

На правах рукописи

Кудрявцев Олег Борисович

Устройства обнаружения объектов вихрековым методом

Специальность 05.13.05

«Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор _____

Москва - 2009 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук, доцент НИЯУ
«МИФИ»
Решетов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, главный специа-
лист ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»
Синий Леонид Леонидович

кандидат технических наук, зав. лабораторией ФГУ
«Технологический институт сверхтвердых и новых уг-
леродных материалов», г. Троицк
Гоголинский Кирилл Валерьевич

Ведущая организация:

ЗАО «Научно-исследовательский институт интроско-
пии МНПО «Спектр»

Защита состоится 22 марта 2010 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 при НИЯУ «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ «МИФИ».

Автореферат разослан ___ февраля 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

д.т.н., профессор



Скоробогатов П.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

На сегодняшний день различные технические устройства, работающие на основе использования электромагнитного поля, прочно вошли в нашу жизнь. Подклассом таких устройств являются устройства, предназначенные для обнаружения различных объектов в физических средах. Например, устройства для обнаружения подводной лодки в море или самолета в небе, устройства для обнаружения залежей железной руды в Земле и т.п.

Значительную долю устройств обнаружения объектов занимают устройства обнаружения, работающие на вихретоковом методе, и поэтому называемые вихретоковыми.

Вихретоковый метод обнаружения заключается в регистрации интегрального возмущения электромагнитного поля, возникающего в результате наведения в обнаруживаемом объекте, расположенном в ближней зоне излучения, вихревых токов.

Вихретоковый метод обнаружения нашел широкое применение для обнаружения сильнопроводящих сильномагнитных ($\mu \gg 1$) и слабомагнитных ($\mu \approx 1$) объектов в слабопроводящих и диэлектрических средах (металлодетекторы, радиочастотные противокражные системы в магазинах и др.) и диэлектрических объектов в сильнопроводящих сильномагнитных и слабомагнитных средах (вихретоковые дефектоскопы и др.).

Однако в настоящее время имеется целый ряд актуальных задач, выходящих из числа вышеперечисленных, которые можно успешно решить с помощью применения вихретоковой техники обнаружения. К этому ряду задач, в частности, относятся:

- обнаружение пищевых пакетов с напыленной высокоомной пленкой, которые можно использовать в качестве электромагнитных экранов электронной метки для обмана радиочастотных противокражных систем, предназначенных для обнаружения выносимых из магазина неоплаченных товаров;

- обнаружение под снегом, песком, почвой различных немагнитных объектов, таких как тело пострадавшего человека, вода, пустоты, немагнитные трубопроводы и т.п.;

- регистрация факта прохода более одного человека по одной предъявленной карте доступа в помещение с ограниченным доступом.

Состояние исследований по проблеме

Вопросам разработки вихретоковых устройств в нашей стране и за рубежом посвящены многочисленные научные исследования и труды. Среди них можно отметить работы Клюева В.В., Герасимова В.Г., Покровского А.Д., Сухорукова В.В. В настоящее время вихретоковые приборы и установки широко используются для обнаружения и определения параметров дефектов - несплошностей материалов (дефектоскопия и дефектометрия), обнаружения электропроводящих объектов (металлоискатели) и для других целей. Вихретоковый вид неразрушающего контроля применяют только для контроля объектов из электропроводящих материалов. Таким образом, вихретоковый метод обнаружения нашел широкое применение для обнаружения сильнопрово-

дящих сильномагнитных и слабомагнитных объектов в слабопроводящих и диэлектрических средах (металлодетекторы, радиочастотные противокражные системы в магазинах и др.) и диэлектрических объектов в сильнопроводящих сильномагнитных и слабомагнитных средах (вихретоковые дефектоскопы и др.).

Цель и задачи диссертации

Данная диссертация посвящена разработке новых, не имеющих аналогов, вихретоковых устройств обнаружения слабопроводящих объектов в слабомагнитных слабопроводящих и диэлектрических средах с магнитными антеннами в качестве первичных измерительных преобразователей.

Таким образом, теоретической целью данной диссертации является развитие вихретокового метода для обнаружения слабопроводящих объектов в слабомагнитных слабопроводящих и диэлектрических средах, а практической целью диссертации - создание вышеперечисленных устройств обнаружения.

Для выполнения диссертации потребовалось разработать первичные и вторичные преобразователи информации, аналоговые, импульсные и цифровые элементы и устройства, провести теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования этих элементов и устройств, разработать новые алгоритмы и программы, что составляет предмет исследований по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Научная новизна диссертации

1) Предложена методика проектирования вихретоковых устройств обнаружения слабопроводящих объектов, в том числе на фоне неподвижных и движущихся металлических объектов, что позволило разработать несколько вихретоковых устройств обнаружения нового типа.

2) Приведены теоретические и экспериментальные обоснования разработанного бесконтактного индукционного устройства для дверного проема за счет введения понятия относительного магнитного веса тела человека для плоской магнитной антенны конечных размеров, что дало возможность использовать это устройство для систем контроля и управления физическим доступом.

3) Проведен анализ факторов, влияющих на нестабильность магнитных весов людей во времени, что позволило дать теоретическую оценку этой нестабильности.

Практическая значимость диссертации

Практическая значимость диссертации определяется созданием ряда новых устройств: детектора экранов метки, вихретокового поискового устройства, бесконтактного индукционного устройства для дверного проема, бесконтактного индукционного устройства для пропускной кабины, которые были разработаны и экспериментально исследованы соискателем.

Разработанный детектор экранов метки нашел применение в радиочастотной противокражной системе марки «Menhir» голландской фирмы «Telsec» для предотвращения кражи товара с помощью оборачивания его металлической фольгой или вы-

сокоомной пленкой, экранирующих электронную метку. Получен акт о внедрении от российской фирмы «Кватро Люкс», являющейся деловым партнером голландской фирмы «Telsec».

Вихретоковое поисковое устройство прошло успешные испытания на полигоне МЧС РФ в г. Химки. Новизна устройства подтверждена патентом РФ.

Проведены обширные долговременные наблюдения за стабильностью магнитных весов людей во времени. Полученные положительные результаты позволили запустить системы управления физическим доступом, работающие на основе измерения магнитного веса тела человека, в опытное производство и обеспечить надежное функционирование этих систем.

Проведены успешные испытания устройств, что подтверждается протоколом испытаний. Опытный образец экспонировался на международной выставке MIPS-2002 Protection, Security & Fire Safety. Полученные отзывы от организаций, занимающихся в области разработки систем безопасности: НИИ интроскопии МНПО «Спектр», компании «Микком ИСБ», Международной ассоциации по проблемам CALS, подтверждают важность и новизну данных разработок. Новизна устройств подтверждена патентом РФ.

Проведенные исследования открывают возможность для создания нового поколения вихретоковых устройств.

Результаты, выносимые на защиту

Результаты выполненной диссертации позволяют сформулировать следующие положения, выносимые на защиту.

1) Развитие вихретокового метода на случай обнаружения слабопроводящих объектов, в том числе на фоне неподвижных и движущихся металлических объектов, и создание вихретоковых устройств обнаружения слабопроводящих объектов.

2) Методика расчета метрологических характеристик вихретоковых устройств.

3) Понятие относительного магнитного веса тела человека для плоской магнитной антенны конечных размеров.

4) Анализ и обширная долговременная статистика изменчивости магнитных весов людей во времени.

Апробация диссертации и публикации

Основные результаты диссертации докладывались на научных сессиях МИФИ 1999 - 2007 гг.; на конференциях в Гурзуфе 1996, 1998 гг.

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе три статьи в международных изданиях, 12 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях, два патента, три статьи в реферируемых журналах из списка ВАК.

Разработанное вихретоковое поисковое устройство нашло применение в двух НИР, выполненных в интересах МЧС РФ.

Разработанные бесконтактное индукционное устройство для дверного проема и бесконтактное индукционное устройство для пропускной кабины нашли применение в двух НИР, выполненных для фирм «Кватро Люкс» и «Магнитометрические Системы».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 158 страницах, содержит 34 таблицы и 119 рисунков. Список литературы содержит 92 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко рассмотрено состояние дел на сегодняшний день в области электромагнитного и, в частности, вихретокового обнаружения объектов, обосновывается актуальность диссертации, сформулированы ее основные цели и задачи.

В первой главе подробно рассмотрены некоторые существующие электромагнитные методы обнаружения металлических и неметаллических объектов: вихретоковый и радиолокационный. Оговорено, что в диссертации будет идти речь о неподвижных физических средах с неизменными во времени (стационарными) электромагнитными характеристиками.

Приведена существующая классификация вихретоковых устройств обнаружения и соответствующих им методов измерения по типу преобразования сигнала измерительной информации (параметрические и трансформаторные) и по виду временной зависимости характеристик электромагнитного поля (гармонические и импульсные). Указаны достоинства и недостатки этих методов.

На примере двух систем, разработанных канадскими специалистами для обнаружения артиллерийских снарядов, находящихся на глубине до двух метров от поверхности земли, подробно рассмотрено трансформаторное импульсное устройство обнаружения и соответствующий ему метод измерения.

На примере системы, разработанной американскими специалистами для обнаружения в грунте металлических и пластиковых противопехотных и противотанковых мин, подробно рассмотрено радиолокационное устройство обнаружения и соответствующий ему метод измерения.

Приводится краткое описание двух радиолокационных систем японских специалистов для обнаружения под снегом металлических объектов и тела человека. Также приведены примеры отечественных разработок в области радиолокационного обнаружения объектов.

Подчеркивается техническая сложность радиолокационного устройства и, соответственно, существенно более высокая стоимость по сравнению с вихретоковым устройством.

Рассмотрены хорошо известные и широко используемые в технике амплитудно-частотный (автогенераторный) и амплитудно-фазовый параметрические методы измерения различных физических величин, являющиеся двухпараметровыми методами измерения. Эти методы измерения можно использовать и для вихретокового обнаружения объектов.

Вихретоковый амплитудно-частотный метод обнаружения заключается в регистрации интегрального возмущения под действием обнаруживаемого объекта гармонически изменяющегося электромагнитного поля посредством измерения изменений амплитуды и частоты выходного напряжения автогенератора, в колебательный контур которого включена приемопередающая полеобразующая магнитная антенна.

Вихретоковый амплитудно-фазовый параметрический метод обнаружения заключается в регистрации интегрального возмущения под действием обнаруживаемого объекта гармонически изменяющегося электромагнитного поля посредством измерения изменений амплитуды напряжения на концах приемопередающей полеобразующей магнитной антенны и разности фаз между напряжением на концах антенны и током генератора, питающего ее.

Показана связь изменений активного сопротивления и индуктивности приемопередающей магнитной антенны с изменением магнитного потока $\Delta\dot{\Psi}_m$.

Рассмотрены характеристики автогенератора как измерительного преобразователя. Приведен анализ кратковременной и долговременной нестабильностей частоты и амплитуды автогенератора, описано условие полного фазирования автогенератора, предназначенного для уменьшения нестабильности его частоты.

Во второй главе дается классификация типов задач обнаружения объектов, о которых будет идти речь в данной диссертации.

Первый тип задач обнаружения - обнаружение движущимся относительно земли устройством неподвижного относительно земли объекта с известными по порядку величины электромагнитными характеристиками и геометрическими размерами на фоне окружающей среды и отдельных посторонних объектов с известными по порядку величины электромагнитными характеристиками. К первому типу задач относятся обнаружение под землей, песком, снегом металлических и неметаллических труб, пустот, резервуаров воды, человека и др.

Второй тип задач обнаружения - обнаружение неподвижным относительно земли устройством движущегося относительно земли объекта с известными по порядку величины электромагнитными характеристиками и геометрическими размерами на фоне окружающей среды и отдельных посторонних объектов с известными по порядку величины электромагнитными характеристиками. Ко второму типу задач относятся обнаружение тела человека, проходящего через дверной проем или пропускную кабину, проплывающего под водой через некоторое сечение, обнаружение у движущегося человека металлических и слабопроводящих предметов и др.

Перечислены погрешности измерения, возникающие в вихретоковых устройствах обнаружения. Приводится классификация эффектов, возникающих в вихретоковых устройствах обнаружения, в которых магнитная антенна питается гармонически изменяющимся квазистационарным током от идеального генератора тока.

Пусть $\dot{\Psi}_m$ - комплексная амплитуда потока магнитной индукции приемопередающей или приемной антенны. При расположении обнаруживаемого или постороннего объекта на бесконечном расстоянии от приемопередающей антенны обозначим эту амплитуду через $\dot{\Psi}_{m0}$.

Если некоторый объект (обнаруживаемый или посторонний) из бесконечности поднести к приемопередающей или приемной антенне таким образом, чтобы центр масс объекта совпадал бы с центром антенны, то $\dot{\Psi}_m$ изменится на величину $\Delta\dot{\Psi}_m = \dot{\Psi}_{m1} - \dot{\Psi}_{m0}$, где $\dot{\Psi}_{m1}$ - комплексная амплитуда потока магнитной индукции приемопередающей или приемной антенны при поднесенном объекте (частота в процессе поднесения объекта не изменяется).

$\Delta\dot{\Psi}_m$ будет зависеть от местоположения и ориентации объекта, его размеров и формы, а также от электромагнитных характеристик вещества объекта.

В табл. 1 приведены эффекты, возникающие в вихретоковых устройствах обнаружения, классификация которых основана на угле поворота вектора $\Delta\dot{\Psi}_m$ относительно опорного вектора $\dot{\Psi}_{m0}$ в зависимости от электромагнитных характеристик вещества объекта, его размеров и формы. На практике эффекты могут иметь место в чистом виде или в различных комбинациях.

Таблица 1

Эффекты, возникающие в вихретоковых устройствах обнаружения

| № | Электромагнитные характеристики вещества объекта | Типы эффектов | Изменение магнитного потока | |
|---|--|--------------------------------------|--|--|
| | | | $\text{Re}(\Delta\dot{\Psi}_m)$ | $\text{Im}(\Delta\dot{\Psi}_m)$ |
| 1 | $\sigma > \sigma_{zp} = 10^6 \text{ См/м}^1, \mu = 1, \varepsilon = 1$ | Сильный «диамагнитный» ²⁾ | $\text{Re}(\Delta\dot{\Psi}_{m[1]}) < 0$ | $\text{Im}(\Delta\dot{\Psi}_{m[1]}) < 0,$ $\frac{ \text{Im}(\Delta\dot{\Psi}_{m[1]}) }{ \text{Re}(\Delta\dot{\Psi}_{m[1]}) } \ll 1$ |
| 2 | $0 < \sigma < \sigma_{zp} = 10^6 \text{ См/м}, \mu = 1, \varepsilon = 1$ | «Диаманитный» | $\text{Re}(\Delta\dot{\Psi}_{m[2]}) < 0$ | $\text{Im}(\Delta\dot{\Psi}_{m[2]}) < 0$ |
| 3 | $\mu \gg 1, \sigma = 0, \varepsilon = 1$ | «Магнитный» ³⁾ | $\text{Re}(\Delta\dot{\Psi}_{m[3]}) > 0$ | $\text{Im}(\Delta\dot{\Psi}_{m[3]}) = 0$ |
| 4 | $\sigma = 0, \varepsilon > 1, \mu = 1$ | «Диэлектрический» ⁴⁾ | $\text{Re}(\Delta\dot{\Psi}_{m[4]}) > 0$ | $\text{Im}(\Delta\dot{\Psi}_{m[4]}) = 0$ |

Примечания

1) Значение $\sigma_{zp} = 10^6 \text{ См/м}$ в качестве границы выбрано условно и соответствует удельной электропроводности нихрома (подавляющее большинство металлов и их сплавов имеет большую электропроводность).

2) Следует отличать от диамагнитного эффекта в теории магнетизма.

3) «Магнитный» эффект не является вихретоковым, однако проявляется в вихретоковых устройствах обнаружения.

4) Следует отличать от диаманитного эффекта в теории диэлектриков.

На рис. 1 показана векторная диаграмма для случая $\Delta\dot{\Psi}_m \ll \dot{\Psi}_{m0}$, иллюстрирующая эффекты, представленные в табл. 1.

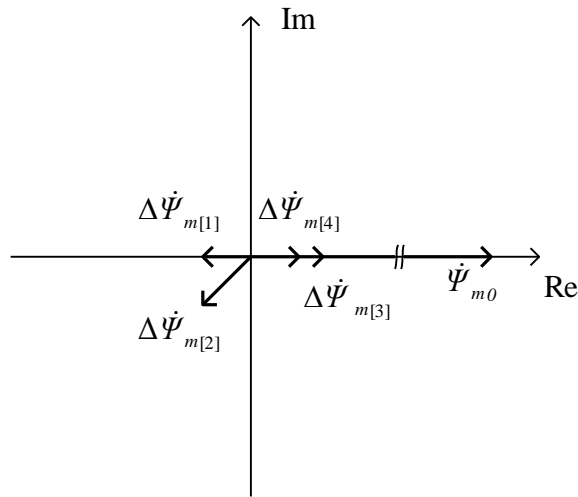


Рис. 1. Векторная диаграмма, иллюстрирующая эффекты, представленные в табл. 1

Возникновение вышеприведенных эффектов проиллюстрировано на примерах ферромагнитного шара ($\mu \gg 1$, $\sigma = 0$, $\varepsilon = 1$) и круговой рамки ($\mu = 1$, $\sigma \gg 0$), имеющих малые размеры по сравнению с размерами магнитной антенны, и вызывающие малое изменение $\Delta \dot{\Psi}_m$ ($\Delta \Psi_m \ll \Psi_{m0}$).

Сформулирован принцип создания вихретоковых устройств обнаружения слабопроводящих объектов на примере, когда обнаруживаемым объектом является круговая замкнутая рамка. Хорошо известна электротехническая формула

$$\text{Re}(\Delta Z) = \frac{\omega^2 M^2 R_n}{R_n^2 + (\omega L_n)^2}, \quad (1)$$

показывающая вносимое активное сопротивление в магнитную антенну круговой замкнутой рамкой на частоте ω , где $R_n = \frac{D}{d} \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \rho}{2}}$ - активное сопротивление рамки

при сильном скин-эффекте: $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}} \ll \frac{d}{2}$; L_n - индуктивность рамки; M - взаимная индуктивность магнитной антенны и рамки; D - диаметр рамки; d - диаметр провода рамки; ρ - удельное сопротивление материала, из которого изготовлена рамка.

На рис. 2 представлена эквивалентная электротехническая схема взаимодействия магнитной антенны и рамки.

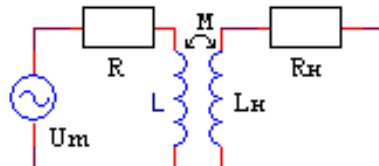


Рис. 2. Эквивалентная электротехническая схема взаимодействия магнитной антенны и рамки (R , L - активное сопротивление и индуктивность магнитной антенны соответственно)

Для слабопроводящей рамки ($R_n \gg \omega L_n$) формула (1) запишется в виде

$$\operatorname{Re}(\Delta Z) = \frac{\omega^2 M^2}{R_n},$$

из которой видно, что вносимое активное сопротивление пропорционально квадрату частоты. Таким образом, для надежного обнаружения слабопроводящего объекта целесообразно выбирать высокую рабочую частоту.

Столь, казалось бы, очевидный факт фактически до сих пор не использовался. Иными словами, на сегодняшний день практически нет устройств обнаружения слабопроводящих объектов, работающих с использованием вихретокового метода.

Часто задача обнаружения слабопроводящего объекта усложняется тем, что его требуется обнаруживать на фоне сильнопроводящих объектов, создающих пассивные помехи.

Вносимое реактивное сопротивление в магнитную антенну круговой замкнутой рамкой на частоте ω :

$$\operatorname{Im}(\Delta Z) = \frac{\omega^2 M^2 \cdot \omega L_n}{R_n^2 + (\omega L_n)^2}. \quad (2)$$

Для сильнопроводящей и слабопроводящей рамок, имеющих одинаковые геометрические размеры (D и d), индуктивности L_n отличаться будут несильно. Поэтому знаменатель в формуле (2) для слабопроводящей ($R_n \gg \omega L_n$) рамки будет существенно больше, чем для сильнопроводящей ($R_n \ll \omega L_n$) рамки. Следовательно, вносимое реактивное сопротивление для сильнопроводящей рамки будет существенно больше, чем для слабопроводящей. Таким образом, для обнаружения слабопроводящего объекта на фоне сильнопроводящего целесообразно использовать измерение суммарного вносимого реактивного сопротивления для вычисления поправки, которую затем нужно будет вычитать из суммарного вносимого активного сопротивления.

Кроме этого, для сильнопроводящей рамки вносимое активное сопротивление от частоты зависит слабо:

$$\operatorname{Re}(\Delta Z) = \frac{M^2 \frac{D}{d} \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \rho}{2}}}{L_n^2}.$$

На практике сильное увеличение рабочей частоты ведет к росту паразитных электромагнитных эффектов, связанных с емкостным эффектом, взаимодействием поля антенны с окружающими ее длинными проводами (радиочастотным кабелем ЛВС, электропроводкой, телефонным кабелем и т.п.). Помимо этого, возможно возникновение пучностей чувствительности в удаленных от антенны местах.

Таким образом, можно сформулировать принцип создания вихретоковых устройств обнаружения слабопроводящих объектов в диэлектрических средах, в том числе на фоне неподвижных и движущихся металлических объектов, заключающийся в повышении рабочей частоты до тех пор, пока не будут сильно проявляться паразитные электромагнитные эффекты, маскирующие полезный сигнал, и использовании

второго измерительного канала для компенсации влияния помех от высокопроводящих объектов.

Этот же принцип годится и для создания вихретоковых устройств обнаружения диэлектрических объектов в слабопроводящих средах с учетом того, что диэлектрический объект представляет собой электромагнитную неоднородность в слабопроводящей среде.

Для разработки вихретоковых устройств обнаружения нового типа предложена следующая методика.

1) Выбрать метод измерения по виду временной зависимости характеристик электромагнитного поля (импульсный или гармонический). На этапе исследования возможности решения поставленной задачи вихретоковым методом рекомендуется использовать гармонический метод в силу простоты его реализации на высокой частоте.

2) Выбрать метод измерения по типу преобразования сигнала измерительной информации (трансформаторный или параметрический). Если позволяет конфигурация контролируемого объема, то лучше использовать параметрический метод, поскольку в этом случае нужна одна приемопередающая антенна.

3) Выбрать метод измерения по виду информативных параметров сигнала измерительной информации (амплитудно-частотный, амплитудно-фазовый и др.). Применение амплитудно-фазового метода дает возможность работать на частотах, близких к собственной резонансной частоте магнитной антенны, а также использовать узкополосный фильтр, что увеличивает устойчивость к активным эфирным помехам, однако амплитудно-частотный метод измерения проще в схемотехнической реализации.

4) Выявить источники значимых активных и пассивных помех и предложить меры по их ослаблению. Рекомендуется использовать дополнительный измерительный канал для компенсации пассивной помехи.

5) Выбрать рабочую частоту или диапазон частот (см. принцип создания);

6) Выбрать конфигурацию, габаритные размеры и число витков магнитной антенны (или магнитных антенн). Необходимо рассчитать магнитное поле в контролируемом объеме для оптимального выбора количества витков у передающей и приемной антенн с целью минимизации неоднородности выходного сигнала в контролируемом объеме.

Далее в диссертации приведен ряд принципиальных схем автогенераторов, у которых в качестве катушки индуктивности могут выступать магнитные антенны больших размеров (с линейными размерами десятые доли и единицы метров). Рассмотрены некоторые особенности этих автогенераторов, применяемых в качестве измерительных, часть из которых нашла применение в разработанных соискателем вихретоковых устройствах обнаружения, рассматриваемых в диссертации.

Подробно описан и исследован разработанный автором способ увеличения сопротивления, вносимого в магнитную антенну объектом, за счет расположения вблизи антенны дополнительного последовательного колебательного контура, у которого индуктивным элементом является рамка таких же размеров, как и антенна. Резонансная частота дополнительного контура настраивается немного выше рабочей частоты автогенератора f_0 .

Приведен расчет активного и реактивного сопротивлений, вносимых в магнитную антенну тестовой рамкой малых размеров, имитирующей подносимый объект,

для различных значений емкости в дополнительном контуре. Показано, что с увеличением емкости в дополнительном контуре и приближением сверху резонансной частоты дополнительного контура к частоте автогенератора активное и реактивное сопротивления, вносимые в магнитную антенну тестовой рамкой, увеличиваются. Физически это связано с тем, что сопротивления, вносимые в антенну тестовой рамкой через дополнительный контур, в несколько раз больше, чем сопротивления, вносимые в антенну тестовой рамкой непосредственно. Негативным фактором, связанным с наличием дополнительного контура, является увеличение кратковременной нестабильности частоты автогенератора.

Приведены экспериментальные исследования данного способа для автогенераторов, выполненных на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером и общим стоком с колебательным контуром, содержащим магнитную антенну прямоугольной формы размерами $2,40 \times 1,10$ м. В качестве тестового объекта выступало тело человека. Представлены экспериментальные зависимости изменения частоты автогенераторов под действием тела человека от их рабочей частоты. Показано увеличение отношения «сигнал/шум» по частотному каналу для обоих автогенераторов в 2,7 раза.

Также приведены экспериментальные исследования автогенератора, выполненного на транзисторе, включенном по схеме с общим стоком колебательным контуром, содержащим магнитную антенну в виде прямоугольных витков, включенных последовательно, размерами $2,20 \times 1,00$ м и расстоянием между плоскостями витков $0,70$ м. Магнитная антенна была выполнена на внутренней жиле коаксиального кабеля марки РК-75. Индуктивным элементом дополнительного колебательного контура служила оплетка этого кабеля. Витки, образованные оплеткой, также соединялись последовательно, а их свободные концы замыкались *RC* цепочкой. В качестве объекта выступало тело человека. Показано увеличение отношения «сигнал/шум» по частотному каналу в 3,3 раза.

Рассмотрены три основных счетных метода измерения частоты и их погрешности.

Метод последовательного счета импульсов измеряемой частоты является наиболее простым для реализации. Однако, при уменьшении времени измерения Δt погрешность измерения частоты прямо пропорционально увеличивается, что в ряде устройств является недопустимым.

Второй счетный метод измерения частоты - заполнение временного интервала Δt импульсами эталонной частоты. При величине измеряемой частоты около $1,0$ МГц погрешность ее измерения может быть уменьшена на два порядка и более по сравнению с первым методом.

Третий счетный метод измерения частоты - «метод задержанных совпадений» (другая разновидность - нониусный метод). Этот метод имеет еще меньшую погрешность измерения частоты, а в ряде случаев – более простую реализацию, чем второй метод.

Приведены рекомендации, как следует выбирать метод измерения частоты для разрабатываемого вихретокового устройства обнаружения.

По всем трем методам были разработаны устройства измерения частоты, которые были использованы для исследования разрабатываемых устройств обнаружения, а также непосредственно вошли в их состав.

С третьей главы начинается непосредственное описание разработанных вихретоковых устройств обнаружения. В этой главе рассмотрено вихретоковое устройство обнаружения электромагнитных экранов электронной метки, выполненных из металлической фольги или высокоомной пленки. Оно относится к устройствам обнаружения второго типа (объект перемещается, а антенная система неподвижна).

В связи с вводом в мировой торговле принципа свободного доступа покупателей к товарам появилась потребность создания электронных систем, противодействующих увеличивающемуся в этом случае воровству товаров незаметными покупателями. Одним из эффективных средств противодействия кражам оказались радиочастотные противокражные системы. При их использовании товар, снабженный электронной меткой и неоплаченный при выносе из магазина, регистрируется противокражной системой, которая подает сигнал тревоги. Однако оказалось, что, оборачивая товар с электронной меткой металлической фольгой или высокоомной пленкой, которые экранируют электронную метку, можно блокировать работу противокражной системы.

Для детектирования электромагнитных экранов, образованных металлической фольгой или высокоомной пленкой, в которые могут быть завернуты товары при их проносе между антеннами противокражной системы на расстоянии от пола не больше высоты антенн, был разработан детектор экранов метки (ДЭМ), который также может использоваться в качестве металлодетектора (рис. 3).



Рис. 3. Макет ДЭМ, встроенный в радиочастотную систему (1, 2 – передающая и приемная антенны ДЭМ, 3, 4 – передающий и приемный блоки ДЭМ)

Высокоомная пленка представляет собой металлическое напыление толщиной 30...50 нм. Такая пленка не регистрируется обычными металлодетекторами, работающими на частотах единицы - десятки кГц. Однако, на частотах единицы мГц высокоомная пленка ведет себя, как металл: если ее напылить на пищевой пакет, то он станет способным экранировать электронную метку, представляющую собой последовательный колебательный LC контур, имеющий резонансную частоту более 1 МГц. В Европе имеет место массовое производство таких дешевых пакетов, предназначенных для транспортировки замороженных продуктов. Они представляют большую проблему для магазинов, использующих радиочастотные противокражные системы.

Приведена структурная схема ДЭМ, содержащая амплитудный и фазовый каналы, ее описание, выбор метода для решения задачи.

Приведен расчет изменения тока приемной антенны при внесении немагнитного шара в контролируемый объем ДЭМ. На основе этого расчета построены зависимости изменения амплитуды и фазы тока приемной антенны от расстояния между центром металлического ($\sigma = 2 \cdot 10^7$ См/м) и высокоомного ($\sigma = 2 \cdot 10^2$ См/м) шаров и центром приемной антенны при перемещении центра шара вдоль оси, проходящей через центры передающей и приемной антенн.

Показано, что металлический шар хорошо будет регистрироваться по амплитудному каналу, а высокоомный – по фазовому.

Приведены основные метрологические, технические и эксплуатационные характеристики ДЭМ.

Изучена проблема влияния фоновых электромагнитных полей на выходные сигналы ДЭМ и предложен способ уменьшения этого влияния.

Приведены осциллограммы преобразованных выходных сигналов фазового канала ДЭМ на пакет с высокоомным напылением, расположенный в различных ориентациях.

В четвертой главе рассмотрено разработанное вихретоковое поисковое устройство (ВПУ), являющееся представителем вихретоковых устройств обнаружения первого типа (рис. 4). ВПУ предназначено для обнаружения под снегом, песком, почвой различных объектов (например, таких как тело человека, вода, пустоты, металлические и неметаллические трубопроводы и т.п.) и других неоднородностей.

Приведена структурная схема ВПУ, содержащая амплитудный и частотный измерительный каналы, и ее описание. Приведены основные метрологические, технические и эксплуатационные характеристики ВПУ.

Приведено решение задачи о нахождении изменения внешнего однородного гармонически изменяющегося магнитного поля при внесении в него однородного шара с характеристиками вещества: $\mu = 1$, $\varepsilon \geq 1$, $\sigma \geq 0$. В литературе известно решение такой задачи лишь для случая, когда токи проводимости в шаре много больше токов смещения. Однако нам надо было решить задачу для общего случая, когда токи проводимости сравнимы с токами смещения.



Рис. 4. Вихретоковое поисковое устройство

На основе решения вышеприведенной задачи дана количественная оценка активного и реактивного сопротивлений, вносимых в магнитную антенну шаром, когда магнитная антенна является элементом колебательного контура автогенератора, и построены графики расчетных зависимостей этих сопротивлений от расстояния от плоскости рамки до центра шара.

При перемещении рамки оператором на высоте h над поверхностью земли вносимое сопротивление в рамку будет изменяться вследствие изменения электромагнитных характеристик грунта вдоль трассы поиска и изменения высоты h из-за вибрации рамки. Для оценки этих изменений была решена задача о нахождении сопротивления, вносимого в круговую рамку бесконечным полупространством, состоящим из однородного изотропного вещества.

В области электромагнитной дефектоскопии металлов подобная задача была решена, когда полупространство заполнено металлом, в котором токи проводимости много больше токов смещения. Однако, нам требовалось решить задачу для общего случая, когда токи проводимости сравнимы с токами смещения ($\varepsilon \geq 1$, $\mu \geq 1$, $\sigma \geq 0$).

На основе решения вышеприведенной задачи построены графики расчетных зависимостей активного и реактивного сопротивлений, вносимых в рамку полупространством, от характеристик полупространства и системы для случая, когда рамка является индуктивным элементом колебательного контура автогенератора.

Приведено описание «потенциального» электрического поля круговой рамки, порождающего «емкостной» эффект. Негативное влияние этого эффекта на выходные сигналы ВПУ может быть ослаблено за счет применения экранов. Приведены электротехнические характеристики неэкранированной разомкнутой круговой рамки, используемой в ВПУ.

Представлены шумовые полосы на выходе амплитудного канала ВПУ для неподвижной рамки и рамки, находящейся в руках оператора, из которых следует, что определяющей составляющей погрешности измерения сигналов является изменение высоты h от плоскости рамки до поверхности земли.

Приведены теоретические и экспериментальные графики зависимости выходного сигнала частотного канала ВПУ от высоты h . Вследствие наличия «емкостного» эффекта существует высота «перегиба» h^* , на которой градиент сигнала от земли равен нулю, и вблизи которой следует выбирать высоту переноса рамки оператором.

Приведены осциллограммы выходных сигналов ВПУ на различные объекты.

С переходом к неквазистационарному режиму работы ВПУ может быть использовано для обнаружения движущегося человека за непрозрачной (кирпичной, железобетонной) стеной.

В пятой главе рассмотрено решение проблемы регистрации piggybacking событий в системах управления физическим доступом (проход по одной карте доступа в зону с ограниченным доступом помимо хозяина карты посторонних людей). Описано разработанное бесконтактное индукционное устройство для обнаружения человека, проходящего через дверной проем (БИУП), относящееся к вихретоковым устройствам обнаружения второго типа. На сегодняшний день большинство современных отечественных и зарубежных систем управления доступом не способны в автоматическом режиме регистрировать piggybacking события. Использование оптического луча позволяет регистрировать такие события только в том случае, когда люди идут на неко-

тором расстоянии друг от друга. Однако, оптический луч «бессилен», когда люди идут прижавшись друг к другу.

Введены понятия магнитного веса физического тела и относительного магнитного веса тела человека для плоской магнитной антенны, которые использовались при описании метрологических характеристик БИУП.

БИУП предназначен для работы в составе модуля «Порог», которым оборудуется дверь (рис. 5). При проходе сотрудника через дверной проем после поднесения им своей карты к считывателю, БИУП измеряет магнитный вес сотрудника и сравнивает с базовым магнитным весом, заранее записанным для этого сотрудника в базу данных. Если измеренный магнитный вес попадает в зону допуска для базового магнитного веса данного сотрудника, то делается вывод, что прошел один человек. Если измеренный магнитный вес превышает верхнюю границу зоны допуска для базового магнитного веса данного сотрудника, то делается вывод, что прошло более одного человека или прошел другой (более «тяжелый») человек, и контроллер БИУП формирует сигнал тревоги.



Слитный проход двух человек – наиболее сложный случай для автоматической регистрации

Рис. 5. Модуль «Порог», установленный на металлической и неметаллической дверях

Приведена структурная схема БИУП, содержащая два измерительных канала, и ее описание. Приведены основные метрологические, технические и эксплуатационные характеристики БИУП.

Для понимания и количественной оценки характеристик физического явления, происходящего при взаимодействии тела человека с магнитным полем, создаваемым током антенны прямоугольной формы, приведены графики расчетных зависимостей сопротивлений, вносимых в магнитную антенну шаром, от средних по объему тела человека удельной электропроводности и относительной диэлектрической проницаемости.

Для оценки нестабильности магнитного веса тела человека во времени (в течение дня, недели, месяца, года), проведен обзор литературы на предмет влияния основных физиологических процессов в организме на электромагнитные характеристики тканей человека. Показана взаимосвязь отклонений магнитного веса тела человека с аномалиями его физиологического состояния. Сделан вывод, что нестабильность магнитного веса человека, связанная с нестабильностью электромагнитных характеристик его тела, является приемлемой для решения задачи по регистрации piggybacking событий.

Особенно актуальной задачей является установка БИУП на железную дверь или вблизи подвижных металлических контуров и листов больших площадей, поскольку средства заграждения и ограничения прохода часто делаются из металла. Оказывается, что применение двухпараметрового метода измерения позволяет обнаруживать тело человека на фоне, например, движущейся металлической двери. Для выбора оптимальных параметров БИУП представлены графики расчетных зависимостей активного и реактивного сопротивлений, вносимых в прямоугольную рамку шаром и железным полупространством, от частоты. Дана оценка составляющей погрешности измерения выходного сигнала первого канала БИУП на тело человека, обусловленная влиянием железной двери.

Приведены электротехнические характеристики магнитных антенн, используемых в БИУП. Исследовано влияние фоновых электромагнитных полей на стабильность выходных сигналов БИУП и предложены меры по минимизации этого влияния. Приведены осциллограммы преобразованного выходного сигнала первого канала БИУП на тело человека нормального телосложения.

На базе модуля «Порог» для оборудования одной двери на сегодняшний день разработан модуль «Порог-П» для оборудования шлюз-проходных, являющихся недорогими аналогами (в 5...8 раз дешевле) шлюзовых пропускных кабин, которые позволяют **предотвращать** piggybacking события в автоматическом режиме.

В шестой главе продолжено рассмотрение решения проблемы регистрации piggybacking событий в системах управления физическим доступом. На этот раз задачей явилась разработка бесконтактного устройства для оснащения пропускных кабин, предназначенных для автоматического предотвращения piggybacking событий. Для решения этой задачи было разработано бесконтактное индукционное устройство (БИУ) для обнаружения человека, проходящего через пропускную кабину, являющееся вихретоковым устройством обнаружения второго типа.

Приведен обзор существующих на сегодняшний день устройств для регистрации piggybacking событий в пропускных кабинах, указаны их недостатки, следствием которых явилось предложение разработки бесконтактного устройства, работающего на новом принципе.

Приведена структурная схема БИУ, содержащая два измерительных канала, и ее описание.

Работа БИУ, также как и БИУП, базируется на понятии магнитного веса тела человека. По аналогии с магнитным весом для плоской магнитной антенны было введено понятие магнитного веса тела человека для магнитной антенны, состоящей из двух витков, расположенных в параллельных плоскостях.

Приведены основные метрологические, технические и эксплуатационные характеристики БИУ. Одним из основных преимуществ БИУ по сравнению с БИУП является существенно более высокая однородность магнитного поля вдоль оси витков, что ведет к уменьшению погрешности измерения магнитного веса двух человек, когда они идут вплотную друг за другом.

Приведено решение задачи о нахождении магнитного поля прямоугольных витков, лежащих в параллельных плоскостях. Для витков с размерами $2,20 \times 1,00$ м и расстоянием между их плоскостями $0,70$ м приведены графики зависимостей амплитуд проекций вектора магнитной индукции на плоскости и в объеме от координат.

Проведены обширные наблюдения за стабильностью магнитных весов людей во времени. Представлены и проанализированы результаты статистической обработки измерительных данных. Рассчитаны вероятности «ошибки первого рода» $P1$ – ложное блокирование хозяина карты и «ошибки второго рода» $P2$ – пропуск по одной карте двух человек.

Приведены осциллограммы преобразованного выходного сигнала первого канала БИУ на тело человека нормального телосложения.

В заключении подведены итоги диссертации. Основным научным результатом диссертации является развитие вихретокового метода на случай обнаружения слабопроводящих объектов в диэлектрических и слабопроводящих средах, в том числе на фоне неподвижных и движущихся металлических объектов, и создание ряда новых устройств: детектора экранов метки (ДЭМ), вихретокового поискового устройства (ВПУ), бесконтактного индукционного устройства для дверного проема (БИУП), бесконтактного индукционного устройством для пропускной кабины (БИУ). Работа этих устройств основана на вихретоковом методе, модифицированном автором.

Основным теоретическим результатом диссертации является предложенная методика создания вихретоковых устройств обнаружения слабопроводящих объектов в слабопроводящих и диэлектрических средах, в том числе на фоне неподвижных и движущихся металлических предметов.

В процессе выполнения диссертации были получены следующие частные теоретические результаты.

1) Предложена классификация эффектов в вихретоковых устройствах обнаружения по изменению магнитного потока через «приемную антенну».

2) Представлен расчет изменения тока приемной антенны прямоугольной формы под действием магнитного поля, создаваемого токами Фуко, развивающимися в слабопроводящем шаре, при помещении шара в магнитное поле передающей антенны прямоугольной формы.

3) Обобщен расчет изменения внешнего однородного магнитного поля под действием вносимого шара при условии, когда токи смещения в шаре много меньше токов проводимости, на случай, когда токи смещения в шаре по величине сравнимы с токами проводимости.

4) Обобщен расчет сопротивления, вносимого в круговую рамку полупространством, расположенным «на расстоянии h » от плоскости рамки при условии, когда токи

смещения в полупространстве много меньше токов проводимости, на случай, когда токи смещения в полупространстве сравнимы с токами проводимости.

5) Проведен расчет магнитного поля антенны, выполненной из двух отстоящих друг от друга прямоугольных витков.

6) Введено понятие магнитного веса физического тела для плоского контура и контура в форме двух плоскопараллельных витков.

7) Введено понятие относительного магнитного веса тела человека для плоской магнитной антенны конечных размеров и магнитной антенны в форме двух плоскопараллельных витков конечных размеров, используемое в системах управления доступом.

8) Проведен анализ факторов, влияющих на стабильность магнитного веса тела человека.

9) Предложена методика выбора зоны допуска для магнитного веса человека.

Основным практическим результатом диссертации являются разработанные вихретоковые устройства обнаружения: детектор экранов метки (ДЭМ), вихретоковое поисковое устройство (ВПУ), бесконтактное индукционное устройство для дверного проема (БИУП), бесконтактное индукционное устройство для пропускной кабины (БИУ).

В процессе выполнения диссертации были получены следующие частные практические результаты.

1) Предложен и исследован способ увеличения вносимого объектом сопротивления в магнитную антенну за счет использования дополнительного колебательного контура.

2) Проведены обширные долговременные наблюдения за стабильностью магнитных весов людей во времени; результаты обработки полученных данных показывают, что стабильность магнитного веса достаточно высока для надежного функционирования охранных систем, базирующихся на этом понятии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Устройство обнаружения слитного прохода через дверной проем нескольких человек. Патент РФ на полезную модель № 66086 / Кудрявцев О.Б. - 2007.

2. Кудрявцев О.Б. Способ обнаружения слабопроводящих объектов вихретоковым методом // Датчики и системы. - 2007. - №2. - С. 16 - 19.

3. Кудрявцев О.Б. Исследования возможности создания вихретокового устройства обнаружения взрывчатого вещества на теле человека // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. науч. тр. в 16 томах. - М.: МИФИ, 2007. Т. 9. С. 72 - 75.

4. Кудрявцев О.Б. Устройство обнаружения движущегося объекта (человека) за непрозрачными средами // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. науч. тр. в 16 томах. - М.: МИФИ, 2006. Т. 1. С. 223 - 226.

5. Панин В.В., Кудрявцев О.Б. Шлюз с автоматизированным досмотром проходящего человека // Научная сессия МИФИ-2005. Сб. науч. тр. в 15 томах. - М.: МИФИ, 2005. Т.1. С. 282 - 283.

6. Панин В.В., Кудрявцев О.Б. Проблема стандартизации измерителей магнитного веса тела человека // Научная сессия МИФИ-2004. Сб. науч. тр. в 15 томах. - М.: МИФИ, 2004. Т. 1. С. 231 - 232.

7. Панин В.В., Кудрявцев О.Б., Ширяев А.В.. Индукционное устройство обнаружения объектов // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. науч. тр. в 14 томах. - М.: МИФИ, 2003. Т.1. С. 213 - 214.
8. Панин В.В., Кудрявцев О.Б. Построение автоматизированной шлюз-проходной // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. науч. тр. в 14 томах. - М.: МИФИ, 2003. Т. 1. С. 211 - 212.
9. Панин В.В., Кудрявцев О.Б. Концепция «магнитного веса» тела человека и созданные на ее основе anti-piggybacking устройства для систем контроля доступа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2002. - №4. - С. 59 - 64.
10. Панин В.В., Кудрявцев О.Б. Anti-piggybacking устройства для систем контроля доступа, основанные на концепции «магнитного веса» тела человека // Научная сессия МИФИ-2002. Сб. науч. тр. в 14 томах. - М.: МИФИ, 2002. Т. 1. С. 217 - 218.
11. Панин В.В., Кудрявцев О.Б. Индукционное поисковое устройство // Научная сессия МИФИ-2001. Сб. науч. тр. в 14 томах. - М.: МИФИ, 2001. Т. 1. С. 160 - 161.
12. Панин В.В., Кудрявцев О.Б., Азаров Д.А. Электромагнитное устройство регистрации piggybacking и passbacking- событий при проходе людей через дверь или дверной проем // Научная сессия МИФИ-2000. Сб. науч. тр. в 14 томах. - М.: МИФИ, 2000. Т. 1. С. 194 - 195.
13. Гусева Н.Н., Кудрявцев О.Б., Панин В.В. Бесконтактное индукционное устройство обнаружения человека // Научная сессия МИФИ-1999. Сб. науч. тр. в 14 томах. - М.: МИФИ, 1999. Т. 6. С. 192 - 193.
14. Панин В.В., Кудрявцев О.Б., Гусева Н.Н. Индукционное устройство обнаружения человека // Приборы и системы управления. - 1998. - №9. - С. 26 -29.
15. Панин В.В., Кудрявцев О.Б. Индукционное устройство обнаружения металлических предметов // Тезисы докладов на X научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». - Гурзуф, 1998. Т. 1.
16. Панин В.В., Кудрявцев О.Б., Паршин В.В., Гусева Н.Н. Использование индукционного метода в устройствах обнаружения тел различной физической природы // Технологическое оборудование и материалы. - 1998. - №4. - С. 39 - 40.
17. Индукционный преобразователь для устройства обнаружения скрытых объектов. Патент РФ на изобретение № 2085971 / Зубовский Н.Б., Кудрявцев О.Б., Михайлов В.Н. и др. - 1997. 4 с.: ил.
18. Панин В.В., Кудрявцев О.Б. Измерительная система локации неоднородностей электромагнитных материальных характеристик сред // Тезисы докладов на VIII научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». - Гурзуф, 1996. Т. 2. С. 147 - 149.