

ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Смирный Михаил Фёдорович

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ  
СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАНСПОРТА

Специальность 05.22.12 - промышленный транспорт

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Луганск 1995

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00755360 (Q)

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Восточнoукраинском государственном университете.

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор Ульшин В.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Губенко В.К.

доктор технических наук, профессор Загарий Г.И.

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент  
НАН Украины Силаев В.И.

Ведущее предприятие - Луганскгипрошахт

Защита состоится " 25 " января 1996 года в 14 часов  
на заседании специализированного учёного совета Д 18.02.02  
при Восточнoукраинском государственном университете по ад-  
ресу: 348034, г. Луганск, кв. Молодёжный, 20а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке уни-  
верситета.

Автореферат разослан " 21 " декабря 1995 года.

Отзывы на автореферат просим присылать по адресу уни-  
верситета.

Учёный секретарь  
специализированного учёного совета  
доктор технических наук, профессор

  
Ульшин В.А.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОБЩЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ  
РАБОТЫ, АКТУАЛЬНОСТИ И СТЕПЕНИ ИССЛЕДОВАННОСТИ  
ТЕМАТИКИ ДИССЕРТАЦИИ

Сокращение потерь основного производства во многом зависит от организации работы промышленного транспорта, поскольку он органически связан с технологическим процессом предприятия.

К транспорту промышленных предприятий должны предъявляться всё более высокие требования по качеству его работы: повышению пропускной способности, ритмичности подачи транспортных средств, снижению себестоимости перевозок, экономии материальных и топливно-энергетических ресурсов, повышению производительности труда и безопасности движения. Улучшение приведенных показателей невозможно осуществить без разработки и внедрения высокоэффективных средств и систем автоматизации, так как существующие системы имеют ограниченные функциональные возможности, построены на устаревшей элементной базе, а их средства отбора первичной информации из-за сложных условий эксплуатации имеют низкую надёжность.

При решении проблем автоматизации на промышленном транспорте необходимо учитывать специфические особенности транспортной технологии, а именно: транспортная сеть рассредоточена на большой территории и состоит из разнообразных объектов управления, что требует передачи по каналам связи значительного объёма информации; поскольку размещение элементов транспортной системы непрерывно меняется, необходима высокая частота передачи данных, снимаемых с подвижных единиц; имеются большие уклоны, малые радиусы кривых, короткие расстояния перевозок; на путь и его верхнее строение прикладывается большая нагрузка. К характерным экстремальным усло-

виям работы промышленного транспорта следует отнести вредные воздействия на аппаратуру управления резких перепадов температуры, повышенной запылённости, влажности, вибраций, электромагнитных помех. Это вызывает значительные трудности в создании и эксплуатации современных систем управления и особенно их устройств автоматического ввода первичной информации.

Специфика работы промышленного транспорта, разнообразие принципов функционирования транспортных систем и их элементов обуславливают необходимость разработки унифицированных рядов надёжных первичных преобразователей. Унификация должна достигаться метрологической, энергетической, эксплуатационной и конструктивной совместимостью с системами автоматизации, модульным построением их схем электронного обременения. Такая единая аппаратная основа позволит в перспективе создавать системы с качественно новыми характеристиками.

Сопоставительный анализ первичных преобразователей, используемых на промышленном транспорте, показал, что в тяжёлых условиях работы предпочтение следует отдать магнитометрическим преобразователям, представляющим собой сочетание источника информационного магнитного поля и магнитоизмерительного чувствительного элемента. Их преимущества состоят в высокой надёжности, универсальности, стабильности параметров, простоте конструкции, высокой чувствительности, низком энергопотреблении, бесконтактности.

Однако применение на транспорте магнитометрических преобразователей, заимствованных из аппаратуры общего назначения, не удовлетворяет критериям надёжности, точности, помехозащищённости. Отсутствие научных основ построения и методологии их применения на транспорте сдерживает конструирование и внедрение эффективных систем автоматизации. Поэтому

исследования данной проблемы, требующей своего решения, являются актуальными.

Степень исследованности тематики диссертации заключается в следующем. Существующий низкий уровень унификации систем автоматизации промышленного транспорта, недостаточное использование микропроцессорной техники, низкая надёжность средств отбора информации приводят к необоснованному усложнению аппаратуры, увеличению массо-габаритных показателей, снижению срока службы как средств автоматизации, так и транспортной техники. Принципы построения систем прежде всего из-за несовершенства датчиков не обеспечивают гибкости и адекватности обработки заданных законов управления. Часть систем автоматизации работает по разомкнутой схеме, вследствие чего измерительная информация, получаемая от ненадёжных первичных преобразователей, в дальнейшем не корректируется. Это ухудшает точностные параметры систем. Даже в тех случаях, когда осуществляется коррекция характеристик измерительных преобразователей посредством структурных и алгоритмических усовершенствований вторичной электронной аппаратуры, имеются пределы улучшения систем автоматизации в целом из-за неустойчивой работы датчиков в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Результаты известных теоретических исследований магнитных систем первичных преобразователей, выполненных в виде катушек с токами, постоянных магнитов и магнитных меток, не позволяют в полной мере их синтезировать применительно к промышленному транспорту. Существующая теория феррозондов не описывает в общем виде их работу при действии информационных полей в широком диапазоне. Отсутствует метод цифровой магнитной записи информации на стальные конструкционные эле-

менты транспортных объектов, вследствие чего затруднен отбор информации с подвижных единиц. Отсутствует теория оптимальной фильтрации выходных сигналов феррозондов, что не позволяет реализовать все потенциальные возможности проектируемых систем. Схемотехника и алгоритмы обработки сигналов измерительной информации магнитометрических преобразователей ограничены частными решениями и не предусматривают безотказной работы систем автоматизации в экстремальных условиях эксплуатации транспорта.

#### КОНКРЕТНАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛИ

#### И ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является создание принципов построения магнитометрических преобразователей для систем автоматизации промышленного транспорта.

Поставленная цель определила следующие задачи исследования:

- разработка структуры обобщенного информационно-измерительного канала системы автоматизации промышленного транспорта на основе магнитометрических преобразователей;
- разработка теории магнитометрических преобразователей, адаптированных к условиям работы транспорта;
- проведение экспериментальных исследований магнитометрических преобразователей как звеньев систем автоматизации транспорта промышленных предприятий;
- разработка инженерных методик расчета основных параметров информационно-измерительных каналов транспортных систем автоматизации;
- создание и внедрение предложенных магнитометрических преобразователей на промышленном транспорте.

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО НАУЧНОЙ НОВИЗНЫ

Впервые осуществлён системный подход к анализу информационно-измерительных каналов систем автоматизации транспорта промышленных предприятий на основе магнитометрических преобразователей. Проведен теоретический анализ топографии информационных полей магнитных систем магнитометрических преобразователей, выполненных в виде градиентных круглых и прямоугольных катушек с токами, постоянных магнитов, локально намагниченных участков ферромагнитных тел; предложена методика синтеза оптимальных магнитных систем, что позволило значительно расширить область применения их на транспорте. Разработана теория феррозондовых преобразователей, рекомендуемых для внедрения на промышленном транспорте. Предложен, теоретически обоснован и экспериментально проверен метод магнитной записи цифровой информации, обеспечивший благодаря считыванию феррозондами объёмной сигналограммы с массивного магнитносителя значительное повышение плотности записи и помехозащищённости средств управления. Теоретически проанализированы поля сигналограмм универсальной идеализированной математической модели пары "неспециальный магнитноситель-феррозонд", что дало возможность выбирать наиболее целесообразные конструкции первичных преобразователей. Разработана теория оптимальной фильтрации полезного сигнала ферроиндукционного преобразователя с использованием линейных сопряжённых фильтров, повышающей отношение сигнал/шум.

Практическая ценность исследования заключается в разработке научных основ построения магнитометрических преобразователей и применения их в информационных системах про-

мышленного транспорта. Полученные расчётные и экспериментальные данные позволяют решать следующие практические задачи: при проектировании систем автоматизации обоснованно выбирать соответствующую структуру магнитометрического преобразователя с заданными метрологическими характеристиками - тип и конструкцию источника информационного поля, а также магниточувствительного элемента с генератором возбуждения и схемой обработки сигнала; применять инженерные методики расчёта основных параметров измерительных преобразователей; использовать рекомендации, разработанные алгоритмы управления транспортными средствами, составные части и схмотехнические решения при создании новой техники с уникальными функциональными возможностями.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ РЕАЛИЗАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК

Результаты выполненных научных разработок и исследований внедрены и используются:

- Всероссийским научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (Россия, г. Москва) при создании системы магнитного кодирования для автоматизации управления путевыми машинами ВПО-3000;

- заводом "Гность" (г. Краснодон) при эксплуатации полуавтоматического размагничивающего устройства УР-I, цифрового феррозондового прибора ФК-I для контроля параметров деталей реле железнодорожной автоматики, при разработке которых использована методика расчёта передаточных характеристик феррозондов с импульсным возбуждением, работающих в достаточно сильных магнитных полях;

- литейно-механическим заводом (г. Луганск) при эксплуатации микропроцессорной системы идентификации и учёта пе-

ремещающихся радиаторов УУРС-I, при проектировании которой применена методика выбора зазоров кодоносители - датчики;

- Конструкторским бюро автоматических линий (г. Луганск) при создании подвесного конвейера с весоизмерительными устройствами, реализованными на основе предложенных магнитных систем;

- заводом "Аврора" (Россия, г. Волгоград) при эксплуатации устройства для точного позиционирования вращающегося механизма роторного весодозатора, в котором применены помохоустойчивые импульсные феррозонды с синхронными детекторами.

Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований по теме диссертации составляет 12,2 млн. крб. в ценах 1992 года.

Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, используются в учебном процессе при обучении студентов по специальностям 21.03 и 15.04 в Восточноукраинском государственном университете.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АПРОВАЦИИ И ПУБЛИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, СТРУКТУРЕ И ОБЪЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Результаты исследований доложены, обсуждены и получили одобрение на научно-технических конференциях Восточноукраинского государственного университета (1975...1994 г.г.); республиканской научно-технической конференции "Научные основы проектирования машин и автоматизации производственных процессов" (Луганск, 1975 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Достижения и перспективы развития технической кибернетики" (Киев, 1975 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в технологии, механизации и автоматизации сборочных работ в машиностроении"

Москва, 1976 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в программном управлении машинами" (Одесса, 1977 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы комплексной автоматизации производства в машиностроении" (Ереван, 1988 г.); региональной научно-технической конференции "Проблемы контроля и управления автоматических роторных линий" (Луганск, 1989 г.); республиканском семинаре "Технология изготовления и сборки деталей в условиях роторно-конвейерного производства" (Луганск, 1990 г.); республиканской конференции "Ресурсосберегающие технологии в механосборочном производстве" (Днепропетровск, 1990 г.); республиканской конференции "Обеспечение точности механической обработки в автоматизированном производстве" (Пенза, 1990 г.); республиканской конференции "Автоматизация и диагностика технологических процессов" (Луцк, 1990 г.).

Диссертационная работа в целом рассмотрена и одобрена на научно-технических семинарах Восточноукраинского государственного университета (1995 г.) и Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта (1995 г.).

По теме диссертации опубликовано 89 работ, в том числе 49 авторских свидетельств на патенты и изобретения.

Работа, состоящая из введения, 7 разделов, 128 рисунков, 6 таблиц, заключения, списка литературы из 151 наименования и приложений, включающих в себя акты внедрения научных положений, представлена на 353 страницах.

**ДЕКЛАРАЦИЯ КОНКРЕТНОГО ЛИЧНОГО ВКЛАДА ДИССЕРТАНТА  
В РАЗРАБОТКУ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ,  
КОТОРЫЕ ВНОСЯТСЯ НА ЗАЩИТУ**

Разработана структура обобщенного сквозного информационно-измерительного канала системы автоматизации

промышленного транспорта на основе магнитометрических преобразователей; разработаны математические модели и синтезированы с использованием вычислительной техники оптимальные магнитные системы первичных преобразователей в виде круглых и прямоугольных катушек с токами, постоянных магнитов и меток, нанесенных магнитными головками на ферромагнитные тела; предложен и теоретически обоснован метод цифровой магнитной записи информации на стальные путепроводы и конструктивы транспортных средств, обеспечивший значительное повышение разрешающей способности и помехозащищённости систем автоматизации транспорта; разработана теория и проведены экспериментальные исследования надёжных феррозондовых преобразователей, адаптированных к специфическим условиям транспорта промышленных предприятий; созданы методики инженерного расчёта основных параметров ферроиндукционных преобразователей, рекомендуемых при проектировании аппаратуры управления транспортными объектами; разработаны и исследованы оригинальные электронные устройства помехоустойчивой обработки выходных сигналов феррозондов применительно к промышленному транспорту.

Под научно-методическим руководством и при конкретном личном участии диссертанта разработан, изготовлен и внедрён ряд управляющих и информационно-измерительных систем транспортной техники.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОЛОГИИ, МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДМЕТА И ОБЪЕКТА

Решение поставленных в работе задач выполнено на основе теоретических и экспериментальных исследований. Наряду с моделированием задач на ЭМ, использован математический аппарат теории автоматического управления, линейных, нелинейных, нелинейно-параметрических дифференциальных уравнений,

преобразования Фурье, операционного исчисления, символического метода расчёта электрических цепей, классического метода расчёта потенциальных полей, теории информации, методов математической статистики. Экспериментальная проверка теоретических положений и новых технических решений проводилась на разработанной автором лабораторно-исследовательской установке с применением современных методов обработки данных экспериментов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается адекватностью разработанных математических моделей, принятых допущений и ограничений, анализом числовых значений, полученных при решении уравнений, многочисленными экспериментальными данными при физическом моделировании, а также практической реализацией систем автоматизации транспорта с использованием синтезированных магнитометрических преобразователей.

#### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ И ФОРМУЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ВЫВОДОВ, ВЫТЕКАЮЩИХ ИЗ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для промышленных предприятий одной из главных стала проблема повышения эффективности функционирования транспорта. Поэтому актуальным является проведение системных исследований промышленного транспорта. Большой вклад в развитие железнодорожного, непрерывного, автомобильного и других видов транспорта внесли М.П.Александров, Б.Ф.Брагин, М.Ф.Вериго, А.Л.Голубенко, В.К.Губенко, Р.Л.Зенков, А.Н.Коняев, С.М.Кущенко, О.Б.Маликов, А.Д.Смельченко, И.Г.Штокман и другие учёные и специалисты.

Работа промышленного транспорта во многом определяется уровнем автоматизации его управления. Необходима разработка

специализированных систем автоматизации, реализующих такие разнообразные функции, как опознавание подвижных объектов, контроль состояния и ремонт верхнего строения пути, автоматическое взвешивание грузов, измерение параметров и диагностика транспортных средств. Улучшение главных характеристик транспорта за счёт внедрения новых систем автоматизации может быть достигнуто лишь в том случае, если эти системы будут обеспечены необходимым объёмом достоверной информации, получаемой от надёжных первичных преобразователей. Для решения данного комплекса задач наиболее перспективным является использование магнитометрических преобразователей.

В создание общей теории, разработку и проектирование систем автоматизации, средств автоматики, информационно-измерительных устройств, магнитных средств отбора информации значительный вклад внесли Ю.В.Афанасьев, Ф.Т.Барвелл, В.К.Вестмайзе, А.А.Зори, Н.А.Пительгузов, М.А.Розенблат, Д.В.Соболев, Н.М.Тищенко, Д.Тьяден, М.И.Шмулевич, В.В.Яковенко, Р.И.Янус и другие.

Обзор известных методов теоретических исследований ферроиндукционных преобразователей, способов их возбуждения и выделения информационного сигнала, принципов построения феррозондовых датчиков общего назначения показал, что их технические возможности ещё далеко не исчерпаны. Требуется разработка теории, научных основ создания и методологии применения магнитометрических преобразователей в системах автоматизации промышленного транспорта с учётом специфики его эксплуатации.

В результате проведенного анализа существующей аппаратуры управления транспортной техникой предложена структура обобщённого информационного канала системы автоматизации на

основе магнитометрических преобразователей, представленная на рис. 1. Необходим системный подход к анализу и синтезу сквозных трактов систем и его составных частей, а именно: источников информационного магнитного поля, магнитоизмерительных преобразователей, генераторов возбуждения, схем обработки сигналов, средств вычислительной техники, реализованных на современной элементной базе. В реферируемой работе сформулирована цель и определены задачи исследования.

При проектировании магнитометрических датчиков перемещения и реализуемых на их основе датчиков веса, вибраций, угла поворота одной из основных задач является получение максимально возможного диапазона линейности. В качестве источников магнитного поля выбраны и проанализированы магнитные системы, выполненные в виде градиентных круглых и прямоугольных катушек с постоянными токами, одностержневых и С-образных постоянных магнитов и магнитных меток. Установлена зависимость целевой функции - наибольшей напряжённости магнитного поля на границе диапазона при заданной нелинейности датчика - от величины диапазона, связанного с магнитными и геометрическими параметрами источника поля.

Напряжённость поля на оси двух многослойных встречно включённых круглых катушек равна

$$\begin{aligned}
 H_r = & \frac{2I}{2(R_2 - R_1)l} \left[ \left( \frac{l}{2} + (r - \frac{l}{2} - d) \right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (l/2 + (r - l/2 - d))^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (l/2 + (r - l/2 - d))^2}} + \right. \\
 & + \left( \frac{l}{2} - (r - \frac{l}{2} - d) \right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (l/2 - (r - l/2 - d))^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (l/2 - (r - l/2 - d))^2}} - \\
 & - \left( \frac{l}{2} + (r + \frac{l}{2} + d) \right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (l/2 + (r + l/2 + d))^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (l/2 + (r + l/2 + d))^2}} - \\
 & \left. - \left( \frac{l}{2} - (r + \frac{l}{2} + d) \right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (l/2 - (r + l/2 + d))^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (l/2 - (r + l/2 + d))^2}} \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

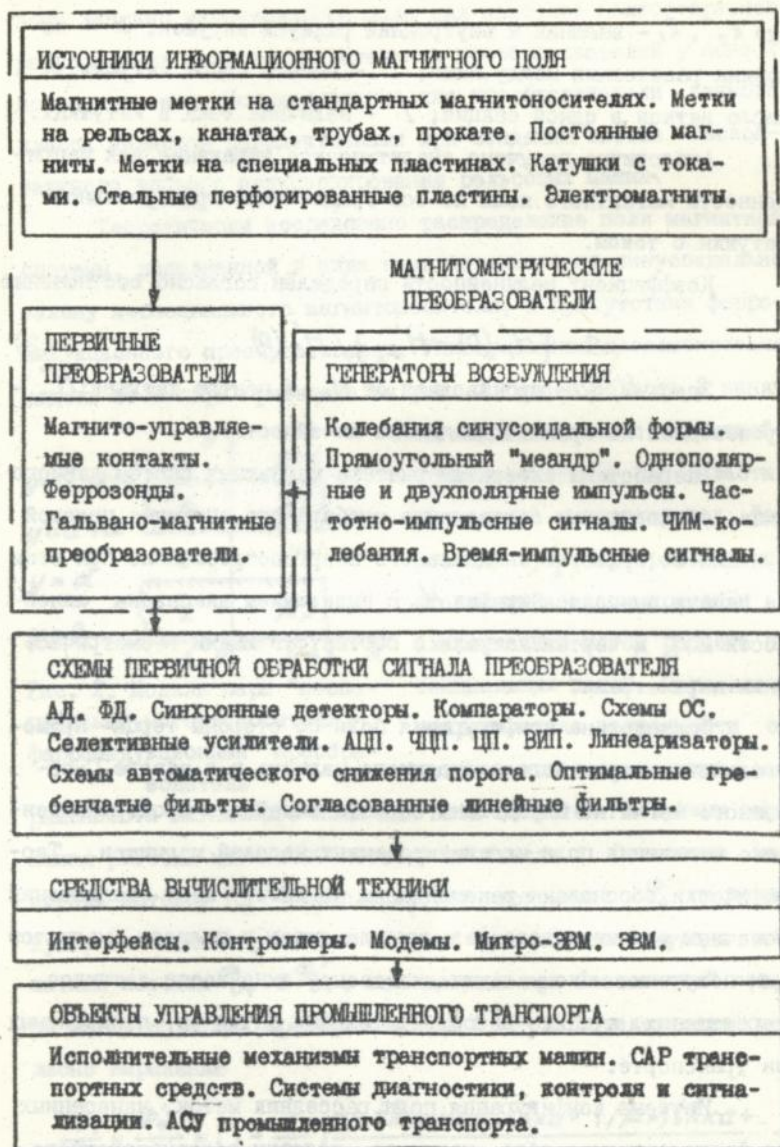


Рис. 1. Структура обобщенного информационного канала на основе магнитометрических преобразователей

где  $R_2$ ,  $R_1$  - внешний и внутренний радиусы катушек;  $d$  - половина расстояния между ними;  $l$  - высота одной катушки;  $w$  - число витков в одной секции;  $I$  - величина тока в катушках.

Аналогично получено аналитическое выражение для напряжённости магнитного поля на оси градиентной прямоугольной катушки с током.

Коэффициент нелинейности определён согласно соотношению

$$\varepsilon = [H'_r(0) - H'_{r\Delta}] / H'_r(0). \quad (2)$$

Здесь  $H'_r(0)$  - производная от  $H_r$  в центре катушек;  $H'_{r\Delta}$  - производная на границе диапазона линейности.

Разработаны алгоритмы синтеза магнитных систем данного типа, обеспечившие определение глобального оптимума целевой функции по критерию минимального энергопотребления. При этом на печать выводятся график  $H_r$  с выделением диапазона линейности  $2R_\Delta$  и чертёж катушки с соответствующими геометрическими параметрами.

Исследована конфигурация поля со стороны торца прямоугольного стержневого постоянного магнита и в зазоре С-образного магнита. Определены области линейного пространственного изменения поля идеализированных моделей магнитов. Теоретически обоснованы рекомендации по выбору мест размещения точечных магниточувствительных элементов у полюсов магнитов для получения максимальных диапазонов линейности датчиков перемещения, а также весоизмерительных датчиков, применяемых на транспорте.

Изучена конфигурация поля рассеяния меток, нанесенных на ферромагнитное тело, например, головку железнодорожного рельса, магнитными головками записи. Для колоколообразной формы остаточной перпендикулярной намагниченности магнитоносителя, аппроксимированного изотропным пластом, рассчитаны

зоны линейно изменяющегося поля для наиболее целесообразного расположения магнитоизмерительных преобразователей у поверхности носителя. Магнитометрические преобразователи данного класса являются перспективными при создании систем бесконтактного точного позиционирования рельсовых машин.

Теоретически исследовано распределение поля магнитной системы, выполненной в виде намагниченного по синусоидальному закону неспециального магнитоносителя, в присутствии ферроиндукционного преобразователя. Универсальная идеализированная модель этой пары приведена на рис. 2. Здесь область 2 занята

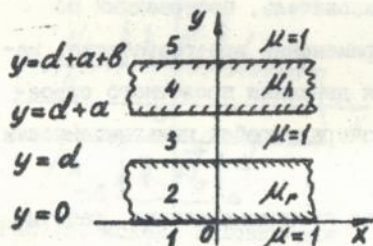


Рис. 2. Модель пары "неспециальный магнитоноситель - ферроиндукционный преобразователь"

магнитоносителем с магнитной проницаемостью  $\mu_r$ , в области 4 расположен магнитопровод феррозонда с  $\mu_h$ . При решении поставленной задачи применён классический метод расчёта потенциальных полей. Определены аналитические зависимости ортогональных составляющих напряжённости магнитного поля для пяти областей. Получены выражения рабочих магнитных потоков в области 4. Отношение магнитных потоков  $\Phi_4$  (продольная сигналограмма) и  $\Phi_4'$  (перпендикулярная сигналограмма) в области 4, к соответствующим магнитным потокам  $\Phi_{04}$  и  $\Phi_{04}'$ , вычисленным при бесконечной толщине магнитопровода преобразователя  $b \rightarrow \infty$ , определяется согласно выражению

$$\frac{\Phi_4}{\Phi_{04}} = \frac{\Phi_4'}{\Phi_{04}'} = (1 + \frac{\delta}{\mu_h}) \frac{1 + thka + (\mu_r thka + 1/\mu_r) thka + \dots}{1 + \frac{1}{\mu_r} [1 + thka + ((1/\mu_r) thka + \mu_r) thka]} \quad (3)$$

где  $D = 1 + tkka + (\mu_r tkka + \frac{1}{\mu_r} f [1 + tkka + (\frac{1}{\mu_r} tkka + \mu_r) tkka])$ ;  $\kappa = \frac{2\delta}{\lambda}$ ;

$$\delta = \frac{1}{chkb(\frac{1}{\mu_h} + tkkb)}; \quad f = \frac{1 + \frac{1}{\mu_h} tkkb}{\frac{1}{\mu_h} + tkkb}.$$

Для фиксированных  $\mu_r, \mu_h, \lambda, a$  и  $b$  рассчитывается график  $\Phi_4/\Phi_{04} = f(ab)$ , из которого при целесообразном для воспроизведения с неспециального носителя отношении  $\Phi_4/\Phi_{04} = 0,7 \dots 0,9$  находится толщина магнитопровода ферромагнитного преобразователя.

Магнитометрический преобразователь, построенный по данному принципу, может найти применение при разработке, например, системы для выравнивания движения пролётного строения крана с использованием знакопеременной намагниченности подкрановых рельсов.

Для такого класса задач, как программирование работы рельсовых машин и их идентификации, предложен метод цифровой магнитной записи информации на профильные магнитносители, например, головку железнодорожного рельса. Специфические условия процесса записи на стальные конструктивные элементы вызвали необходимость разработки теории цифровой записи на неспециальные магнитные носители и воспроизведения с них.

Из-за того, что при магнитной записи сигналов на нестандартные носители на разрешающую способность канала запись-воспроизведение существенно влияет протяжённость магнитных отпечатков, детально изучена топография статических магнитных полей записывающих головок с различной геометрией магнитопроводов.

При анализе магнитостатических полей идеализированных головок записи использован метод, заключающийся в разложении остаточной намагниченности

$$M_o(x) = M_{om} \rho_{\Delta}(x), \quad (4)$$

где  $\rho_{\Delta}(x)$  равно 1 или 0 в зависимости от формы головки, в пространственный спектр и в решении граничной задачи для одной гармонической составляющей с последующим интегрированием по всем составляющим спектра.

Исследовано поле в носителе моделей стержневой головки с толщиной полуса  $2\Delta$  и высотой  $h$ , П-образной для продольной записи с толщиной полюсов  $2\Delta$  и рабочим зазором  $2l$ , а также головки для перпендикулярной записи с толщиной носителя  $2d$  (рис. 3).

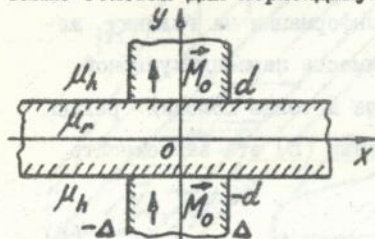


Рис. 3. Модель головки для перпендикулярной записи на массивный носитель

ля  $2d$  (рис. 3).

Для данных моделей определены аналитические выражения составляющих напряженности поля  $H_x$  и  $H_y$  в интересующей нас толще носителя.

Для модели, представленной на рис. 3, получены зависимости

$$H_x = \frac{1}{2\pi} \frac{M_{om}}{\mu_h + \mu_r} \left[ - \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \ln \frac{(-y+d+4d\alpha)^2 + (x+\Delta)^2}{(-y+d+4d\alpha)^2 + (x-\Delta)^2} - \right. \\ \left. - \frac{\mu_h - \mu_r}{\mu_h + \mu_r} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \ln \frac{(-y+3d+4d\alpha)^2 + (x+\Delta)^2}{(-y+3d+4d\alpha)^2 + (x-\Delta)^2} + \right. \\ \left. + \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \ln \frac{(y+d+4d\alpha)^2 + (x+\Delta)^2}{(y+d+4d\alpha)^2 + (x-\Delta)^2} + \right. \\ \left. + \frac{\mu_h - \mu_r}{\mu_h + \mu_r} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \ln \frac{(y+3d+4d\alpha)^2 + (x+\Delta)^2}{(y+3d+4d\alpha)^2 + (x-\Delta)^2} \right];$$

$$H_y = \frac{1}{\pi} \frac{M_{om}}{\mu_h + \mu_r} \left[ \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left( \arctg \frac{x+\Delta}{-y+d+4d\alpha} - \arctg \frac{x-\Delta}{-y+d+4d\alpha} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\mu_h - \mu_r}{\mu_h + \mu_r} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left( \arctg \frac{x+\Delta}{-y+3d+4d\alpha} - \arctg \frac{x-\Delta}{-y+3d+4d\alpha} \right) + \right. \\ \left. + \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left( \arctg \frac{x+\Delta}{y+d+4d\alpha} - \arctg \frac{x-\Delta}{y+d+4d\alpha} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\mu_h - \mu_r}{\mu_h + \mu_r} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left( \arctg \frac{x+\Delta}{y+3d+4d\alpha} - \arctg \frac{x-\Delta}{y+3d+4d\alpha} \right) \right];$$

$$+ \frac{\mu_h - \mu_r}{\mu_h + \mu_r} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left( \operatorname{arctg} \frac{x+\Delta}{y+3d+4d\alpha} - \operatorname{arctg} \frac{x-\Delta}{y+3d+4d\alpha} \right), \quad (5)$$

где 
$$r = \left( \frac{\mu_h - \mu_r}{\mu_h + \mu_r} \right)^2.$$

В результате сопоставительного анализа параметров головок различного типа установлено, что нанесение информационных сигналов на рельс наиболее целесообразно производить посредством головки для перпендикулярной записи.

Для повышения точности расчёта цепи намагничивания головки для перпендикулярной записи информации на головку железнодорожного рельса учтена зависимость перпендикулярной составляющей магнитной индукции поля в толще головки рельса от расстояния вдоль него. На основании (5) эта зависимость аппроксимирована выражением

$$B_{p1}(\bar{x}) = B_{p1m} \frac{1}{1 + \bar{x}^{2,72}}, \quad (6)$$

где  $B_{p1m}$  - амплитудное значение магнитной индукции в центре метки (для типовых рельсов  $B_{p1m} = 1,55 \dots 1,95$  Т);  $\bar{x} = x/\Delta$ .

Рабочий магнитный поток  $\Phi_{p1}$  в рельсе определён согласно выражению

$$\Phi_{p1} = 2\Delta c \int_0^{\infty} B_{p1}(\bar{x}) d\bar{x} = 1,05 B_{p1m} S_{r3} = B_{p1} S_{r3}, \quad (7)$$

где  $S_{r3} = 2\Delta c$  - площадь поперечного сечения магнитопровода в области касания головки и рельса;  $B_{p1} = 1,05 B_{p1m}$  индукция в этой области.

Суммарное падение магнитного потенциала во всей цепи намагничивания получено по эквивалентной электрической схеме-аналоге.

Применение способа "с возвращением к нулю" при перпендикулярной записи на головку рельса открывает возможность значительного повышения плотности записи за счёт допустимой сильной интерференции смежных воспроизводимых импульсов. В

в этом случае топография внешнего поля метки имеет сложную объёмную форму; основные составляющие напряжённости поля действуют в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:  $H_{\tau y}$  - горизонтальная составляющая в плоскости  $yoz$ ,  $H_{\tau x'}$  - горизонтальная и  $H_{\tau z'}$  - вертикальная составляющие в плоскости  $x'o'z'$  (рис. 4).

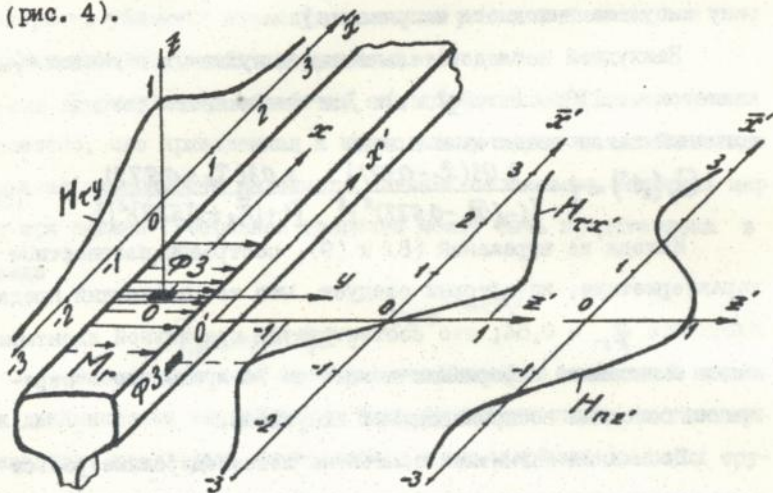


Рис. 4. Составляющие напряжённости магнитного поля метки при перпендикулярной записи на головку рельса

Значительное повышение плотности записи достигнуто благодаря одновременному считыванию составляющих поля двумя феррозондами, размещёнными в зоне максимальных значений  $H_{\tau y}$  и  $H_{\tau x'}$ , что позволило говорить о считывании информации с объёмной сигналограммы.

В диссертации проведен анализ процесса воспроизведения информации, представленной в двоичном коде, при аналоговом компарировании выходного напряжения.

Самой неблагоприятной последовательностью колоколообразных импульсов  $H_{\tau y}$  является  $\dots 0 \underline{1} 0 \dots (\dots 1 \underline{0} 1 \dots)$ . Макси-

мальное приведенное значение выходного напряжения подчёркнутого разряда с учётом влияния смежных разрядов изменяется по закону

$$\bar{U}_1(1^n) = \frac{\bar{x}_2 - 1}{\bar{x}_2 + 1}, \quad (8)$$

где  $\bar{x}_2 = x/\theta$  - нормированное расстояние ( $\theta$  устанавливает ширину импульса выходного напряжения).

Наихудшей последовательностью дигиальных сигналов  $H_{ex}$  является ...100... (...001...). Для отмеченного разряда аналогичный закон представим в виде

$$U_2(1^n) = 1 - \frac{3,03(\bar{x}_2 - 0,577)}{[1 - (\bar{x}_2 - 0,577)^2]^2} - \frac{3,03(\bar{x}_2 + 0,577)}{[1 + (\bar{x}_2 + 0,577)^2]^2}. \quad (9)$$

Исходя из выражений (8) и (9), построены плотностные характеристики, из которых следует, что теоретический предел плотности  $q_r = 0,64$ ; это соответствует правильной идентификации записанной информации вплоть до 74-процентного перекрытия соседних воспроизводимых импульсов.

Испытания магнитной записи на железнодорожные рельсы в реальных условиях проводились на 78-м км станции Луганск Донецкой железной дороги, оборудованном автоблокировкой, на 80-м км той же станции, на дистанции пути ПЧ-15, а также на экспериментальном полигоне ВНИИЖТ (г. Москва). На участках пути были уложены рельсы типа Р65. Цель состояла в установлении влияния климатических условий, наездов проходящих составов и помех на кодовые отпечатки.

На рельсы, включая стыки, головками для перпендикулярной записи наносились произвольные кодовые комбинации при повышенных плотностях (вплоть до 4 бит/м). Затем проверялась правильность идентификации записанной информации до и после наезда железнодорожных составов. Точное воспроизведение записанной двоичной информации наблюдалось при 45-про-

центном перекрытии смежных кодовых импульсов напряжения после наезда поездов с общим числом колёсных пар равным 200. Детальное изучение влияния наездов колёсных пар на величину остаточных сигналов показало, что от первых 16...20 наездов магнитное поле метки уменьшается в среднем в 3 раза, затем скорость убывания амплитуды сигнала резко снижается и в дальнейшем она стабилизируется.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что приведенная к наибольшему значению сглаживающая кривая зависимости выходного сигнала от наездов колёсных пар  $n$  при записи Г-образной головкой может быть представлена в виде

$$\bar{H}_m(n) = 0,2 e^{1,58n} e^{-0,36\sqrt{n}} \quad (10)$$

Эксперименты по проверке устойчивости магнитной записи к динамическим воздействиям были проведены также на тяговых канатах, швеллерах, многослойных и однослойных стальных трубах, бортах вагонеток. Их результаты подтвердили принципиальную возможность создания надёжных средств отбора информации с использованием метода магнитной записи на промышленные конструкции, преимуществом которого является нанесение и считывание программ управления рельсовыми единицами с координатной привязкой к заданным точкам пути, оперативная корректировка управляющих программ.

Для проектирования помехоустойчивых ферроиндукционных преобразователей необходимо детальное выяснение особенностей их работы при измерении и обнаружении информационных магнитных полей, изменяющихся в широком диапазоне своих значений, что характерно для решаемых системами промышленного транспорта разнообразных задач.

В случаях, когда на феррозонды воздействуют достаточно

сильные поля магнитных систем, высокие метрологические характеристики и помехоустойчивость имеют дифференциальные, градиентометрические и одностержневые феррозонды с форсированным импульсным возбуждением, выходы которых подключены к активным сопротивлениям нагрузки через синхронные детекторы, собранные по схеме Брайта (рис. 5).

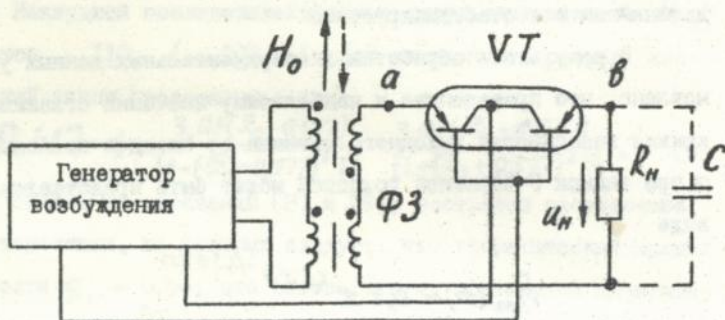


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема ферроиндукционного преобразователя с синхронным детектором

Анализ их работы проведен для принятой линейной аппроксимации зависимости дифференциальной индуктивности обмотки возбуждения полузонда от времени при отсутствии измеряемого поля

$$L = L_N - \frac{L_N - L_S}{\tau} t, \quad (II)$$

где  $L_N$  - начальная индуктивность;  $L_S$  - индуктивность обмотки при насыщении магнитопровода;  $\tau$  - промежуток времени, соответствующий включенной схеме Брайта, считающейся идеальным ключом.

В эквивалентной схеме замещения феррозонда (рис. 6) напряженность измеряемого магнитного поля  $H_0$  имитирована источником тока  $I_0$ , выполненным в виде катушки длиной  $l$  и с числом витков  $ze_0$ , создающей равновеликое поле.

При разомкнутом ключе  $a\delta$  ток  $i_L = I_0$  и потокосцепление  $\Psi = L_3(0)I_0$ .

При замкнутом ключе состояние параметрической цепи описывается уравнением

$$\frac{d\Psi}{dt} + \frac{R_H}{L_3} - R_H I_0 = 0. \quad (12)$$

Здесь  $L_3$  - эквивалентная индуктивность обмоток возбуждения при действии поля  $H_0$ .

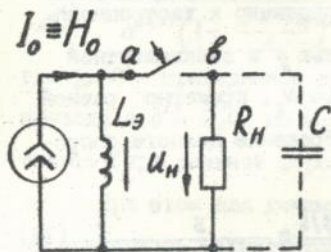


Рис. 6. Эквивалентная схема замещения феррозонда

В результате решения (12) получены выражения мгновенного напряжения на нагрузке, которые позволили благодаря обособанному выбору геометрии магнитопроводов, длительности и амплитуды импульсов тока возбуждения, а также величины нагрузочного сопротивления проектировать простые и надёжные устройства для измерения магнитных полей с чувствительностью 0,01...0,1 В/А/м в диапазоне линейности функции преобразования до 500...1000 А/м.

Данный метод применён при расчёте феррозондов, дифференциальные индуктивности обмоток возбуждения которых изменяются по закону

$$L = \frac{L_N + L_S}{2} + \frac{L_N - L_S}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} t\right), \quad (13)$$

а активные сопротивления нагрузок шунтированы сглаживающими конденсаторами. Определены передаточные характеристики феррозондовых преобразователей при измерении сильных ( $H_0 \sim H_{B.m}$ ) и слабых ( $H_0 \ll H_{B.m}$ ) полей. Выбраны оптимальные нагрузки по критерию максимума мощности выходного сигнала.

Теоретически проанализирована работа феррозондового магнитометра с выходом на синхронный детектор при соотношении частот полезного сигнала и коммутации 2:1. Предложены схема и методика расчёта полуполупериодного синхронного детектора. Обсуждён вопрос об области использования предложенного магнитометра в системах автоматизации транспорта.

В результате анализа переходных процессов в цилиндрическом магнитопроводе феррозонда длиной  $l$ , радиусом  $r_0$  и с числом витков  $\omega$ , выполненном из однородного и изотропного ферромагнетика с удельной проводимостью  $\gamma$  и эквивалентной относительной магнитной проницаемостью  $\mu_2$ , примерно равной проницаемости формы  $m$ , получено изображение полного сопротивления цилиндра

$$Z_B(s) = \frac{2\pi \mu_2 r_0 \omega^2 J_1(\sqrt{\mu_2 \gamma s} r_0) s}{l \sqrt{\mu_2 \gamma s} J_0(\sqrt{\mu_2 \gamma s} r_0)} \approx \frac{s}{ad(s + \frac{1}{a})}, \quad (14)$$

где  $a = \frac{1}{8} \mu_2 \gamma r_0^2$ ;  $d = \frac{l}{\pi \mu_2 r_0^2 \omega^2}$ .

Использование (14) явилось эффективным при расчёте феррозондов, возбуждаемых генераторами различного типа, по эквивалентным схемам замещения.

На основе решения системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в цилиндрических магнитопроводах феррозондовых преобразователей при синусоидально изменяющейся напряжённости магнитного поля, разработана методика инженерного расчёта основных параметров нагруженных феррозондов в установившихся режимах. Такие чувствительные элементы обеспечивают достоверной измерительной информацией автоматические системы контроля и диагностики промышленного транспорта.

Показана целесообразность применения для считывания сигналограмм неспециальных носителей дифференциальных феррозондов с импульсным возбуждением, магнитопроводы которых

имеют рамочную форму. Выходное напряжение ферроиндукционных преобразователей толщиной  $d = 0,02 \dots 0,2$  мм и длиной полузондов 15...100 мм предложено находить, учитывая динамику импульсного перематничивания магнитопроводов в поле различной интенсивности и направления.

На основании экспериментов уравнение динамического состояния полузонда представлено в виде

$$\frac{dB}{dt} = \frac{0,014 \left(1 - \frac{B_{внеш}}{2,5B_s}\right)}{d^{1,07} \left(1 - \frac{B_{внеш}}{B_s}\right)} \left(1 - \frac{B}{B_s}\right) (H - H_{стм}) r_{ор}(0), \quad (15)$$

где  $r_{ор}(0)$  - приведенное динамическое сопротивление магнитопровода с  $d = 0,02$  мм и при  $B = B_{внеш} = \mu_0 H_0 = 0$ ;  $H_{стм}$  - поле старта (при сильной форсировке  $H_{стм} \approx H_c$ ).

При этом для динамической характеристики одного стержня замкнутого магнитопровода рамочной формы получено следующее выражение

$$B = B_s \left(1 - e^{-\frac{z}{B_s} Q_2(B) + \tau_n \left| \frac{B_s - B_{внеш}}{B_s} \right|}\right), \quad (16)$$

где  $Q_2(B)$  - импульс действующего поля и обозначено

$$z = \frac{0,014 \left(1 - \frac{B_{внеш}}{2,5B_s}\right)}{d^{1,07} \left(1 - \frac{B_{внеш}}{B_s}\right)} r_{ор}(0).$$

Исходя из схемы замещения феррозонда с импульсным возбуждением, записано уравнение

$$\frac{\omega_1}{LR} \int_0^t e(t) dt - H_c t = \frac{\omega_1^2 S}{LR} B_1 + \frac{\omega_1^2 S}{LR} B_2 + Q_2(B), \quad (17)$$

где  $e(t)$  - импульс э.д.с. возбуждения;  $B_1$  и  $B_2$  - магнитные индукции в полузондах при действии внешнего поля  $H_0$ ;  $l$  - длина полузонда;  $\omega_1$  - число витков;  $R$  - активное сопротивление цепи возбуждения.

Кривая выходного напряжения определена посредством графического решения (17).

Для дальнейшего снижения порога чувствительности феррозондов, повышения достоверности выделения полезных сигналов потребовалось решение задачи максимизации отношения сигнал/шум с помощью оптимальной фильтрации. Теоретические и прикладные аспекты данной задачи с учётом сложных условий работы феррозондовых преобразователей на транспорте исследованы недостаточно.

При возбуждении феррозонда частотно-импульсно-модулированным током, частота которого в пределах прямоугольной огибающей  $-T/2 \dots T/2$  изменяется по линейному закону, выходное напряжение имеет вид

$$u_{\text{вх. фз}} = (U_0 + \kappa t) \cos\left(\omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2}\right), \quad (18)$$

где  $\kappa = 2 \frac{\omega \tau}{\omega_0} \frac{U_0}{T}$ ;  $\beta = \frac{4\pi f \tau}{T}$ ;  $\omega_0 = 2 \omega_{\text{возб.}}$

Его спектральная плотность

$$\underline{S}(\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} (U_0 + \kappa t) \cos\left(\omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2}\right) e^{-j\omega t} dt. \quad (19)$$

Модуль спектральной плотности и фазовая характеристика спектра при  $\omega_0 - \omega_2 < \omega < \omega_0 + \omega_2$

$$S(\omega) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}} + \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}} \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}, \quad (20)$$

$$\psi(\omega) \approx \frac{\pi}{4} m \frac{(\omega - \omega_0)^2}{\omega_0^2}. \quad (21)$$

Передаточная характеристика полосового фильтра, включаемого на выход феррозонда, должна иметь вид

$$K_{\text{пф}}(\omega) = A_0 \left( \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}} + \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}} \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^{-1}. \quad (22)$$

Частотно-зависимая линейная задержка оптимального фильтра реализована с помощью дисперсионной линии задержки, выполненной на вполне определённом количестве неминимально-фазовых мостовых цепей скрещенного типа. Максимальная ампли-

туда выходного напряжения оптимального фильтра  $U_m(\tau) = \sqrt{2f_0 T}$ .

Рассмотрен принцип построения цифрового феррозондового магнитометра с оптимальной обработкой пачки прямоугольных выходных сигналов феррозонда с импульсным возбуждением.

Проанализирован импульсный режим работы автокомпенсационного магнитометра, в котором обратная связь осуществляется по каждому импульсу. Передаточная функция магнитометра имеет вид

$$\Phi(p) = \frac{U_{\text{вых.}}(p)}{H_0(p)} = \frac{K_0(1+pT_{0c})}{(1+pT_{\varphi 3})(1+pT_{0c}) + \beta K_0}, \quad (23)$$

где  $T_{\varphi 3}$  и  $T_{0c}$  - постоянные времени феррозонда и цепи обратной связи соответственно.

В общем виде определена относительная динамическая погрешность магнитометра, обусловленная переходным процессом. Для критического режима при  $T_{\varphi 3}/T_{0c} = 4(1+\beta K_0)$  относительная динамическая погрешность равна

$$\delta = \frac{T}{T_{0c}} t e^{-\frac{t}{T}}, \quad (24)$$

где  $T = \sqrt{\frac{T_{\varphi 3} T_{0c}}{1 + \beta K_0}}$ .

Этот режим является близким к оптимальному по быстродействию.

Предложенный магнитометр по сравнению с существующими автокомпенсационными магнитометрами второй гармоники имеет существенно большую импульсную мощность выходного сигнала и благодаря исключению таких инерционных звеньев, как избирательный усилитель и фазовый детектор, весьма высокое быстродействие. Эти преимущества особенно ощутимы при использовании данного магнитометра в качестве нуля-органа при построении систем точного позиционирования транспортных единиц.

Дано теоретическое обоснование работы быстродействующего линеаризующего преобразователя, производящего функцио-

нальную обработку двух информативных параметров феррозондового магнитометра, возбуждаемого прямоугольными импульсами э.д.с. Суть метода состоит в перемножении амплитуды первого импульса выходного дипульсного сигнала феррозонда после действия переднего фронта импульса э.д.с. на величину промежутка времени, измеренного между окончанием импульса э.д.с. и моментом появления максимального значения второго импульса дипульсного сигнала. Разработана схема цифрового магнитометра с функциональной линейризацией, позволившая при прочих равных условиях увеличить диапазон линейности в 2,5...3 раза.

Показана эффективность применения микропроцессорных линейризаторов. Достаточно высокое быстродействие обеспечивает программируемый линейризатор, в котором двоичный код АЦП, эквивалентный аналоговому сигналу феррозонда, является адресом запоминающего устройства. В ячейках запоминающего устройства хранится число, соответствующее входному сигналу с учётом поправки до значения, лежащего на прямой, линейризирующей передаточную характеристику. Разработан алгоритм ввода в микропроцессорный контроллер измерительной информации от нескольких ферроиндукционных преобразователей с одновременной прямой линейризацией передаточных характеристик.

Теоретические и прикладные результаты исследований легли в основу при разработке, изготовлении и внедрении конкретных систем автоматизации промышленного транспорта и их составных частей, признанных новыми техническими решениями. В работе приведены описания и технические характеристики созданных: системы автоматического управления работой путевых машин СМК-1, системы магнитной маркировки многослойных труб большого диаметра, устройства для считывания информации

со стального борта транспортного средства, устройства магнитного адресования спутников ГПС, микропроцессорной системы идентификации и учёта перемещающихся радиаторов, системы весового дозирования жидкого металла в заливочные тележки, устройства для точного позиционирования вращающегося роторного весодозатора, полуавтоматического устройства для размагничивания движущихся в потоке изделий, цифрового феррозондового прибора ФК-1 для измерения коэрцитивной силы деталей реле железнодорожной автоматики, бесконтактного реверсивного магнитного датчика пути транспортной машины, весоизмерительного устройства для подвесного конвейера, микропроцессорной системы управления автоматическим складом, микропроцессорной системы управления инструментальной моделью автоматической транспортной системы ГПС. На примере разработанных систем автоматизации, устройств управления и средств отбора информации показана методика построения современной электронной и информационно-измерительной техники для широкого использования на промышленном транспорте.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-техническая проблема создания магнитометрических преобразователей для систем автоматизации промышленного транспорта, имеющая важное народно-хозяйственное значение.

Разработанная теория и созданный на её основе комплекс аппаратных средств составляет методологическую базу для оптимизации промышленного транспорта, повышающей эффективность его функционирования.

Основные научные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

I. Показано, что существующий уровень развития промыш-

ленного транспорта не отвечает современным требованиям в основном из-за морально устаревших систем автоматизации и низкой надёжности их средств отбора информации. Специфика условий, в которых работает транспорт, потребовала принятия новой концепции к разработке единой аппаратной основы обеспечения управляющих систем достоверной первичной информацией.

2. Для улучшения качества функционирования транспорта предложено применять перспективный магнитный способ автоматического ввода информации в системы автоматизации, заключающийся в измерении магнитоизмерительными преобразователями информационных полей, создаваемых катушками с токами, постоянными магнитами, метками, нанесенными как на стандартные, так и на неспециальные магнитоносители (стальные путепроводы, конструкционные элементы тяговых и транспортных средств, пластинки).

3. Разработана и обоснована структура обобщенного информационного канала системы автоматизации, включающего в себя: магнитную систему, формирующую информационное поле, магнитоизмерительный преобразователь с генератором возбуждения, аналоговую схему, цифровой блок, микропроцессорный контроллер, интерфейс связи с исполнительными механизмами. Определена конфигурация тракта применительно к различным классам транспортных задач, а именно: идентификации подвижных объектов, контролю и содержанию верхнего строения пути, весового дозирования грузов, оперативного измерения механических величин.

4. Теоретически проанализирована топография информационных полей магнитных систем магнитометрических преобразователей, выполненных в виде градиентных катушек с токами, постоянных магнитов и магнитных меток, нанесенных на стальные

элементы транспортных объектов. Разработана методика их синтеза при построении соответственно прецизионных датчиков перемещения и положения транспортных единиц и их узлов, весодозирующих устройств и систем позиционирования подвижных объектов.

5. На основании теоретических исследований полей сигналограмм универсальной идеализированной математической модели "неспециальный магнитоноситель - ферроиндукционный преобразователь" разработана методика выбора геометрических и энергетических параметров магниточувствительных элементов применительно к конкретным системам автоматизации промышленного транспорта.

6. Предложен, теоретически обоснован и экспериментально проверен экономичный метод магнитной записи цифровой информации на профильный магнитоноситель, например, головку железнодорожного рельса, который обеспечивает за счёт считывания ферроиндукционными преобразователями объёмной сигналограммы повышение теоретического предела плотности записи вплоть до 74-процентного перекрытия смежных воспроизводимых импульсов. Даны рекомендации по использованию метода при программировании работы путевых машин, опознавании и адресовании мобильных средств.

7. Получены аналитические выражения, адекватно описывающие процессы в помехоустойчивых феррозондах для различных аппроксимаций дифференциальных индуктивностей обмоток возбуждения, нагруженных через синхронные детекторы на разнообразные сопротивления, при измерении и обнаружении информационных полей в широком диапазоне их значений. Развита теория перематничивания цилиндрических магнитопроводов феррозондов в переходном и установившемся режимах с учётом влияния вих-

ревых токов.

8. Разработанные инженерные методики расчёта передаточных характеристик феррозондовых датчиков различного назначения, рекомендуемых для использования на промышленном транспорте, обеспечили повышение точности по сравнению с существующими методиками расчёта на 20...50 %.

9. С целью повышения помехоустойчивости ферроиндукционных преобразователей, предназначенных для работы в тяжёлых условиях эксплуатации транспорта, разработана теория оптимальной обработки выходного напряжения с помощью сопряжённых линейных фильтров при частотно-импульсно-модулированном возбуждении, что дало увеличение отношения сигнал/шум в 2...4 раза.

10. Созданы новые, защищённые авторскими свидетельствами на патенты и изобретения, устройства, приборы и системы адресования и идентификации подвижных объектов, точного позиционирования транспортных средств, измерения физических величин для оперативного информационного обеспечения систем транспортной техники, весового дозирования грузов с применением магнитометрических преобразователей, работающих в сопряжении с микропроцессорными контроллерами.

11. Основные теоретические и прикладные результаты диссертационной работы использованы при разработке средств автоматизации промышленного транспорта и внедрении их на предприятиях Украины и России и в учебном процессе Восточноукраинского государственного университета.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Локотюк Б.Н., Смирный М.Ф., Яковенко В.В. и др.  
Программирование работы путевых машин методом магнитной записи // Автоматизация производственных процессов в маши-

ностроении и приборостроении. Львов, 1975, № 14. - с. 47-51.

2. Евтухов Ю.Г., Смирный М.Ф., Кобицкий В.И. Экспериментальные исследования магнитной записи на железнодорожный рельс как объёмный магнитноситель // Локомотивостроение. Харьков, 1975, № 7. - с. 133-136.

3. Евтухов Ю.Г., Смирный М.Ф. Расчёт полей магнитных сигналограмм неспециальных носителей // Приборостроение, 1975, № 11. - с. 44-49.

4. Смирный М.Ф., Костяков Н.П., Евтухов Ю.Г. Повышение плотности магнитной записи цифровой информации на объёмный неспециальный носитель способом "с возвращением к нулю" // Методы и устройства сбора и обработки измерительной информации. Киев: Техніка, 1976. - с. 37-40.

5. Смирный М.Ф. Система программного управления путевыми машинами ВПО-3000 с использованием магнитной записи цифровой информации на рельс // Научные основы проектирования машин и автоматизации производственных процессов. Тез. докл. респ. конф. Луганск. - с. 236.

6. Смирный М.Ф., Костяков Н.П., Евтухов Ю.Г. Аналоговое информационное устройство контроля микроперемещений с использованием магнитной записи // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. Львов, 1976, № 16. - с. 113-118.

7. Евтухов Ю.Г., Смирный М.Ф., Яковенко Л.Ф. Система управления работой путевых машин с применением магнитной записи кода на рельс // Достижения и перспективы развития технической кибернетики. Тез. докл. всесоюз. конф. Киев, 1975. - с. 87-90.

8. Евтухов Ю.Г., Костяков Н.П., Смирный М.Ф. Применение магнитной записи для автоматического контроля

кранов при сборке // Научно-технический прогресс в технологии, механизации и автоматизации сборочных работ в машиностроении. Тез. докл. всесоюз. конф. Москва, 1976. - 21-24.

9. Павлюков В.Ф., Смирный М.Ф., Евтухов Д.Г. Программирование работы рельсовых машин с помощью магнитной записи // Научно-технический прогресс в программном управлении машинами. Тез. докл. всесоюз. конф. Одесса, 1977. - с. 150-154.

10. Смирный М.Ф. Работа феррозондового магнитометра с выходом на синхронный детектор при соотношении частот сигнала и коммутации 2:1 // Электромеханика, 1978, № II. - с. 1201-1205.

11. Смирный М.Ф. Графоаналитический расчёт рамочных феррозондов с импульсным возбуждением // Электромеханика, 1980, № 8. - с. 874-878.

12. Смирный М.Ф., Кацуба В.А., Поздняков В.С. Микропроцессорное управление автоматической транспортно-складской системой ППС // Проблемы комплексной автоматизации производства в машиностроении. Тез. докл. всесоюз. конф. Ереван, 1988. - с. 161-163.

13. Смирный М.Ф., Велигура Ю.В. Исследование диапазона линейности магнитных датчиков положения информационных устройств роботизированных комплексов // Электромеханика, 1989, № 6. - с. 73-76.

14. Смирный М.Ф., Дремач Н.Е., Коржавин Г.А. Весоизмерительное устройство для дозирования штучных и сыпучих материалов в роторных машинах // Ресурсосберегающие технологии в мехноосборочном производстве. Тез. докл. респ. конф. Днепропетровск, 1990. - с. 69.

15. Смирный М.Ф., Коржавин Г.А. Устройство для авто-

матизированного учёта секций батарей // Автоматизация и диагностика технологических процессов. Тез. докл. респ. конф. Луцк, 1990. - с. 68.

16. Смирный М.Ф. Расчёт выходного напряжения электромагнитного датчика с цилиндрическим магнитопроводом // Электромеханика, 1991, № 2. - с. 90-92.

17. Смирный М.Ф. Переходные процессы в трансформаторном датчике положения с цилиндрическим магнитопроводом // Приборостроение, 1991, № 6. - с. 60-65.

18. Смирный М.Ф. Работа феррозондового датчика с импульсным возбуждением на синхронный детектор // Дефектоскопия, 1991, № 6. - с. 92-94.

19. Смирный М.Ф., Крицкий А.Г. Функция преобразования импульсного феррозонда, подключённого к стробируемому детектору // Приборостроение, 1991, № 10. - с. 73-77.

20. Смирный М.Ф. Одностержневой феррозонд с однополярным импульсным возбуждением, нагруженный на схему Брайта // Электромеханика, 1992, № 6. - с. 53-57.

21. Смирный М.Ф. Расчёт градиентометрического феррозонда с импульсным возбуждением // Измерительная техника, 1992, № 6.

22. Смирный М.Ф. Функциональная линейризация передаточной характеристики феррозондового магнитометра с импульсным возбуждением // Измерительная техника, 1993, № 5.

23. Смирный М.Ф., Крицкий А.Г. Реверсивный магнитный датчик пути транспортной машины // Конструирование и производство транспортных машин. Киев, 1994, № 24. - с. 11-18.

24. Смирный М.Ф., Крицкий А.Г., Дремач Н.Е. и др. Время-импульсные и аналоговые магнитомодуляционные датчики с форсированным возбуждением // Там же. - с. 205-213.

25. Смирный М.Ф. Графоаналитический расчёт дифференциального феррозонда с импульсным возбуждением // Приборостроение, 1992, № 9.

26. Смирный М.Ф. Дифференциальный феррозонд с импульсным возбуждением, подключённый к синхронному детектору // Приборы и системы управления, 1992, № 8. - с. 30-31.

27. Крицкий А.Г., Смирный М.Ф., Капуста Л.В. Высокопроизводительный цифровой феррозондовый коэрцитиметр ФК-1 // Дефектоскопия, 1992, № 12.-с. 53-57.

28. Авт. свид. 498630 (СССР). Устройство для воспроизведения кода с магнитного носителя // Евтухов Д.Г., Яковенко В.В., Смирный М.Ф. и др. Оpubл. в Б.И. № 1, 1976.

29. Авт. свид. 574758 (СССР). Устройство для определения местонахождения рельсового транспорта // Евтухов Д.Г., Смирный М.Ф., Яковенко В.В. и др. Оpubл. в Б.И. № 36, 1977.

30. Авт. свид. 595771 (СССР). Устройство для считывания информации // Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 8, 1978.

31. Авт. свид. 618785 (СССР). Магнитная головка для поперечной записи сигналов на железнодорожный рельс // Смирный М.Ф., Евтухов Д.Г., Яковенко В.В. и др. Оpubл. в Б.И. № 29, 1978.

32. Авт. свид. 624245 (СССР). Устройство для считывания информации // Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 34, 1978.

33. Авт. свид. 628505 (СССР). Устройство для воспроизведения информации с магнитного носителя // Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 38, 1978.

34. Авт. свид. 664203 (СССР). Устройство для нахождения центра магнитной метки // Смирный М.Ф., Павлюков В.Ф. Оpubл. в Б.И. № 19, 1979.

35. Авт. свид. 672641 (СССР). Устройство для цифровой

магнитной записи на массивный носитель // Павлюков В.Ф.,  
Смирный М.Ф., Берлин Г.С. Оpubл. в Б.И. № 25, 1979.

36. Авт. свид. 752465 (СССР). Устройство для управления подвижными объектами // Смирный М.Ф., Павлюков В.Ф.,  
Капуста Л.В. Оpubл. в Б.И. № 28, 1980.

37. Авт. свид. 765867 (СССР). Устройство для воспроизведения магнитной записи // Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 35,  
1980.

38. Авт. свид. 781856 (СССР). Устройство для считывания информации с профильного металлического носителя //  
Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 43, 1980.

39. Авт. свид. 790014 (СССР). Устройство для цифровой магнитной записи на магнитный носитель // Павлюков В.Ф.,  
Смирный М.Ф., Берлин Г.С. Оpubл. в Б.И. № 47, 1980.

40. Авт. свид. 888148 (СССР). Устройство для определения местоположения рельсового подвижного объекта //  
Лойко А.В., Яковенко В.В., Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 45,  
1981.

41. Авт. свид. 922812 (СССР). Устройство для считывания информации с профильного металлического носителя //  
Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 15, 1982.

42. Авт. свид. 959153 (СССР). Устройство для определения местоположения магнитных головок // Яковенко В.В.,  
Павлюков В.Ф., Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 34, 1982.

43. Авт. свид. 1070576 (СССР). Устройство для записи и считывания информации с магнитного носителя // Смирный М.Ф.,  
Поляк Л.П. Оpubл. в Б.И. № 4, 1984.

44. Авт. свид. 1257450 (СССР). Устройство для воспроизведения двоичной информации // Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И.  
№ 40, 1986.

45. Авт. свид. I525742 (СССР). Устройство для точного останова транспортного средства // Смирный М.Ф., Капуста Л.В., Коржавин Г.А. Оpubл. в Б.И. № 44, 1989.

46. Авт. свид. I534504 (СССР). Устройство для определения местоположения магнитных головок // Смирный М.Ф., Малахов О.В., Петров В.А. и др. Оpubл. в Б.И. № I, 1990.

47. Авт. свид. I58656 (СССР). Реверсивный датчик пути // Смирный М.Ф., Пасхалис Г.Г., Шумов В.Д. и др. Оpubл. в Б.И. № 30, 1990.

48. Авт. свид. I67772I (СССР). Размагничивающее устройство // Смирный М.Ф. Оpubл. в Б.И. № 34, 1991.

49. Авт. свид. I735722 (СССР). Весоизмерительный датчик // Смирный М.Ф., Дремач Н.Е., Крайнюк А.А. и др. Оpubл. в Б.И. № I9, 1992.

50. Патент I820949 (СССР). Размагничивающее устройство // Смирный М.Ф., Дремач Н.Е. Оpubл. в Б.И. № 2I, 1993.

5I. Патент 2024965 (РФ). Устройство для воспроизведения магнитной записи с промышленных конструкций // Смирный М.Ф., Карев А.П., Довженко В.П. Оpubл. в Б.И. № 23, 1994.

52. Устройство для точного останова транспортного средства // Смирный М.Ф. Положит. реш. по заявке 493I6II/I0 на выдачу патента РФ, 1995.

53. Устройство для записи и воспроизведения цифровой информации с многодорожечного магнитносителя // Смирный М.Ф. Положит. реш. на выдачу патента РФ, 1995.

54. Смирный М.Ф., Коржавин Г.А. Микропроцессорная система для взвешивания и дозирования // Транспортное машиностроение. Киев, 1995. - с. I27-I33.

55. Смирный М.Ф., Коржавин Г.А., Капуста Л.В. и др.

Микропроцессорная система идентификации и учёта радиаторных секций // Экспресс - обзор ВНИИЭСМ. - М., 1991, № 6. - с. 28-29.

56. Смирный М.Ф. К вопросу расчёта полей намагничивающих устройств // Деп. УкрНИИТИ, № 3534-Д82, 1982. - 9 с.

57. Поляк Л.П., Смирный М.Ф. Метод и аппаратура магнитной маркировки легированных труб // Деп. УкрНИИТИ, № 3245-Ук82, 1982. - 8 с.

58. Смирный М.Ф. Расчёт выходных магнитных потоков головок воспроизведения // Деп. УкрНИИТИ, № 789Ук-84Деп., 1984. - 6 с.

59. Смирный М.Ф. Расчёт цепи намагничивания при поперечной магнитной записи на головку железнодорожного рельса // Деп. УкрНИИТИ, № 304-Ук86, 1986. - 9 с.

60. Смирный М.Ф., Горбачёв Б.И., Еркв Д.А. и др. Магнитный датчик веса роторных машин // Деп. УкрНИИТИ, № 702-Ук91, 1991. - 14 с.

61. Смирный М.Ф., Костюков Н.П. Микропроцессорная система управления автоматизированным складом // Информацион. листок № 89-003, ЛЦНТЭИ. - Луганск, 1989.

## АННОТАЦІЯ

Смирный М.Ф. Магнитометрические преобразователи систем автоматизации промышленного транспорта.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.22.12 - промышленный транспорт, Восточноукраинский государственный университет, Луганск, 1995.

Защищается 40 научных работ и 49 авторских свидетельств на патенты и изобретения, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования магнитометрических преобразователей для транспортных систем автоматизации. Созданы помехоустойчивые ферроиндукционные преобразователи, адаптированные к промышленному транспорту. Осуществлено промышленное внедрение разработанных информационно-измерительных устройств и систем на основе предложенных преобразователей.

## ANNOTATION

Smirny M.F. Magnetic transducers the automation system of industrial transport.

Dissertation on competition of an academic degree of doctor of technical sciences on speciality 05.22.12 - industrial transport, East-Ukrainian State University, Lugansk, 1995.

40 scientific works and 49 author's evidences for patents and inventions carrying theoretical and experimental researches of magnetic transducers for the transport systems of automation are defended. Noiseless and stable ferroinduction transducers adapted to industrial transport have been developed. Commercial introduction of developed information - measuring devices and systems on the basis of the suggested transducers has been carried out.

Ключові слова: промисловий транспорт, магнітометричний перетворювач, математична модель, ферозонд, мікропроцесорний контролер, система автоматизації

*M. Smirny*

Подписано к печати 14.12.1995. Формат 60x84 1/16, 2 п. л.

Тираж 100 экз. Заказ № 522

---

Ротапринт ВУТУ. 348034, г. Луганск, кв. Молодежная, 20а

AB 33.829