысит безопасность охраняемых объектов.

#### **Цель работы и задачи исследования**

Целью диссертационного исследования является разработка математического и программного обеспечения систем периметровой охранной сигнализации с винтовым магнитометрическим преобразователем, гарантирующего приемлемые тактико-технические характеристики систем, продольную неравномерность чувствительности, а также учитывающего возможность пересечения нарушителем оси МП под произвольным углом и с произвольной продольной координатой.

Для достижения цели исследования были решены следующие задачи исследования:

1. Системный анализ принципов построения, особенностей функционирования и границ применения магнитометрических систем обнаружений с распределенным чувствительным элементом.
2. Разработка обобщенной модели информационного сигнала, регистрируемого на выходе винтового магнитометрического преобразователя.
3. Исследование зависимостей количественных характеристик информационных сигналов на выходе винтового магнитометрического преобразователя от его конструктивных параметров, величины модуля и пространственной ориентации магнитного момента, а также траектории и скорости движения объекта обнаружения.
4. Синтез алгоритмов принятия решения об обнаружении объекта и оценка потенциальных характеристик обнаружения МСО на основе первичного винтового преобразователя при использовании амплитудного порогового обнаружителя и искусственных нейронных сетей.

**Объектом исследования** являются периметровые магнитометрические системы обнаружения.

**Предметом исследования** являются математическое и программное обеспечение систем периметровой охранной сигнализации с винтовым магнитометрическим преобразователем.

При проведении исследований были приняты следующие **ограничения и допущения**:

- за рамки исследования выведены активные изделия и МСО на основе сосредоточенных чувствительных элементов, а также двух- и трехлинейные магнитометрические преобразователи;
- объект обнаружения представляется одиночным магнитным диполем, характеризующим «полезные» магнитные свойства объекта на расстояниях, превышающих его линейные размеры;
- рассматривается прямолинейное равномерное движение нарушителя (объекта обнаружения), пересекающего зону обнаружения;
- влияние внешней среды на характеристики информационного сигнала считается незначительным.

#### **Методология и методы исследования**

Методами проведения диссертационного исследования являются системный анализ, математическое моделирование и статистический анализ сигналов на выходе винтового магнитометрического преобразователя. Теоретической базой исследования служили положения статистической радиотехники, электродинамики, теории обнаружения и искусственных нейронных сетей. Анализ полученных результатов выполнен с применением численных методов и пакетов программ в среде MathCAD и LabView. Проведены натурные эксперименты для проверки адекватности разработанной математической модели.

#### **Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Разработанная обобщенная математическая модель информационного сигнала, регистрируемого на выходе распределенного винтового магнитометрического преобразователя, обеспечивает расчет информационных сигналов для произвольных значений продольной координаты и угла наклона траектории движения объекта обнаружения к продольной оси преобразователя.

2. Алгоритм формирования решения об обнаружении, основанный на теории нейронных сетей, обеспечивает уменьшение вероятности ложной тревоги в 7,5 раз по сравнению с классическим амплитудным пороговым обнаружителем.

3. Обоснованные рекомендации по построению МСО с винтовым магнитометрическим преобразователем обеспечивают вероятности тревоги  $P_{ЛТ} = 5,9 \cdot 10^{-4}$  при вероятности правильного обнаружения  $P_{ОБН} = 0,95$ .

**Достоверность защищаемых результатов и положений исследований** обусловлена корректным применением методов математического моделирования, положений электродинамики, статистической радиотехники, теории обнаружения, искусственных нейронных сетей; проведением в достаточном количестве натурных измерений сигналов на выходе винтового магнитометрического преобразователя; всесторонней проверкой адекватности полученных математических моделей сигналов; проверкой на сходимость с известными результатами; значительным объемом компьютерных экспериментов; масштабной апробацией результатов диссертационной работы.

### **Научная новизна исследования**

Новизна защищаемых результатов и положений диссертации состоит в следующем:

- разработана обобщенная математическая модель формирования информационного сигнала, регистрируемого на выходе винтового магнитометрического преобразователя, отличающаяся от ранее известных тем, что учитывает произвольные значения таких значимых параметров движения объекта обнаружения, как начальная продольная координата и угол наклона траектории движения к продольной оси преобразователя;
- обоснована целесообразность применения многоконтурной структуры первичного преобразователя для повышения тактико-технических характеристик и снижения продольной неравномерности чувствительности МСО;
- исследовано влияние параметров траектории движения и ориентации магнитного момента объекта обнаружения, на уровень информационного сигнала, выработаны рекомендации по тактике применения МСО;
- осуществлен синтез алгоритма работы блока принятия решения на основе нейронных сетей, характеризующийся повышенными характеристиками обнаружения по сравнению с классической схемой амплитудного порогового обнаружителя в условиях априорной неопределенности.

**Теоретическая значимость защищаемых результатов и положений диссертации** состоит в развитии научно-методического аппарата исследования системы обнаружения в части МСО с винтовым магнитометрическим преобразователем, получены математические выражения, позволяющие осуществлять расчет основных характеристик новой периметровой системы обнаружения; разработаны рекомендации по выбору параметров тракта обработки сигналов, необходимых для достижения требуемых тактико-технических характеристик. Данные результаты необходимы для определения потенциальных возможностей МСО нового типа при ее эксплуатации, что является научным вкладом в прикладную область применения пассивных средств систем безопасности.

**Практическая значимость диссертации** заключается в следующем:

- разработан и создан программно-аппаратный комплекс для анализа информативных и селективных параметров сигналов, исследования потенциальных характеристик обнаружения МСО на базе сформированного банка расчетных реализаций сигналов. Комплекс позволяет осуществлять «сквозное» проектирование системы обнаружения, существенно (до 3 раз по экспертной оценке) снижая при этом объем продолжительных и дорогостоящих экспериментов;
- выработаны рекомендации по конструкции и размещению распределенного винтового чувствительного элемента МСО. Определен оптимальный размер базы преобразователя ( $b = 1,5 \cdot h$ ). При прохождении объекта обнаружения под острым углом к продольной оси преобразователя существенно снижается продольная неравномерность чувствительности и увеличивается амплитуда сигнала на выходе приемного устройства более чем в 2 раза (для угла  $15^\circ$ );
- определены требования к параметрам трактов приема обработки сигналов в предложенной МСО. Рекомендовано реализовать два отдельных канала обработки сигналов: с узкой полосой пропускания частотного фильтра (0,3–3 Гц) и

пониженным порогом чувствительности — для обнаружения пеших нарушителей, с широкой полосой пропускания частотного фильтра (3–30 Гц) и повышенным порогом чувствительности — для обнаружения транспортных средств;

- синтезированы алгоритмы работы блока принятия решения с использованием амплитудных пороговых схем и искусственных нейронных сетей, проведен сравнительный анализ потенциальных характеристик, показавший, что вероятность ложной тревоги при использовании рекуррентной нейронной сети реального времени ( $P_{ЛТ} = 5,9 \cdot 10^{-4}$ ) в 75 раз меньше, чем при использовании классического амплитудного порогового алгоритма ( $P_{ЛТ} = 0,045$ );

- определены типы объектов обнаружения, по которым МСО на основе винтового преобразователя может эффективно работать.

### **Внедрение результатов диссертации и рекомендации по их дальнейшему использованию**

Основные результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, были реализованы:

- в проектах АО «НПК «Дедал» — ведущего российского производителя средств обнаружений;

- в учебном процессе Института информационных технологий и радиоэлектроники-РТФ УрФУ при разработке методического и лабораторного обеспечения дисциплины «Радиоэлектронные системы защиты объектов» и «Технические средства охраны»;

- при выполнении НИОКР №9153р/15047 от 06.05.2011 «Исследование чувствительных элементов для магнитометрических средств обнаружения с точечной и протяженной контролируруемыми зонами».

### **Апробация результатов работы и публикации**

Основные результаты диссертационных исследований докладывались и получили положительную оценку на научно–практических конференциях разного уровня, в том числе:

- IX, XI Всероссийские научно-практические конференции «Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов»: — г. Заречный Пензенской области, 2012, 2016;

- V, VI Всероссийские научные конференции «Территориально распределенные системы охраны», г. Калининград, КПИ, 2012, 2013;

- XII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Безопасность информационного пространства», г. Екатеринбург, УрФУ, 2013 г.;

- XI Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», г. Москва, МТУСИ, 2017;

- Международная конференция Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), г. Екатеринбург, 2020.

Основные принципы создания магнитометрической системы обнаружения нового типа были отмечены в финале конкурса инновационных идей «Минута технославы» в рамках международной выставки «Иннопром-2012», г. Екатеринбург, 2012.

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 научные статьи в изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, из них одна статья в издании, индексируемом в международной цитатно-аналитической базе Scopus. По материалам диссертации выполнена научно-исследовательская опытно-конструкторская работа.

### **Личный вклад диссертанта**

Основные положения и результаты исследований, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно. В работы, выполненные в соавторстве, диссертантом внесен основной вклад, касающийся решения поставленных руководителем научных задач.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (81 наименование) и 6 приложений. Последовательность изложения материала определялась логикой и порядком решения научных задач, а также достижением поставленных целей. Текст диссертации содержит 162 страницы, 65 рисунков и 12 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, указаны применяемые методы исследований, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту. Аргументирована достоверность исследований, отмечена практическая значимость работы, указан личный вклад автора, приведена структура диссертации.

**В первой главе** рассмотрены особенности построения периметровых магнитометрических систем обнаружения, описаны недостатки двух- и трехлинейных структур; показано, что предпочтительными для оперативной защиты объектов являются изделия на основе однолинейных преобразователей.

В качестве первичного преобразователя для построения быстроразвертываемого МСО рассмотрен витой проводник (витая пара). С точки зрения формирования сигнала преобразователь представляет собой двухпроводной контур, равномерно скрученный вдоль оси распространения с шагом  $2b$ . Малая ширина контура  $a$  позволяет считать преобразователь однолинейным (рисунок 3).

Проанализированы базовые модели информационного сигнала на выходе МП для двух простых случаев траектории движения объекта обнаружения (рисунок 4), полученные С.С. Звежинским, М.В. Бабешко.

*Первая базовая модель* соответствует траектории движения цели перпендикулярной продольной оси преобразователя через точку, в которой плоскость ближайшего элемента контура  $dS$  расположена горизонтально ( $\varphi = 0^\circ$ ). Уравнение для расчета информационного сигнала для первой базовой модели имеет вид:

$$U_1 \cong 6200 \frac{a \cdot v}{b^{5/2} h^{1/2}} \frac{\exp(-\gamma)}{(1 + \chi^2)^{7/4}} \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} M_z \chi \left(1 + \frac{27}{8\gamma} - \frac{\chi^2}{\gamma}\right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} M_x \left(\chi^2 \left(1 + \frac{27}{8\gamma}\right) - \frac{1}{\gamma}\right) + M_y \left(\sqrt{1 + \chi^2} \cdot \chi^2 \left(1 + \frac{7}{8\gamma}\right) - \frac{b}{\pi h} \left(1 + \frac{3}{8\gamma}\right)\right) \right], \quad (1)$$

где  $v$  — скорость движения ОО,  $h$  — высота движения магнитного диполя  $M$  с проекциями на оси  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $a$ ,  $b$  — конструктивные параметры МП, вспомогательные коэффициенты  $\gamma$  и  $\chi$  равны:

$$\gamma = \frac{\pi \cdot h \cdot \sqrt{1 + \chi^2}}{b}; \quad \chi = \frac{x}{h}.$$

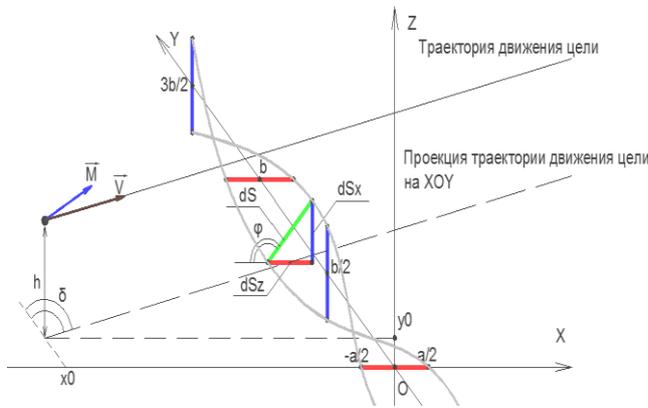


Рисунок 3 — Движение нарушителя по произвольной прямолинейной траектории

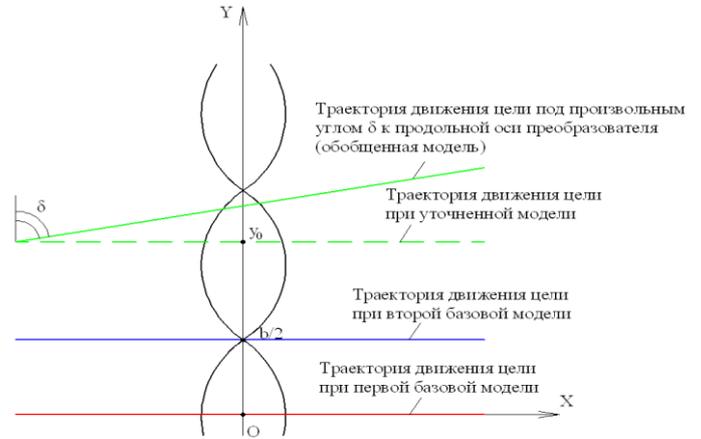


Рисунок 4 — «Базовые» траектории движения объекта обнаружения

*Вторая базовая модель* соответствует траектории движения объекта обнаружения, проходящей перпендикулярно продольной оси МП через точку, в которой плоскость ближайшего элемента контура  $dS$  расположена вертикально ( $\varphi = 90^\circ$ ). Уравнение для расчета информационного сигнала для второй базовой модели имеет вид:

$$U_2 \cong 6200 \frac{a \cdot v \cdot \exp(-\gamma)}{b^{5/2} h^{1/2} (1 + \chi^2)^{7/4}} \times \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} M_z \left( \chi^2 \left( 1 + \frac{27}{8\gamma} \right) - \frac{1}{\gamma} \right) + \frac{1}{\sqrt{2}} M_x \chi \left( \chi^2 \left( 1 + \frac{11}{8\gamma} \right) - \frac{3}{\gamma} \right) + M_y \chi \left( \sqrt{1 + \chi^2} + \frac{5b}{2\pi h} \left( 1 - \frac{1}{\gamma} \right) \right) \right]. \quad (2)$$

Проведенный в первой главе анализ предметной области показал, во-первых, что базовые модели не применимы при исследовании сигналов на выходе ЧЭ при пересечении нарушителем зоны обнаружения по произвольной прямолинейной траектории и не позволяют подробно исследовать характеристики информационных сигналов (ИС), судить об их форме и амплитуде, о продольной неравномерности чувствительности системы обнаружения, а также разработать и исследовать алгоритмы обработки сигналов приемного устройства МСО, во-вторых, позволил сформулировать задачи исследования.

**Во второй главе** описана разработанная уточненная модель информационного сигнала для любой (с точки зрения начальной продольной координаты) прямолинейной траектории объекта обнаружения, перпендикулярной оси преобразователя (рисунок 3), позволившая выявить неравномерность чувствительности системы обнаружения и зависимость формы сигнала от продольной координаты цели. Данный факт дал основания предположить, что существенное влияние на форму и уровень информационного сигнала оказывает угол наклона траектории

движения ОО к продольной оси преобразователя. Разработана обобщенная модель информационного сигнала для прямолинейной траектории, расположенной под произвольным углом к продольной оси МП. В соответствии с предложенной моделью напряжение на выходе преобразователя описывается выражением:

$$U(x) = W \cdot \sin \delta \cdot [U_I(x) \cdot \cos \varphi(x) + U_{II}(x) \cdot \sin \varphi(x)] + \\ + a \cdot W \cdot V \cdot \sin \delta \cdot \frac{\pi}{b \cdot \operatorname{tg} \delta} \cdot [(Ax_I + Az_I) \cdot \sin \varphi(x) + (Ax_{II} + Az_{II}) \cdot \cos \varphi(x)], \text{ нВ}, \quad (3)$$

где  $W$  — количество витков в контуре, угол между плоскостью винта МП и горизонтальной плоскостью при текущей продольной координате  $\varphi(x) = \frac{\pi}{b} \cdot (y_0 + \frac{x - x_0}{\operatorname{tg} \delta})$ .

$A_{x1}$ ,  $A_{x2}$ ,  $A_{z1}$ ,  $A_{z2}$  — вспомогательные функции, полученные при разработке базовых моделей информационного сигнала:

$$A_{z1} = 100 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot \frac{h \cdot \exp(-\gamma)}{b^{3/2} \cdot (x^2 + h^2)^{5/4}} \left[ M_z \cdot h \cdot \left(1 + \frac{7}{8 \cdot \gamma} - \frac{x^2}{h^2 \cdot \gamma}\right) + M_x \cdot x \cdot \left(1 + \frac{15}{8 \cdot \gamma}\right) \right];$$

$$A_{x1} = 200 \cdot \pi^2 \cdot \frac{M_y \cdot x \cdot \exp(-\gamma)}{b^{3/2} \cdot (x^2 + h^2)^{3/4}} \cdot \left(1 + \frac{3}{8 \cdot \gamma}\right);$$

$$A_{x2} = 100 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot \frac{\exp(-\gamma)}{b^{3/2} \cdot (x^2 + h^2)^{5/4}} \left[ M_z \cdot x \cdot h \cdot \left(1 + \frac{15}{8 \cdot \gamma}\right) + M_x \cdot (x^2 \cdot \left(1 + \frac{7}{8 \cdot \gamma}\right) - \frac{h^2}{\gamma}) \right];$$

$$A_{z2} = 200 \cdot \pi^2 \cdot \frac{M_y \cdot h \cdot \exp(-\gamma)}{b^{3/2} \cdot (x^2 + h^2)^{3/4}} \cdot \left(1 + \frac{3}{8 \cdot \gamma}\right).$$

С использованием обобщенной модели произведен численный расчет сигналов на выходе МП, который показал большое разнообразие их форм. Примеры сигналов представлены на рисунке 5.

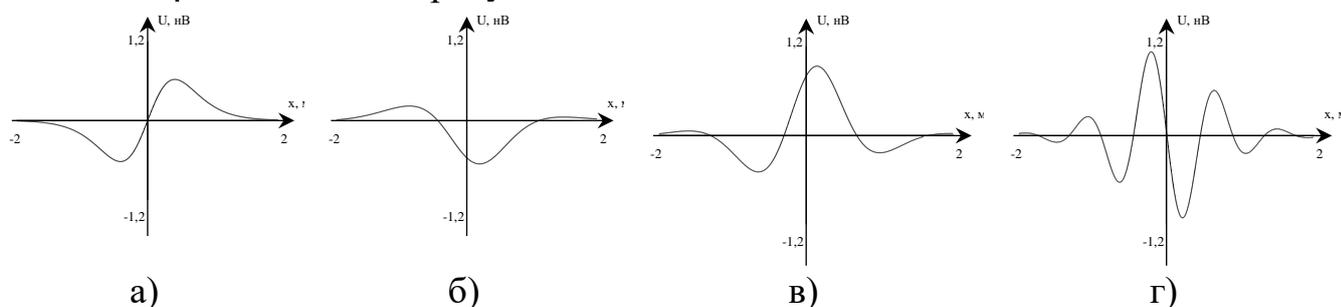


Рисунок 5 — Сигнатуры информационных сигналов с однолинейного преобразователя при  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$  и разных углах наклона траектории  $\delta$ : а)  $\pi/2$ ; б)  $\pi/4$ ; в)  $\pi/6$ ; г)  $\pi/12$

Адекватность разработанной модели подтверждена результатами анализа соответствия базовых и обобщенной моделей информационного сигнала в винтовом магнитном преобразователе природе магнитных явлений, а также статистической оценкой степени совпадения результатов моделирования и натуральных измерений для характерных параметров движения ОО и ориентации его магнитного момента.

Статистическая проверка осуществлена следующими способами:

1. Оценена величина линейного коэффициента корреляции Пирсона между соответствующими масштабированными к максимальному значению теоретиче-

скими и экспериментальными сигналами при траекториях движения нарушителя с вертикальной ориентацией магнитного момента под углом к продольной оси преобразователя  $\delta$   $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $15^\circ$ . Представленные в таблице 1 результаты ( $r = 0,91 \dots 0,95$ ) говорят о высоком совпадении расчетных сигналов и натуральных измерений.

2. Исследована разность — остаток от вычитания масштабированных к максимальному значению расчетных и реальных сигналов — и измерены параметры шума на выходе усилителя экспериментальной установки. Полученные результаты имеют среднее значение, близкое к нулю, равные дисперсии и соответствуют по критерию Пирсона нормальному закону распределения при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , что говорит об отсутствии системной составляющей исследованной разности.

3. Показано, что изменение параметров движения ОО одинаково влияет на расчетные и натурные сигналы. На примере угла наклона траектории нарушителя к оси преобразователя была опровергнута гипотеза о независимости признаков, в качестве которых использовались взаимные коэффициенты корреляции сигналов, наблюдаемых для различных углов  $\delta$ . В результате вычислений коэффициентов ранговой корреляции Кендалла и Спирмена с достоверностью 0,95 гипотеза отвергается с использованием обеих метрик.

**Третья глава** посвящена формированию банка расчетных сигналов на выходе первичного преобразователя при пересечении целью зоны обнаружения, содержащего более 200 000 реализаций; осуществлен его анализ.

В таблице 2 представлены результаты исследования влияния полупериода скрутки (базы) преобразователя на амплитуду информационного сигнала.

На основании полученных результатов сделан вывод, что оптимальное значение базы  $b = 3h/2$ . При меньших значениях на выходе преобразователя

наблюдается малое среднее значение уровня информационного сигнала. Увеличение периода скрутки винта в преобразователе ухудшает компенсационные свойства первичного преобразователя по отношению к распределенным шумам.

Таблица 1. Расчетные сигналы и осциллограммы

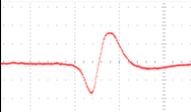
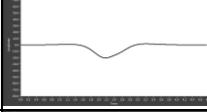
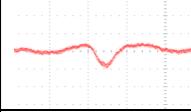
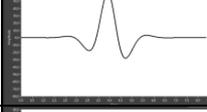
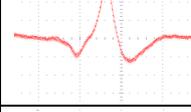
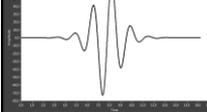
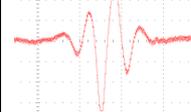
Угол $\delta$	Теоретические модели	Натурные сигналы	Линейный коэффициент корреляции Пирсона
$90^\circ$			0,91
$60^\circ$			0,93
$30^\circ$			0,95
$15^\circ$			0,93

Таблица 2. Оценка конструктивных параметров МП

b	$b = \frac{h}{2}$	$b = h$	$b = \frac{3h}{2}$	$b = 2h$	$b = \frac{5h}{2}$
Параметры распределения амплитуды ИС	$m = 0,29$ $\sigma = 0,14$	$m = 1,36$ $\sigma = 0,65$	$m = 1,58$ $\sigma = 0,69$	$m = 1,44$ $\sigma = 0,58$	$m = 1,24$ $\sigma = 0,48$
	$\frac{m}{\sigma} = 2,07$	$\frac{m}{\sigma} = 2,09$	$\frac{m}{\sigma} = 2,29$	$\frac{m}{\sigma} = 2,48$	$\frac{m}{\sigma} = 2,58$

Проведен анализ спектров сигнала на входе приемного устройства МСО. Исследовано влияние скорости и траектории движения объекта обнаружения на частотные характеристики информационного сигнала.

Из рисунка 6 видно, что увеличение скорости движения цели приводит к пропорциональному увеличению амплитуды и ширины спектральной плотности информационного сигнала. Этот эффект наблюдается для различных траекторий и ориентаций магнитного диполя цели и является следствием индукционного принципа формирования сигналов в распределенном магнитометрическом преобразователе. Частотный анализ информационных сигналов в реальном масштабе времени обеспечивает возможность распознавания категории цели — транспорт или пеший нарушитель.

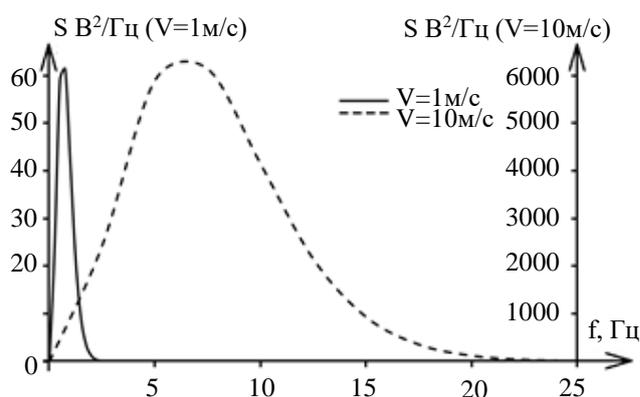


Рисунок 6 — Спектральная плотность сигналов при различных скоростях движения цели

Построены масштабированные к максимальному значению частотные характеристики сигналов при различных углах наклона траектории движения цели, представленные на рисунке 7. Из рисунка видно, что при уменьшении угла наклона траектории к продольной оси преобразователя и одинаковой скорости движения цели наблюдается уменьшение ширины спектра информационного сигнала,

что полезно с точки зрения осуществления более эффективной фильтрации шума и увеличения отношения сигнал/шум на выходе приемного тракта МСО.

Результаты анализа спектров сигналов позволили сформулировать следующие научно обоснованные рекомендации:

- применять в усилительном тракте МСО полосовой фильтр с нижней и верхней частотами среза, зависящими от типа ОО, по которым предполагается работа системы обнаружения;
- строить обнаружитель с двумя отдельными каналами обработки сигналов: с узкой полосой пропускания частотного фильтра (0,3–3 Гц) и пониженным порогом чувствительности — для обнаружения пеших нарушителей, с широкой полосой пропускания частотного фильтра (3–30 Гц) и повышенным порогом чувствительности — для обнаружения транспортных средств.

Исследована зависимость параметров движения объекта обнаружения на амплитуду информационного сигнала на выходе ЧЭ, являющаяся важной тактической характеристикой любого периметрового СО и указывающая на наличие мест с гипер- и пониженной чувствительностью, и получены следующие результаты:

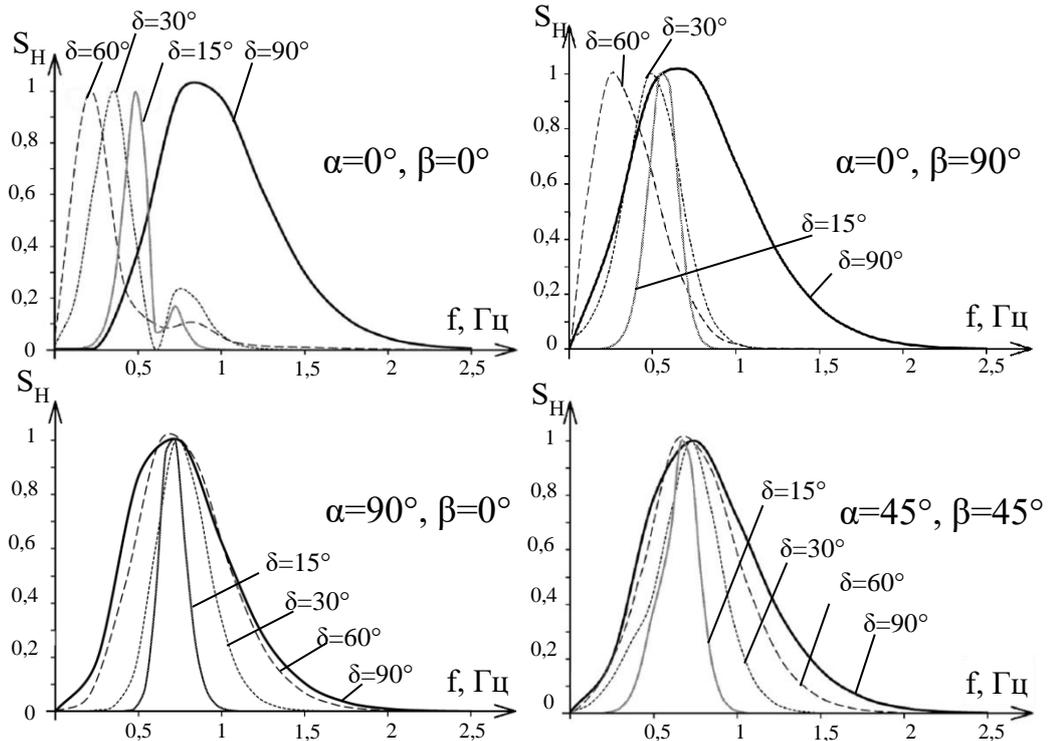


Рисунок 7 — Частотные характеристики сигналов при различных углах наклона траектории движения цели и различных ориентациях ее магнитного момента

1. Ориентация магнитного момента влияет на амплитуду информационного сигнала, а также на ее зависимость от траектории движения объекта обнаружения.

2. Построена зависимость среднего значения уровня амплитуды информационного сигнала ( $m$ ) от угла наклона траектории движения к продольной оси МП ( $\delta$ ), представленная на рисунке 8. Из рисунка видно, что характер зависимости практически не зависит от начальной продольной координаты движения цели  $y_0$ .

Для траекторий цели, не перпендикулярных продольной оси МП, наблюдается увеличение уровня среднего значения амплитуды ИС более чем в 2 раза.

Рекомендовано учитывать данный факт для улучшения технических характеристик МСО при возможности варьирования геометрии размещения преобразователя на рубеже охраны.

3. Выполнен анализ влияния начальной продольной координаты  $y_0$  траектории движения цели на уровень сигнала на выходе МП. Построена зависимость масштабированных к максимальному значению средних значений уровня амплитуды сигнала  $m_H$  от начальной продольной координаты  $y_0$ , представленная на рисунке 9.

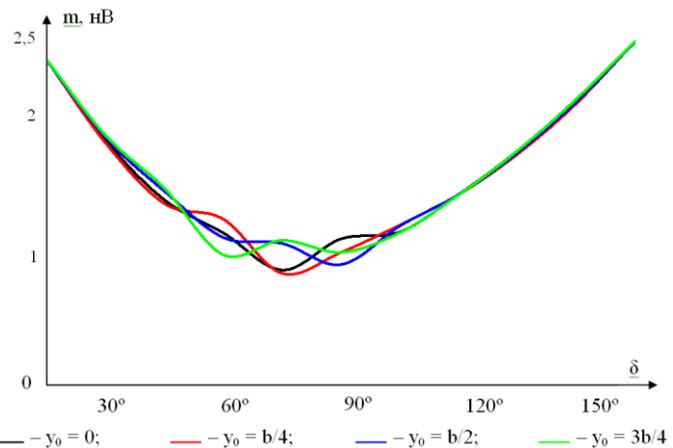


Рисунок 8 — Зависимость среднего значения уровня амплитуды информационного сигнала ( $m$ ) от угла наклона траектории движения к продольной оси МП ( $\delta$ )

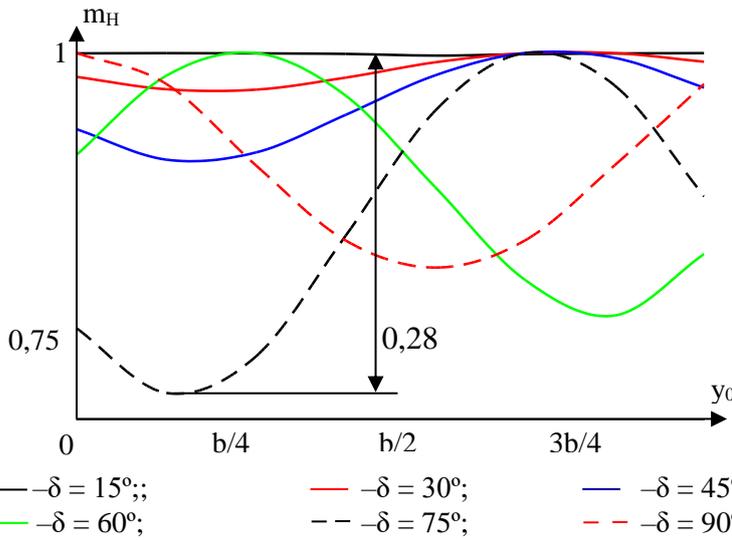


Рисунок 9 — Зависимость масштабированных средних значений амплитуды сигнала  $m_H$  от начальной продольной координаты  $y_0$

Из рисунка видно, что при траектории движения цели, близкой к перпендикулярной к продольной оси МП, наблюдается сильная неравномерность чувствительности. При острых углах наклона траектории движения цели к продольной оси преобразователя неравномерность чувствительности МП существенно уменьшается. При этом характеристики

имеют ярко выраженные максимумы и минимумы, не совпадающие по продольной координате.

4. Для компенсации неравномерности чувствительности МП предложено усовершенствовать его конструкцию. Рекомендуется магнитометрический преобразователь выполнять в виде нескольких винтовых контуров, сдвинутых друг относительно друга по продольной оси МП на некоторый шаг. В простейшем случае МП может состоять из двух контуров, сдвинутых на  $b/2$  (рисунок 10).

Построены зависимости масштабированных к максимальному значению средних значений уровня амплитуды ИС  $m_H$  от начальной продольной координаты  $y_0$  для двухконтурного винтового МП, представленные на рисунке 11.

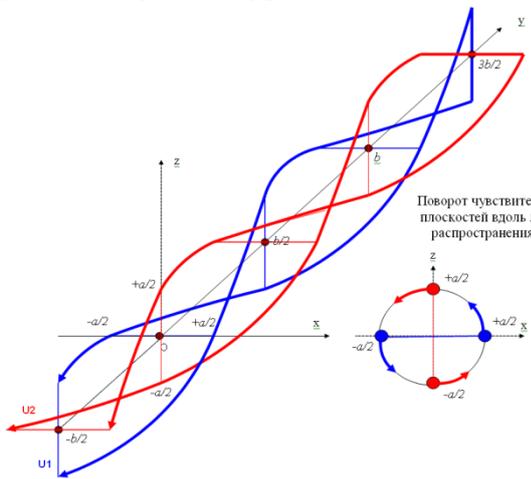


Рисунок 10 — Конструкция двухконтурного магнитометрического преобразователя

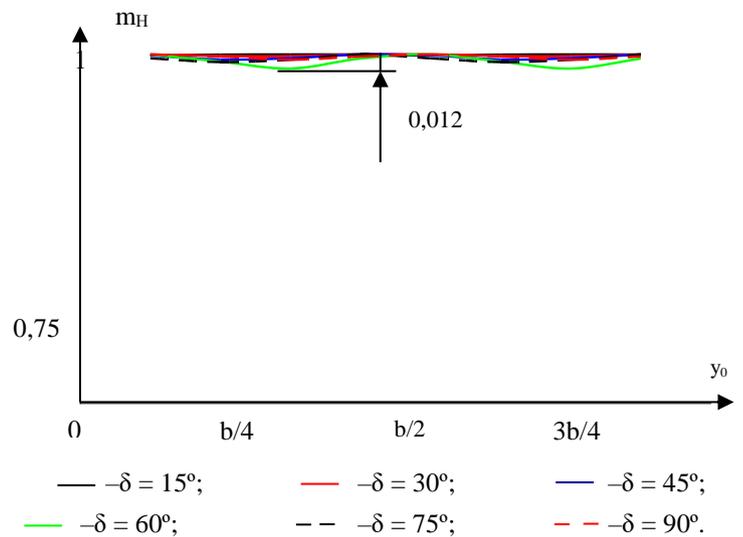


Рисунок 11 — Зависимость масштабированных средних значений амплитуды сигнала  $m_H$  от начальной продольной координаты  $y_0$  в двухконтурном преобразователе

Из рисунка 11 видно снижение неравномерности среднего значения амплитуды ИС за счет конструктивных преимуществ двухконтурного преобразователя на 27,3 дБ по сравнению с использованием одноконтурного преобразователя.

**В четвертой главе** обоснованы функциональность и алгоритм работы программно-аппаратного комплекса (рисунок 12) для исследования потенциальных характеристик обнаружения магнитометрических систем, который обеспечивает:

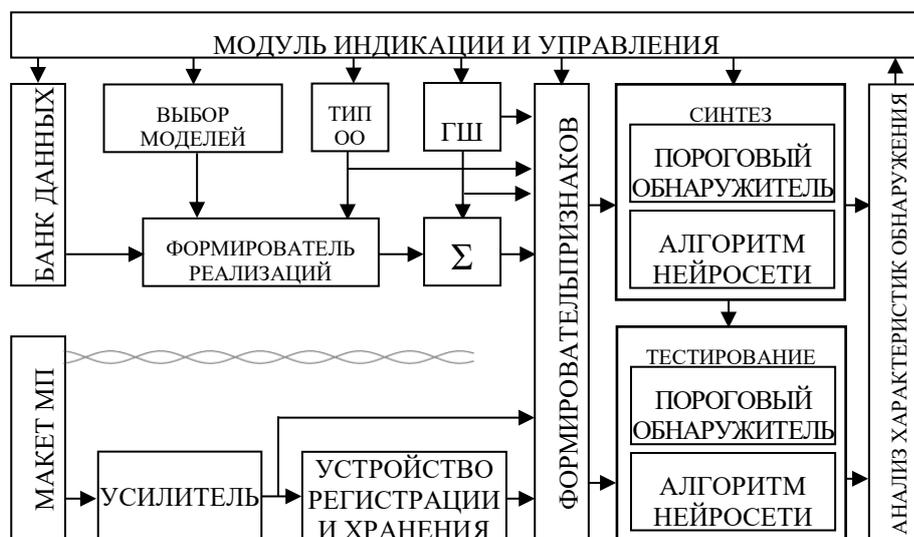


Рисунок 12 — Программно-аппаратный комплекс

- навигацию по БД;
- формирование реализаций ИС с учетом типа объекта обнаружения (распределения вероятностей значений модуля магнитного момента и скорости движения);
- моделирование помехового воздействия и получение аддитивной смеси информационного сигнала с шумом;
- выявление селективных параметров ИС;
- синтез алгоритмов принятия решения о присутствии ОО в зоне обнаружения системы охранной сигнализации;
- тестирование алгоритмов БПР на основе расчетных реализаций и натуральных измерений.

Пространственные углы ориентации магнитного момента объекта обнаружения  $\alpha$  и  $\beta$ , продольная координата  $y_0$ , угол наклона траектории  $\delta$  и скорость движения цели  $V$  в общем случае являются априорно неизвестными и неуправляемыми с позиций охраны (эксплуатации СО). Поэтому указанные параметры при исследовании характеристик МСО считались равномерно распределенными на областях определения. Зависящую от этих параметров амплитуду информационного сигнала следует считать случайной величиной, которая может быть охарактеризована математическим ожиданием ( $m$ ) и среднеквадратическим отклонением ( $\sigma$ ).

С помощью исследовательского комплекса на основе сформированного банка реализаций и с учетом известного распределения величины магнитного момента построено распределение вероятности амплитуды ИС для различных типов цели. На рисунке 13 приведены распределение вероятностей смеси информационного сигнала с шумом для нарушителя типа «велосипедист» и распределение вероятностей шума на выходе усилителя приемного тракта МСО.

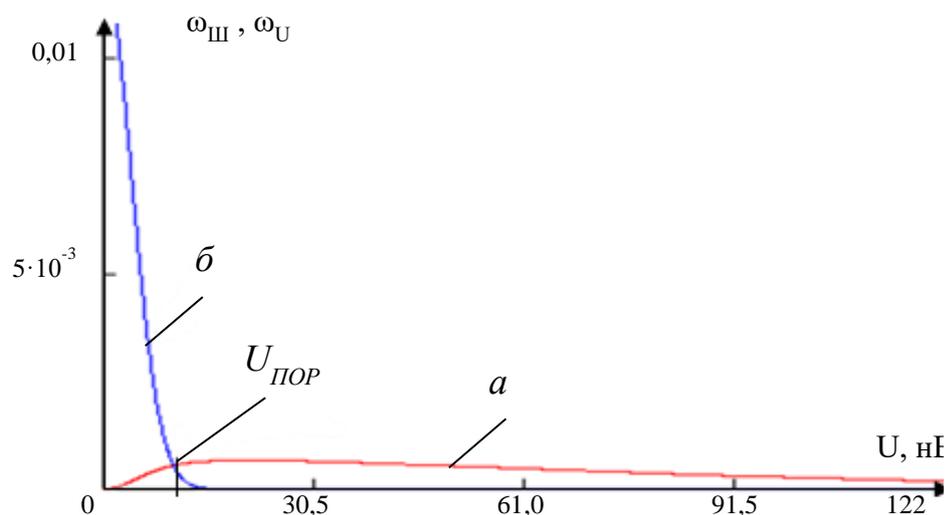


Рисунок 13 — Распределения вероятностей смеси информационного сигнала с шумом для нарушителя типа «велосипед» (а) и шума (б)

В качестве критерия обнаружения использован критерий минимума среднего риска (Байеса), адаптированный к особенностям систем охранной сигнализации: риск пропуска нарушителя на охраняемую территорию намного превышает риск ложного обнаружения. Поэтому при исследовании системы

обнаружения интерес представляет зависимость вероятности ложной тревоги от отношения сигнал/шум при заданной вероятности правильного обнаружения. Рассчитана вероятность ложной тревоги (при вероятности правильного обнаружения  $R_{\text{Обн}} = 0,95$ ) для двух типов объектов обнаружения: пеший нарушитель с РПК и велосипедист.

Анализ полученных результатов (таблица 3) показал, что система охранной сигнализации на основе винтового магнитного преобразователя с пиковым детектором и пороговым алгоритмом принятия решения является эффективным для обнаружения объектов, характеризующихся относительно большим магнитным моментом.

Таблица 3. Характеристики порогового обнаружителя

Тип нарушителя	Вероятность правильного обнаружения	Вероятность ложной тревоги	Возможность обнаружения данного объекта
Пеший ЧН с РПК	0,95	0,54	-
Велосипедист	0,95	0,045	+

Характеристики обнаружения МСО существенно зависят от угла наклона траектории нарушителя к продольной

оси МП. При определенной геометрии монтажа преобразователя на рубеже охраны с потенциально предполагаемой траекторией прохождения ОО возможно уменьшить вероятность ложной тревоги в десятки раз. Кроме того, применение двухконтурного МП для цели типа «велосипед» позволяет уменьшить вероятность ложной тревоги (для произвольного угла траектории нарушителя к продольной оси преобразователя) с 0,045 до 0,029 по сравнению с одноконтурной структурой преобразователя (таблица 4).

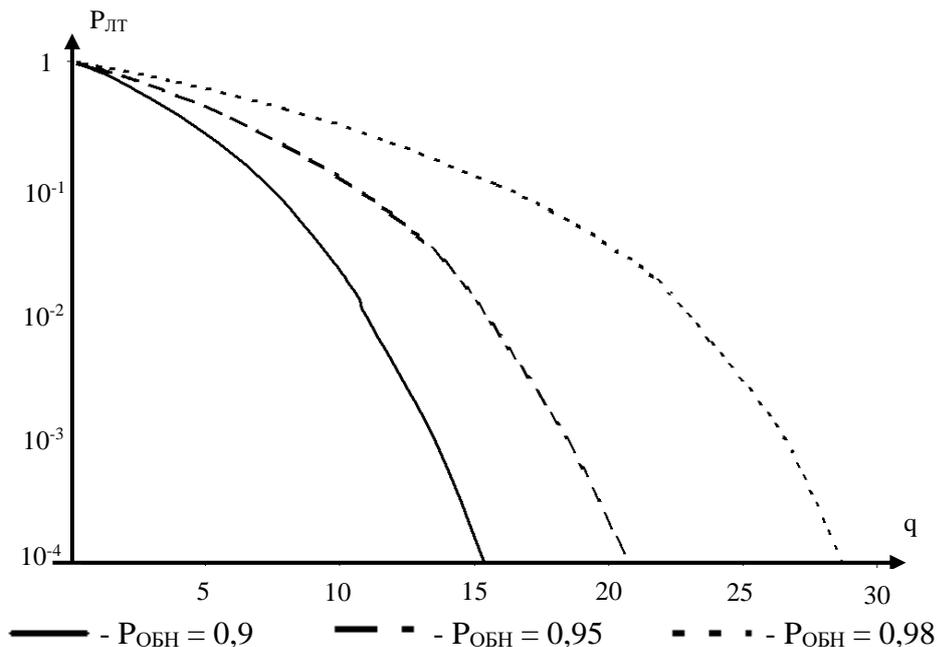
Программно-аппаратный комплекс позволил абстрагироваться от конкретного типа цели. На рисунке 14 представлены зависимости вероятности ложной тревоги от отношения сигнал/шум, при фиксированных вероятностях правильного обнаружения, которые могут быть использованы при дальнейшем формировании перечня объектов обнаружения по мере накопления информации об их магнитных моментах.

Таблица 4. Вероятности ложной тревоги

Угол наклона траектории ОО к продольной оси МП	Одноконтурный МП	Двухконтурный МП
$\delta = 15^\circ$	$P_{л.т.} = 0,001$	$P_{л.т.} = 0,001$
$\delta = 30^\circ$	$P_{л.т.} = 0,003$	$P_{л.т.} = 0,001$
$\delta = 45^\circ$	$P_{л.т.} = 0,012$	$P_{л.т.} = 0,008$
$\delta = 60^\circ$	$P_{л.т.} = 0,115$	$P_{л.т.} = 0,075$
$\delta = 75^\circ$	$P_{л.т.} = 0,185$	$P_{л.т.} = 0,121$
$\delta = 90^\circ$	$P_{л.т.} = 0,1$	$P_{л.т.} = 0,063$
$\delta = 105^\circ$	$P_{л.т.} = 0,088$	$P_{л.т.} = 0,088$
$\delta = 120^\circ$	$P_{л.т.} = 0,038$	$P_{л.т.} = 0,025$
$\delta = 135^\circ$	$P_{л.т.} = 0,001$	$P_{л.т.} = 0,001$
$\delta = 150^\circ$	$P_{л.т.} = 0,001$	$P_{л.т.} = 0,001$
$\delta = 165^\circ$	$P_{л.т.} = 0,001$	$P_{л.т.} = 0,001$
Все $\delta$	$P_{л.т.} = 0,045$	$P_{л.т.} = 0,029$

На завершающем этапе исследования проанализированы потенциальные характеристики МСО, блок принятия решения которых построен на алгоритмах искусственного интеллекта. Рассмотрены несколько типов искусственных нейронных сетей (ИНС): сеть с обратным распространением ошибки, биполярная ассоциативная память, рекуррентная сеть реального времени и др.

При компьютерном моделировании ИНС с обратным распространением ошибки лучшие результаты в отношении скорости и степени сходимости целевой



функции показал трехслойный персептрон с топологией 1000-100-1. Для ускорения обучения ИНС использовались некоторые эвристики: адаптивный подбор коэффициента обучения с учетом фактической динамики целевой функции в результате обучения, фактор момента, оптимизация начальных значений весов и т.п.

Полученные результаты (таблица 5) показали, что вероятность ложной тревоги МСО с ИНС при заданной вероятности правильного обнаружения в шесть раз ниже, чем при использовании пороговых алгоритмов.

Биполярная ассоциативная память в отличие от других типов нейронных сетей не требует обучения в традиционном понимании с большим количеством итераций. Данная сеть демонстрирует схожие с пороговыми алгоритмами характеристики обнаружения (таблица 5).

Лучшие характеристики обнаружения показала рекуррентная сеть реального времени. Реализация данной сети фактически является расширением много-

слоя персептрона за счет добавления в него обратных связей и изменением функции обновления весов сети. Демонстрируемая данной ИНС вероятность ложной тревоги (0,006) соответствует требованиям, предъявляемым к периметровым системам обнаружения (таблица 5).

Таблица 5. Оценка качества различных ИНС

Тип ИНС	Вероятность правильного обнаружения	Вероятность ложной тревоги
биполярная ассоциативная память	0,95	0,02
нейронная сеть с обратным распространением ошибки		0,007
рекуррентная сеть реального времени		0,006

Поскольку рекуррентная сеть реального времени показывает лучшие результаты классификации, можно полагать, что ее применение при построении магнитометрических систем обнаружения наиболее целесообразно.

Обычно на практике при обучении ИНС в качестве минимизируемой функции потерь применяется среднеквадратическая ошибка. Такой подход оправдан лишь при одинаковом влиянии на качество работы технической системы в целом ошибок первого и второго рода. Стоимость ошибок разного рода в системах охранной сигнализации существенно различны. Поэтому в качестве функции потерь использовалась модифицированная функция, учитывающая возможный ущерб от реализации ошибок при обучении нейронных сетей:

$$E_{av}(n) = \frac{1}{L} \cdot \sum_{n=1}^L E_n = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \sum_{n=1}^L \sum_{j=1}^K e_j^2 = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \sum_{n=1}^L \left( \sum_{j \in Y} (\alpha_1 \cdot (1 - y_i))^2 + \sum_{j \in N} (-\alpha_2 \cdot y_i)^2 \right) + \sum_{j \in N} (-\alpha_2 \cdot y_i)^2, \quad (4)$$

где  $E_{av}$  – средняя ошибка по выборке;  $e_j$  – сигнал ошибки  $j$ -го нейрона в слое;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – линейные коэффициенты;  $y_i$  – выходное значение сети;  $Y$  – подмножество объектов обучающей выборки, для которых ожидаемое значение равно 1;  $N$  – подмножество объектов, для которых ожидаемое значение равно 0;  $L=N+Y$  – мощность обучающей выборки.

Результаты окончательной оценки качества модели ИНС, обученной с использованием модифицированной функции потерь, представлены в таблице 6 в виде матрицы ошибок.

Таблица 6. Матрица ошибок итогового тестирования ИНС

Прогноз класса	Реальное значение класса	
	1	0
1	105062	130
0	5530	221054

Проведенные исследования показывают, что с учетом особенностей обучения и формирования обучающих выборок искусственные нейронные сети целесо-

образно использовать при синтезе блоков принятия решений в сигнализационных средствах обнаружения. Полученные результаты дают основания говорить о высоких характеристиках обнаружения МСО распределенного типа, БПР которых построен на основе ИНС: при заданном значении правильного обнаружения 0,95 вероятность ложной тревоги составила  $5,9 \cdot 10^{-4}$ . Полученное значение вероятности ложной тревоги существенно ниже, чем соответствующее значение, наблюдаемое при простом пороговом алгоритме принятия решений и при использовании ИНС, обученной при использовании стандартной функции потерь.

**В заключении** подведены итоги диссертационной работы и сформулированы ее основные научные и практические результаты, которые можно квалифицировать как решение актуальной задачи по исследованию характеристик сигналов, разработке алгоритмов обнаружения, определению потенциальных возможностей и выработке рекомендаций по созданию перспективных радиотехнических систем периметровой охранной сигнализации с винтовым магнитометрическим преобразователем.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

1. На основе выполненного анализа результатов исследований существующих МСО с распределенным чувствительным элементом выявлены недостатки известных решений, среди которых: их большие массогабаритные параметры, высокие трудозатраты при монтаже и обслуживании, отсутствие средств оперативного прикрытия охраняемых рубежей. Известные результаты исследований винтового преобразователя имеют ограниченное применение, поскольку описывают его работу лишь для двух частных случаев движения объекта обнаружения, не позволяют осуществить исследование характеристик сигналов для случая произвольной траектории движения нарушителя, судить об их форме и амплитуде, оценить продольную неравномерность чувствительности системы обнаружения и разработать алгоритмы обработки сигналов приемного устройства МСО.

2. Разработана обобщенная математическая модель информационного сигнала в магнитометрическом преобразователе с винтовой структурой, отличающаяся от ранее известных тем, что учитывает произвольные значения параметров движения объекта обнаружения. Адекватность разработанной математической модели информационного сигнала подтверждена сходимостью результатов анализа с известными моделями, а также результатами экспериментальных исследований. При этом проанализировано соответствие расчетных реализаций информационных сигналов природе магнитных явлений, проведена статистическая проверка степени совпадения расчетных реализаций и результатов натурных измерений:

- вычислены значения линейных коэффициентов корреляции между соответствующими теоретическими и экспериментальными сигналами ( $r = 0,91..0,95$ );
- установлено соответствие разности масштабированных к максимальному значению расчетных и реальных сигналов измеренным параметрам шума на выходе усилителя экспериментальной установки;

– доказано, что внешние параметры одинаково влияют на характеристики расчетных сигналов, полученных с помощью модели информационного сигнала, и натуральных измерений.

3. С помощью разработанного специализированного программно-аппаратного комплекса произведен анализ банка сигналов, на основании которого сформулированы следующие выводы:

3.1 Ориентация магнитного момента влияет на амплитуду информационного сигнала, неравномерность чувствительности, а также ее зависимость от траектории движения объекта обнаружения, увеличение скорости движения цели приводит к пропорциональному увеличению амплитуды и ширины спектра сигнала, что согласуется с известными положениями электродинамики;

3.2 Оптимальное значение полупериода скрутки преобразователя составляет  $b = 1,5h$  ( $h$  — предполагаемая высота расположения магнитного диполя цели);

3.3 При отклонении траектории от перпендикулярной к продольной оси первичного преобразователя происходит увеличение уровня среднего значения амплитуды информационного сигнала (более чем в 2 раза при угле наклона траектории объекта обнаружения к продольной оси преобразователя  $15^\circ$ );

3.4 При острых углах наклона траектории движения цели к продольной оси преобразователя неравномерность чувствительности преобразователя существенно уменьшается, спектр информационного сигнала сужается. При углах  $\delta = \{90^\circ, 75^\circ, 60^\circ\}$  характеристики имеют ярко выраженные максимумы и минимумы, не совпадающие по продольной координате.

3.5 Сформированы научно обоснованные рекомендации к блоку обработки сигналов в однолинейном МСО на основе винтового преобразователя. Рекомендовано применение в усилительном тракте полосового фильтра с нижней и верхней частотами среза, зависящими от типа объекта обнаружения. Для определения типа нарушителя предложено реализовать два отдельных канала обработки сигналов: с узкой полосой пропускания частотного фильтра (0,3–3 Гц) и пониженным порогом чувствительности — для обнаружения пешех нарушителей; с широкой полосой пропускания частотного фильтра (3–30 Гц) и повышенным порогом чувствительности — для обнаружения транспортных средств.

3.6 Доказано, что применение усовершенствованной многоконтурной конструкции первичного преобразователя позволяет уменьшить продольную неравномерность чувствительности. В простейшем случае при использовании двухконтурной конструкции наблюдается уменьшение продольной неравномерности среднего значения амплитуды информационного сигнала от цели на 27,3 дБ по сравнению с использованием одноконтурного преобразователя. При этом показано, что применение двухконтурного магнитометрического преобразователя позволяет уменьшить вероятность ложной тревоги при произвольной траектории движения объекта обнаружения в 1,55 раза.

4. Синтезированы алгоритмы принятия решения об обнаружении при использовании классического порогового обнаружителя, а также искусственных нейронных сетей. Последние рассматривались следующих типов: с обратным

распространением ошибки, биполярная ассоциативная память, рекуррентная сеть реального времени.

4.1 Построенные характеристики обнаружения показали, что амплитудный пороговый алгоритм является эффективным для обнаружения объектов, характеризующихся относительно большим магнитным моментом.

Вероятность ложной тревоги при вероятности правильного обнаружения 0,95 для типа объекта обнаружения «велосипедист» ( $M = 1,8 \dots 10,2 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ) составила  $P_{\text{ЛТ}} = 0,045$ .

4.2 Лучшие результаты среди моделей ИНС показала рекуррентная сеть реального времени: при использовании среднеквадратической ошибки в качестве функции потерь при обучении вероятность ложной тревоги составила  $P_{\text{ЛТ}} = 0,006$  при вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{Обн}} = 0,95$ .

4.3 При обучении ИНС при минимизации модифицированной функции потерь, учитывающей возможный ущерб от реализации ошибок первого и второго рода в сигнализационных системах обнаружения, вероятность ложной тревоги составила  $5,9 \cdot 10^{-4}$  при заданном значении правильного обнаружения 0,95.

В итоге полученные результаты исследования показали, что при построении МСО для оперативной охраны протяженных рубежей необходимо использовать винтовой преобразователь с оптимальной базой и многоконтурной структурой, продольная ось которого расположена под острым углом к предполагаемой траектории движения объекта обнаружения. Тракт обработки сигнала представляет собой многоканальный приемник с частотным разделением каналов и переменным порогом чувствительности для возможности определения типа нарушителя. Алгоритм работы блока принятия решения основывается на искусственных нейронных сетях как пример методов искусственного интеллекта.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.**

В ходе работы над диссертацией определились следующие направления дальнейших исследований:

- совершенствование алгоритмов обнаружения и распознавания нарушителей в магнитометрических системах обнаружения, в том числе с применением искусственных нейронных сетей;
- исследование вопросов помехоустойчивости и помехозащищенности периметровых магнитометрических систем обнаружения;
- совершенствование научно-методического аппарата разработки быстроразвертываемых МСО с функцией распознавания объектов обнаружения на основе однолинейных магнитометрических преобразователей.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:**

1. **Захаркин Г.Ф.** Обобщенная математическая модель однолинейного винтового магнитометрического преобразователя / **Г.Ф. Захаркин**, Е.И. Духан, С.С. Звездинский // Радиотехника. — 2012. — № 1. — С. 34-37 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

2. **Захаркин Г.Ф.** Разработка математических моделей сигналообразования магнитометрических средств обнаружения с использованием алгоритмизирован-

ной методики / **Г.Ф. Захаркин**, Е.И. Духан, В.Ю. Сазонов // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2019. — № 2. — С. 41–47 (0,44 п.л. / 0,15 п.л.)

3. **Zakharkin G.** System analysis of the prospective characteristics of the helical magnetometric detection tool / **Zakharkin G.**, Dukhan E. // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT 2020). — 2020. — IEEE Xplore № 9117679 — Pp. 345-348 (0,5 п.л. / 0,3 п.л.) (Scopus)

**Другие публикации:**

4. **Захаркин Г.Ф.** Алгоритмы обработки информации магнитометрического средства обнаружения на основе нейросети / **Г.Ф. Захаркин**, Е.И. Духан, А.Е. Духан, С.С. Звездинский // Спецтехника и связь, 2015. — № 5. — С. 29–32 (0,25 п.л. / 0,07 п.л.)

5. **Захаркин Г.Ф.** К анализу спектра сигналов однолинейного винтового магнитометрического преобразователя / **Г.Ф. Захаркин**, Е.И. Духан, С.С. Звездинский // Материалы V Всерос. науч. конф. «Территориально распределенные системы охраны». — Калининград: КПИ ФСБ России, — 2012. Науч. сб. № 1. — С. 77–80. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

6. **Захаркин Г.Ф.** Оценка адекватности обобщенной модели сигналообразования в квазиоднолинейном винтовом магнитометрическом преобразователе: тез. докл. / **Г.Ф. Захаркин**, Е.И. Духан // Материалы VI Всероссийской научной конференции «Территориально распределенные системы охраны». Сборник № 6, часть 1. — г. Калининград: КПИ ФСБ РФ, 2013. — С. 98-104 (0,44 п.л. / 0,22 п.л.)

7. **Захаркин Г.Ф.** Специализированный комплекс для исследования характеристик магнитометрического средства обнаружения нарушителей: тез. докл. / **Г.Ф. Захаркин**, Е.И. Духан, С.С. Звездинский // Сборник трудов XI Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», 15-16 марта 2017 г. Москва, МТУСИ. — С. 299-300 (0,125 п.л. / 0,05 п.л.)

8. **Захаркин Г.Ф.** Физическая интерпретация результатов математического моделирования сигналов в винтообразном магнитном преобразователе / **Г.Ф. Захаркин**, Е.И. Духан, С.С. Звездинский // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов». — г. Заречный Пензенской области, 2012. — С. 169 (0,07 п.л. / 0,03 п.л.)

9. **Захаркин Г.Ф.** Формирование банка расчетных сигналов в винтовом однолинейном магнитометрич. преобразователе / **Г.Ф. Захаркин**, Е.И. Духан, С.С. Звездинский // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов: сборник научных статей XI Всероссийской НТК. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. — С. 266-274 (0,56 п.л. / 0,19 п.л.)

Подписано в печать \_\_. \_\_. \_\_\_\_\_. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. \_\_, \_\_. Тираж \_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_\_