

На правах рукописи

ЛАВРОВ Андрей Юрьевич

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ
И ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ РЕЛЬСОВ**

Специальность 05.13.05 — Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара 2008

Работа выполнена на кафедре электротехники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» (СГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Меркулов Алексей Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Калакутский Лев Иванович

кандидат технических наук, профессор
Гуменников Валерий Борисович

Ведущее предприятие: Научно-производственный центр информационных и транспортных систем ИНФОТРАНС, г. Самара.

Защита диссертации состоится 25 декабря 2008 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.215.05 при СГАУ по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 24 ноября 2008 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

д. т. н., профессор

А. А. Калентьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ширина железнодорожной колеи представляет собой один из факторов, определяющих безопасность движения транспорта, и зависит от взаимного положения и геометрии рельсов. Рельсы имеют большую протяжённость. Вопросы, касающиеся надёжности и безопасности движения подвижного состава железнодорожного транспорта, а также применения систем автоматизированного мониторинга пути, подробно освещены в работах Альбрехта В. Г., Архангельского С. В., Вериги М. Ф., Когана А. Я., и др. Сбор информации о состоянии рельсовой колеи для систем управления движением поездов осуществляется с помощью мобильных средств измерений, выполняющих комплексную компьютерную диагностику железнодорожного пути. В используемых в настоящее время электромеханических сканирующих системах ширина колеи определяется как отклонение роликов, контактирующих с внутренними кантами рельсов правой и левой нитей колеи от заданного размера — шаблона. При этом невозможно определить, вызвано ли изменение ширины колеи перемещением верха головки рельса или это вызвано износом рельса. Сложность и малая надёжность механических сканирующих систем затрудняет их применение при повышенных скоростях движения, что определяет актуальность разработки многоканальной системы автоматического бесконтактного экспресс-контроля геометрии и взаимного положения рельсов железнодорожной колеи. При этом взаимное смещение рельсов в стыках обуславливают необходимость увеличенных зазоров между рельсом и устройством контроля. За рубежом широкое распространение получили оптические системы контроля состояния колеи. Однако экспресс-контроль с использованием оптических методов измерения геометрических параметров рельсовой колеи затруднён в условиях воздействия дождя и снега. Существенным недостатком оптических измерительных систем является их высокая стоимость и большие габариты измерительных модулей.

Электромагнитные методы контроля широко применяются в различных отраслях промышленности для бесконтактного измерения перемещений и геометрических параметров объектов сложной формы. В машиностроении широко используются вихретоковые компланарные накладные преобразователи (ПНК). В работах Герасимова В. Г., Ключева В. В., Стеблева Ю. И., Сухорукова В. В., Шатерникова В. Е. и др. рассмотрены методологические принципы построения электромагнитных ПН. Проектирование многоканальных измерительных устройств и использование информационной избыточности отражено в известных работах Алиева Т. М., Конюхова Н. Е., Осадчего Е. П., Пустынникова В. Г. и др. Работа с повышенными зазорами безопасности требует увеличения диаметра катушек, что исключает возможность компактного размещения большого количества первичных накладных преобразователей (ПН) в зоне контроля.

В работах Меркулова А. И., Нестерова В. Н., Секисова Ю. Н. векторные многокомпонентные физические величины рассматриваются как функции от множества составляющих их информативных факторов, допускающих много-

вариантность их представления в зависимости от особенностей объекта исследования и поставленной задачи. Построение устройств для измерения геометрии и перемещений объектов контроля (ОК) базируется на использовании многоэлементных преобразователей со слабосвязанными однокомпонентными ПНк, размещение которых в зоне контроля оказывается малоэффективным, а в труднодоступных зонах — неосуществимой задачей ввиду значительных размеров автономных корпусов и элементов их крепления.

С учётом вышесказанного, решение задачи экспресс-контроля геометрии и взаимного положения рельсов железнодорожной колеи с помощью бесконтактных вихретоковых методов контроля требует теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку матричного вихретокового преобразователя (МВП), обеспечивающего определение значений большого количества контролируемых факторов при условии сильной электромагнитной связи чувствительных элементов.

Целью диссертационной работы является разработка матричного вихретокового преобразователя для устройств многофакторного экспресс-контроля геометрии и взаимного положения рельсов при повышенных зазорах безопасности.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ существующих электромагнитных методов контроля пространственного положения и геометрических параметров проводящих объектов сложной формы в загрязнённых средах;
- теоретическое и экспериментальное исследование влияния конструктивных параметров МВП на чувствительность к контролируемым компонентам перемещений и геометрии ОК;
- выбор оптимальных конструктивных и геометрических параметров МВП, обеспечивающего измерение в широком диапазоне изменения контролируемых факторов при повышенных начальных зазорах безопасности;
- разработка структуры, алгоритма и программного обеспечения многоканальной аппаратуры многофакторного экспресс-контроля положения и геометрических параметров рельсов при повышенных зазорах безопасности по сигналам чувствительных элементов МВП.

Методы исследования. В работе использованы: теория электромагнитного поля применительно к задачам контроля перемещений и геометрии электропроводящих объектов, методы аналитической геометрий, векторной алгебры, дифференциального исчисления функций многих переменных, теория погрешностей и инвариантности, теория электрических и магнитных цепей, имитационное моделирование с использованием ЭВМ. Достоверность положений работы проверена экспериментально, а также сравнением полученных результатов с данными, опубликованными другими авторами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель для численных расчётов индуктивности МВП, представленного в виде дискретной токовой шины с общим электромагнитным полем.

2. Обосновано определение границ конструктивно неограниченных квазистационарных полей синфазных токовых элементов для расчёта индуктивности преобразователей.

3. Даны критерии выбора оптимальных конструктивных размеров МВП для многофакторного экспресс-контроля геометрических параметров ОК сложной формы в широком диапазоне изменения контролируемых факторов.

4. Предложена методика комплексной обработки измерительной информации многоканальной аппаратуры экспресс-контроля с автоматической селекцией контролируемых факторов по сигналам МВП с сильной электромагнитной связью первичных преобразователей.

Практическая значимость работы:

1. Разработана базовая конструкция ортогонального матричного вихретокового преобразователя для устройств многофакторного экспресс-контроля рельсов железнодорожной колеи при одностороннем доступе к объекту контроля.

2. Даны практические рекомендации по выбору оптимальных конструктивных размеров МВП и геометрических параметров ПНо на основе анализа эквивалентных параметров.

3. Предложены алгоритмы и программное обеспечение, обеспечивающее расчёт индуктивности ПНо МВП учётом переменных сечений магнитных потоков токовых элементов дискретной токовой шины, а также одновременный достоверный контроль в автоматическом режиме факторов с последующим определением отклонения геометрических параметров рельсовой колеи от нормативных значений.

4. Разработана структура многоканальной аппаратуры и создан компьютеризированный лабораторный стенд многофакторного экспресс-контроля перемещений и геометрических параметров ОК в широком диапазоне изменения контролируемых факторов при повышенных начальных зазорах безопасности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Принцип построения ортогональных матричных вихретоковых преобразователей с сильной электромагнитной связью для многофакторного экспресс-контроля перемещений и геометрических параметров ОК сложной формы при одностороннем доступе к зонам контроля.

2. Математическая модель для численных расчётов электромагнитных полей ПНо МВП и вихревых токов ОК, учитывающая переменные сечения магнитных потоков ТЭ дискретной токовой шины.

3. Критерии выбора оптимальных конструктивных параметров дискретной токовой шины устройства бесконтактного экспресс-контроля перемещений и геометрических параметров ОК.

4. Методика определения перемещений и геометрических параметров объектов сложной формы и структура многоканальной аппаратуры для систем экспресс-контроля перемещений и геометрии рельсов при повышенных зазорах безопасности.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на III Всероссийской НПК «Современные проблемы

создания и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2001); VI Всероссийской научной конференции «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» (Таганрог, 2002); международной НТК «Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении» (Саратов, 2002); всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники» (Самара, 2003); международном юбилейном симпозиуме «Актуальные проблемы науки и образования» (Пенза, 2003); XVII Российской НТК «Неразрушающий контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2005); всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (Самара, 2006); IX Всероссийской НТК «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2007); Международной научно-практической конференции аспирантов и научных работников (Астрахань, 2007); 18-й Всероссийской конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика» (Нижний Новгород, 2008).

Реализация результатов работы. С ОАО Российские железные дороги подписан договор о намерении по разработке и внедрении автоматизированной системы экспресс-контроля железнодорожной колеи для использования в составе путеизмерительных вагонов-лабораторий. На предприятии ЗАО «Синко» в технологический процесс изготовления линолеума внедрен комплект приборов КТЛ-12, для контроля разнотолщинности изделий. Метод расчёта параметров МВП и имитационные модели используются в учебном процессе в курсе «Электрические измерения неэлектрических величин», а также в студенческих научных работах на кафедре электротехники СГАУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ в научных сборниках, тезисов докладов, в том числе 2 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, определённых Высшей аттестационной комиссией, получено 2 свидетельства об отраслевой регистрации разработки программ для ЭВМ и патент на полезную модель параметрического матричного электромагнитного преобразователя пространственных перемещений.

Структура и краткое содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть диссертации изложена на 153 страницах, содержит 55 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, раскрывается научная новизна, основные положения, выносимые на защиту и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрены факторы, влияющие на безопасность движения подвижного состава, а также условия экспресс-контроля рельсов железнодорожной колеи при повышенных зазорах безопасности. Показаны преимущества использования в системе управления движением железнодорожного транспорта электромагнитных преобразователей для устройств многофакторного экспресс-контроля геометрических параметров рельсовой колеи в составе

диагностического оборудования мобильных средств измерений с учётом динамических нагрузок от подвижного состава при одностороннем доступе к ОК.

Определение ширины колеи $b_{кл}$ в процессе движения подвижного состава требует размещения устройства контроля на тележке вагона. В системе координат $X_0Y_0Z_0$, связанной с колёсной парой, фиксируем координаты центров рабочих поверхностей корпусов ПНО левого и правого рельсов колеи, как ОК, задающих системы координат XYZ преобразователей (рис. 1, система координат $X_0Y_0Z_0$ не показана). Ширина $b_{кл}$ может быть определена как линейные перемещения $h_y^{(lp)}$, $h_y^{(np)}$ и ширина $b_r^{(lp)}$, $b_r^{(np)}$ левого и правого рельсов:

$$b_{кл} = (b_{км} + 2b_{ко}) - \left[b_{ш} + \left(h_y^{(lp)} + \frac{1}{2}b_r^{(lp)} \right) + \left(h_y^{(np)} + \frac{1}{2}b_r^{(np)} \right) \right],$$

где $b_{км}$ – расстояние между внутренними торцами колёс, $b_{ко}$ – ширина колеса, $b_{ш}$ – ширина металлического корпуса МВП, рабочая поверхность которого параллельна плоскости XY , представляющие собой конструктивные параметры. Надёжная работа преобразователей требует их установки с максимальным вертикальным зазором безопасности h_{zn} . Измерительная система координат XYZ связана с МВП. Вертикальное h_z и горизонтальное h_y перемещения поверхности катания каждого рельса относительно преобразователей вычисляются автономно, как отклонения $h_y^{(lp)}$, $h_y^{(np)}$ систем координат $X_rY_rZ_r$, связанных с серединой поверхности катания рельсов.

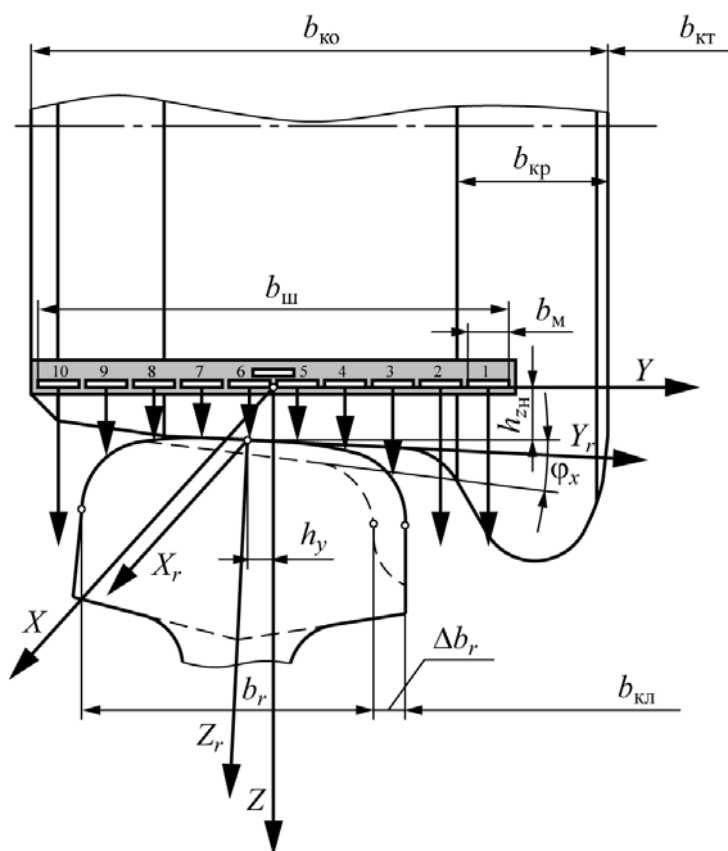


Рис. 1. Взаимное положение рельса и матричного преобразователя

Ширина $b_{ш}$ корпуса МВП должна быть больше суммы ширины b_r рельса и диапазона $h_{y\max}$ поперечных перемещений: $b_{ш} > b_r + h_{y\max}$, а для безопасности работы, при движении вагона-лаборатории, $b_{ш}$ меньше ширины $b_{ко}$ колеса вагона. Верх головки рельса образован сопряжением дуг различных радиусов и представляет собой объект контроля сложной формы. Для реализации многоточечного контроля количество преобразователей, размещаемых вдоль оси Y , составляет $n_y = b_{ш}/b_m$, где b_m – ширина одиночного ПН.

Линейное размещение ПН матричного преобразователя характеризуется тем, что средние ПНО (5, 6, рис. 1), удалены от краев рельса и имеют доминирующую чувствительность к вертикальным перемещениям h_z . Крайние ПНО (3,

8), расположенные вблизи краёв рельса, чувствительны к h_z и h_y . Установка промежуточных ПН (4, 7) позволяет дополнительно контролировать угловые отклонения поверхностей катания рельса и колеса, влияющих на динамику износа профиля рельса. Угловое положение можно определить по формуле:

$$\varphi_x = \arctg \frac{h_{zn}^{(e)} - h_{zn}^{(H)}}{b_\varphi},$$

где $h_{zn}^{(H)}$, $h_{zn}^{(e)}$ – текущие вертикальные зазоры наружного и внутреннего промежуточных ПН; b_φ – расстояние между их центрами.

Таким образом, задача сводится к определению значений вектора $\vec{P} = (h_z, h_y, b_r, \varphi_x)$, задающего перемещение и геометрические параметры рельса в пространстве факторов. Анализ допусков отступлений по ширине колеи, заданных нормативной документацией по содержанию железнодорожного пути, позволил определить необходимый диапазон изменения и допустимые погрешности измерения контролируемых факторов (табл. 1):

Таблица 1

Диапазон изменения и погрешность измерения контролируемых факторов

Факторы	h_z , мм	h_y , мм	b_r , мм	φ_x , °
Диапазон	5.0-15.0	±25.0	60.0-72.0	±5.0
Погрешность	0.50	0.70	1.40	0.50

В методе вихревых токов широко используются ПНк, у которых диапазон контролируемых перемещений связан с величиной диаметра эквивалентного контура вихревых токов $D_3 \approx D_k$, где D_k – диаметр катушки ПНк, и коэффициентом связи K_T :

$$D_3 = \frac{6\Delta h_z}{\ln L_{6H_m} - \ln L_{6H}}, \quad K_T = L_{6H} / L_{6H_m}.$$

где L_{6H_m} – максимальная, а L_{6H} – текущая вносимые индуктивности преобразователей. Диаметр $D_3 \approx b_k$ характеризует ослабление поля с увеличением h_z , а коэффициент связи K_T – величину вносимых параметров преобразователей при начальном зазоре h_{zn} . Диаметр D_3 ПНк определяется меньшей стороной прямоугольного токового контура, поэтому при больших h_{zn} над поверхностью рельса возможна установка одного преобразователя и выполнение контроля только одного фактора.

Известны экранированные ортогональные накладные преобразователи (ПНо) с магнитопроводом размером $l_m > b_m \gg d_m$. Изменяя соотношение площадей $l_m \times b_m$, $l_m \times d_m$, $b_m \times d_m$, определяющих электромагнитное поле преобразователя по заданному направлению, можно осуществить многовариантность соотношений чувствительностей к контролируемым факторам. При этом диаметр D_3 определяется размером l_m . Количество n_p контролируемых факторов определяет количество $n_{раб} \geq n_p$ рабочих ПНо в МВП, расположенных над поверхностью рельса. Для селекции компонентов вектора \vec{P} контролируемых факторов

требуется увеличение $n_{раб} = b_r / b_m$ количества ПНО над контролируемой поверхностью рельса. При этом необходимы исследования влияния $b_m \leq b_r / n_{раб}$ на чувствительность МВП к контролируемым факторам.

На рис. 2 показана схема предложенного устройства экспресс-контроля, включающего $n_y > n_{раб}$ ПНО 2, размещаемых в плоскости XY над поверхностью рельса 1 и представляющих собой ПНО МВП. Рабочие 2 и компенсационный 3 преобразователи установлены в корпусе из высокопроводящего материала, обеспечивающего экранирование ПНО и повышение помехозащищённости устройства. Такое расположение обеспечивает одинаковое изменение параметров ПНО при вариации температуры и улучшает стабильность выходных напряжений дифференциальной схемы измерительных каналов. Для создания общего электромагнитного поля МВП используются синфазные колебательные переходные процессы. Когда ключи 4 замкнуты, катушка индуктивности LC-контура накапливают энергию. При размыкании ключей начинается синфазный переходный процесс, энергия, накопленная на L , переходит на C . Полупериод T колебаний определяется L и C контуров. Индуктивность L зависит от магнитного потока Φ , создаваемого ПНО, и определяется суммарным значением напряжённости \vec{H} магнитного поля. Напряжение ПНО определяется разностью полупериодов T_k и T_p колебаний компенсационного и рабочего ПНО: $U = U_{пит} (T_k - T_p) / T_s$, где $U_{пит}$ – напряжение питания источника 8; T_s – период колебаний, задаваемый генератором 5.

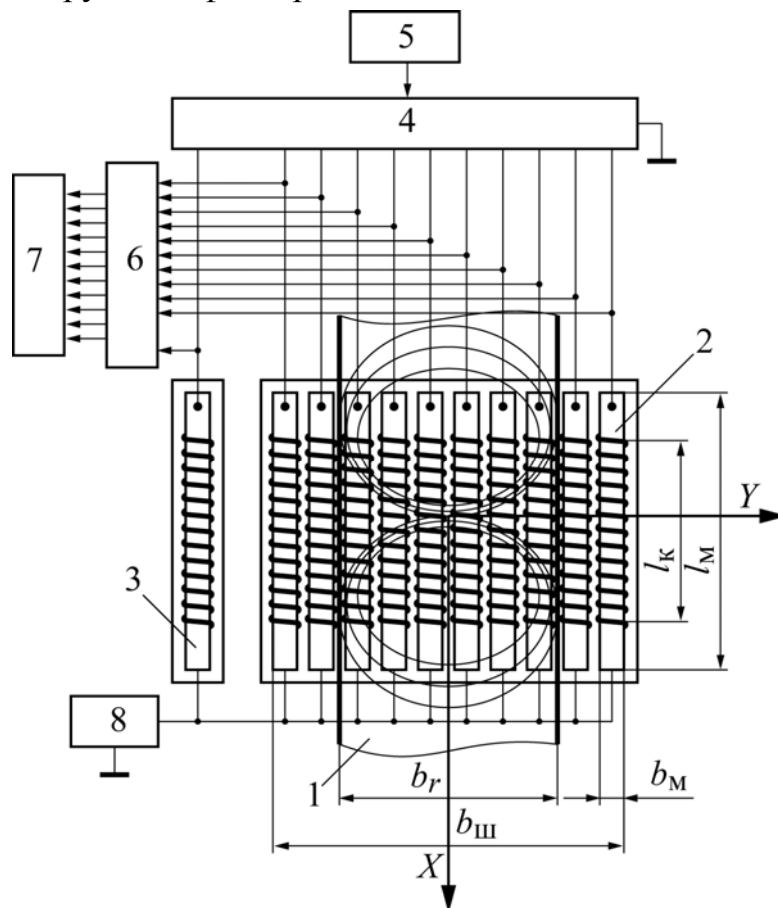


Рис. 2. Структурная схема устройства экспресс-контроля

Корпус МВП, выполненный из проводящего материала, экранирует электромагнитное поле части витков катушек ПНО, прилегающих к нему, тогда как противоположная часть витков создаёт рабочее поле, локализованное в зазоре между ОК и МВП. Это позволяет предложить указанную новую конструкцию МВП, расчётная схема которого представляет собой дискретную токовую шину, состоящую из ТЭ конечного размера b_m . Принцип многоканальности позволяет рассматривать напряжения ПНО как вектор измерительных сигналов

$\vec{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, который с электронного устройства 6 формирования выходных напряжений передаётся в ЭВМ 7 для последующей обработки. При этом сильная электромагнитная связь чувствительных элементов, образующих МВП, определяет необходимость алгоритма определения значений контролируемых факторов.

Во второй главе на основе уравнений Максвелла рассмотрены π -критерии подобия. Принято допущение о квазистационарности рассматриваемого электромагнитного поля. Для выбранной частоты f изменения поля эквивалентная глубина проникновения поля в металл $d_{эм} \rightarrow 0$. При этом обобщённый параметр $\beta = D_3 \sqrt{\omega \mu_0 \sigma} \rightarrow \infty$.

Определение магнитных потоков ПНО осложняется трёхмерным характером электромагнитного поля и требует определения границ конструктивно неограниченных квазистационарных полей синфазных токовых элементов, что затрудняет использование известных программных продуктов (ANSYS, Elcut и др.) и определяет необходимость разработки новых численных алгоритмов расчёта параметров ПНО МВП. Предложенная математическая модель позволяет определить начальную индуктивность L_H ПНО дискретной токовой шины с учётом взаимного влияния ТЭ. Магнитный поток каждого ПНО в пространстве между МВП и поверхностью ОК представлен в виде совокупности магнитных потоков элементарных трубок. В пределах малого сечения трубки $\Delta S_m = \Delta b_s \Delta h_z$, где Δb_s , Δh_z – ширина и высота элементарной трубки магнитного потока, изменением напряжённости поля можно пренебречь, поэтому считаем $\vec{H} = const$. При этом L_H определяется суммой магнитных потоков $\Phi_{i_s} = \mu H_{i_s} \Delta S_m$, создаваемых i -м ТЭ, и магнитных потоков $\Phi_{ij_m} = \mu H_{ij_m} \Delta S_m$, создаваемых j -м ТЭ и охватывающих i -й ТЭ:

$$L_H = \sum_1^{n_x} \left(\sum_1^{m_{z_i}} \sum_1^{m_{y_i}} \Phi_{i_s} + \sum_1^{n_x n_y} \sum_1^{m_{z_{ij}}} \sum_1^{m_{y_{ij}}} \Phi_{ij_m} \right) / I_K, \quad (1)$$

где n_x, n_y – количество ТЭ дискретной токовой шины в направлении осей X и Y ; m_z, m_y – количество трубок магнитного потока в направлении осей Z и Y . Напряжённость H_{i_s}, H_{ij_m} магнитного поля трубки в сечении ΔS_m определяется интегрированием уравнения Био-Савара-Лапласа $d\vec{H} = I_K d\vec{b}_m \times h_0 / 4\pi |h|^3$ для ТЭ $I_K d\vec{b}_m$, удалённого на расстояние h от точки определения \vec{H} поля. Количество учитываемых вдоль оси Z трубок магнитного потока, создаваемых i -м ТЭ, определяется как $m_{z_i} = (0.5l_m - |x_{k_i}|) / \Delta x_k$, где l_m – длина магнитопровода; x_{k_i} – координата i -го ТЭ ПНО; Δx_k – шаг размещения ТЭ вдоль оси X . Количество трубок, определяющих взаимодействие между i -м и j -м ТЭ, равно $m_{z_{ij}} = |x_{k_j} - x_{k_i}| / \Delta x_k$, где x_{k_j} – координата j -го ТЭ ПНО.

Для определения количества $m_y = b_s / b_m$ трубок, учитываемых вдоль оси Y , рассматриваются границы электромагнитных полей ТЭ дискретной токовой

шины, представляющей собой поверхность между крайней левой и крайней правой силовыми линиями магнитных потоков соседних ТЭ. Расчет функций пространственного распределения магнитного поля ТЭ, с использованием принципа суперпозиции полей, показывает, что магнитные трубки с большой плотностью магнитной энергии обладают повышенным давлением $p = 0.5\mu_0 H^2$. Поэтому в плоскости ZY наклон силовых линий трубок φ_M увеличивается с удалением Y зоны контроля поля, следовательно, необходимо учитывать увеличение ширины b_s сечения магнитного потока при удалении по Z и Y (рис. 3). Для определения положения границы используется условие:

$$\sum_1^k H_{x_i} = \sum_{k+1}^{n_y} H_{x_i}, \quad (2)$$

где $\sum_1^k H_{x_i}$, $\sum_{k+1}^{n_y} H_{x_i}$ – суммы напряжённостей полей ПНО, расположенных соответственно слева и справа от границы между k -м и $(k+1)$ -м ПНО; k – порядковый номер ПНО в МВП. Проекция силовых линий магнитной индукции, определяемая по условию (2), между сечениями магнитных потоков соседних ПНО в плоскости YZ имеет нелинейный характер, но на рабочем участке может быть аппроксимирована прямыми линиями, расчётное положение которых показано на рис. 3. Для уменьшения погрешности определения S_M следует увеличить количество m_y трубок, учитываемых вдоль оси Y и уменьшить Δb_s . Однако, при этом объём вычислений возрастает пропорционально количеству трубок магнитного потока вдоль оси Y . Рассмотренный подход к определению S_M реализован в алгоритме расчёта начальных параметров катушек индуктивности ПНО МВП. Выполненные расчёты показывают, что наименьшее значение S_M имеют средние и наибольшее S_M — внешние ПНО.

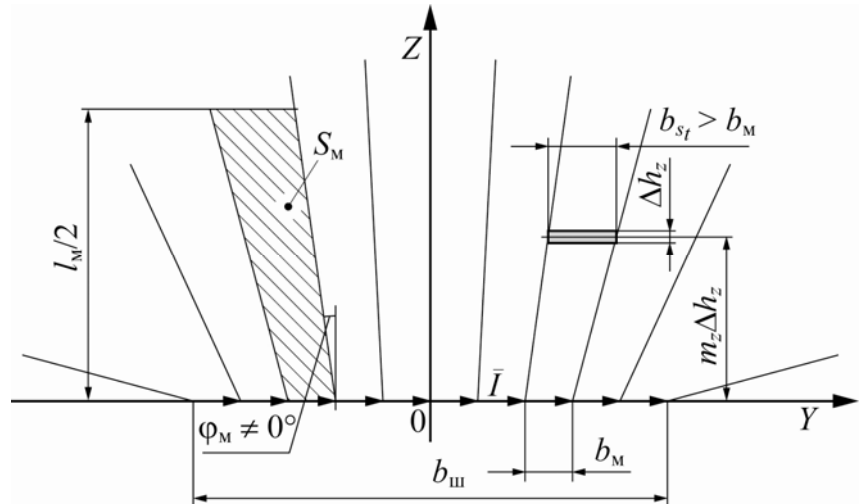


Рис. 3. Сечения магнитных потоков ПНО дискретной токовой шины

В третьей главе выполнены расчёты вносимых параметров катушек индуктивности МВП от поля вихревых токов ОК. Русло вихревых токов на поверхности ОК рассматриваем в виде совокупности ТЭ, токи которых определяется как $I_{в_k} = (2\sum_1^{n_x n_y} H_x) \Delta l_v$, где Δl_v – шаг разбиения русла вихревых токов вдоль оси X . В принятой расчётной схеме русло вихревых токов, определяющее индуктивность L_v от вихревых токов по каждому ПНО, рассматривается в виде дискретной токовой шины шириной b_r , расположенной со смещением h_z , h_y относительно ПНО МВП. По аналогии с (1) $L_{вн}$, определяем суммированием магнит-

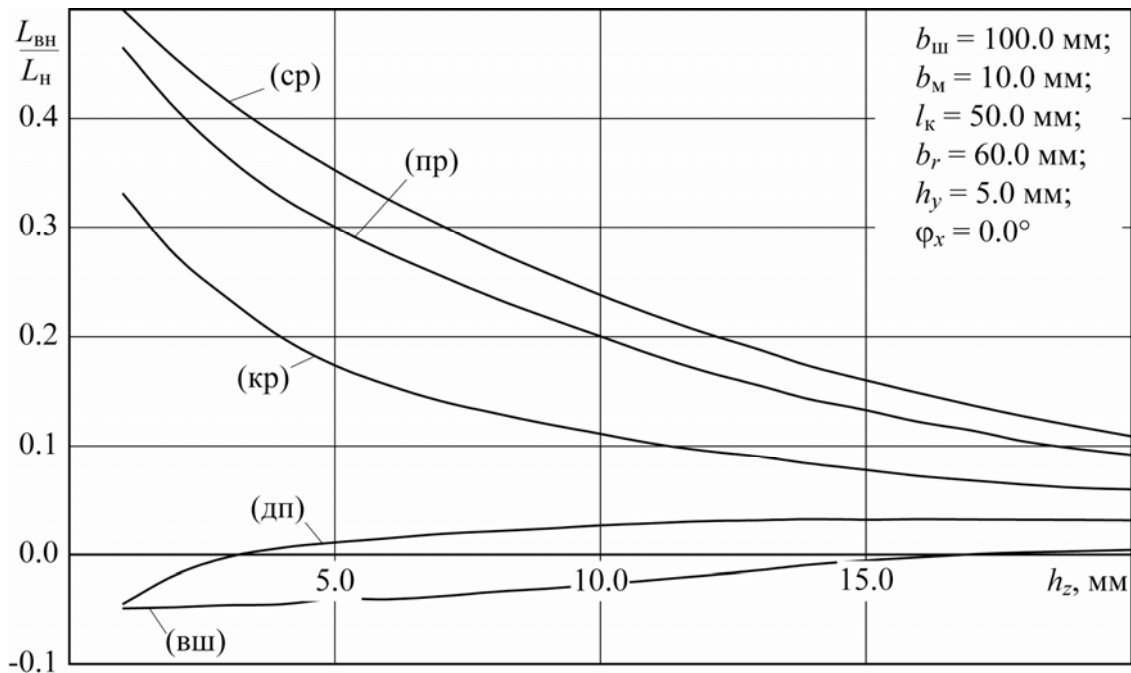


Рис. 4 Совокупность расчётных характеристик ПНО МВП, имеющих различное положение относительно имитационной модели ОК

ных потоков Φ_{ik_m} , создаваемых k -м ТЭ русла вихревых токов и охватывающих i -й ТЭ:

$$L_{вн} = \mu_0 \mu_r \Delta S_{M_0} \sum_{k=1}^{n_{xв} n_{yв}} \sum_{t=t_{ik_0}}^{m_{zв}} H_{xв_{ik_t}} / I_k, \quad (3)$$

где $n_{вх}$, $n_{вы}$ – количество ТЭ русла вихревых токов вдоль осей X и Y . Величина $n_{вы}$ ограничивается шириной b_r ОК, а $n_{вх}$ ограничивается допустимой погрешностью расчёта.

Над ОК расположено $n_{раб} < n_y$ рабочих ПНО. При этом часть ПНО МВП расположены вне контролируемой поверхности — свободные ПНО. Для расчёта индуктивности L_s данных ПНО используется алгоритм расчёта L_n . При этом для определения границ магнитных потоков применяется условие (2).

На основе выражений (1), (3), с учётом изменения сечений магнитных потоков свободных ПНО, предложен алгоритм расчёта вносимых параметров дискретной токовой шины, реализованный в компьютерной программе, с помощью которой выполнено моделирование изменения параметров ПНО МВП при изменении взаимного положения МВП и ОК. Линейное размещение ПНО в МВП с шагом b_m позволяет получить существенно отличающиеся друг от друга $L_{вн}$ различных ПНО. На рис. 4 представлена совокупность характеристик ПНО в диапазоне изменения h_z . Графики функции $L_{вн}/L_n = f(h_z)$ показывают, что наибольшее значение $L_{вн}$, характеризующее доминирующую чувствительность к вертикальным перемещениям h_z , имеют средние ПНО. ПНО, расположенные вблизи краёв рельса, имеют наибольшую крутизну характеристик $L_{вн}$ и чувствительны и к h_z , и к h_y .

цов реальных рельсов проведена оценка погрешности измерения, которая определяется как:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{сл}^2 + \delta_r^2 + \delta_{нл}^2},$$

где $\delta_{сл}$ – случайная погрешность, обусловленная различными факторами; δ_r – погрешность гистерезиса; $\delta_{нл}$ – погрешность нелинейности характеристик функций отклика. Для снижения погрешности влияния случайных факторов выполняется усреднение U_i вектора сигнальных напряжений \vec{U} . Погрешность δ_r не учитывается, т. к. метод измерения основан на полевом взаимодействии МВП и ОК. Доминирующее влияние имеет погрешность нелинейности $\delta_{\Sigma} \approx \delta_{нл}$ функций отклика ПНО МВП. Шаг дискретизации факторного пространства выбирался по допустимой погрешности $\delta_{нл}$ нелинейности характеристик контролируемых факторов.

На начальном этапе создаётся обучающая выборка, представляющая собой массив напряжений МВП при вариации контролируемых факторов: $u_k = f_k(h_z, h_y, b_r, \varphi_x)$. На рис. 6 показана совокупность характеристик $u_k = f_k(h_y)$ ПНО МВП для $h_z = 5.0; 10.0$ мм. Симметрия расположения ПНО относительно середины ОК позволяет указать смещение h_y , при котором выполняется равенство $U_{кр}^{(н)} = U_{кр}^{(е)}$ напряжений ПНО, находящихся над внутренним и наружным краями ОК. При этом переключение между ПНО МВП осуществляется по условию:

$$\left| U_{k-(n_{раб}-1)} - U_k \right| = \left| U_k - U_{k+(n_{раб}-1)} \right|,$$

где $U_{k-(n_{раб}-1)}$, U_k , $U_{k+(n_{раб}-1)}$ – напряжения ПНО, расположенных над краями ОК.

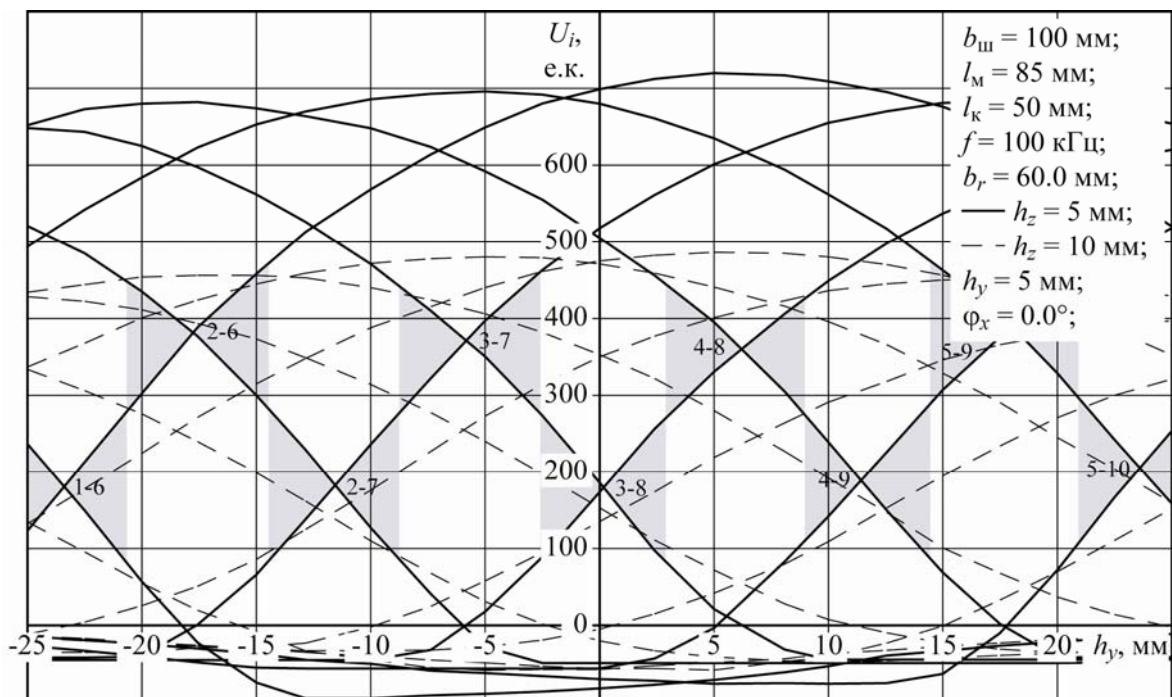


Рис. 6 Совокупность характеристик ПНО МВП в диапазоне изменения h_y при вариации зазора h_z

При переключении средний ПНО становится промежуточным, промежуточный — крайним и т. д.

Объём N массивов градуировочных напряжений U_k определяется количеством n_y каналов, по каждому из которых задаются возможные состояния ОК:

$$N = n_y(n_x \cdot n_y \cdot n_b \cdot n_\varphi),$$

где n_x, n_y, n_b, n_φ — количество градуировочных точек по каждому фактору. С помощью АЦП напряжения ПНО преобразуются в цифровую форму и сохраняются в файлах. Для заданных диапазонов изменения контролируемых факторов и выбранных шагов дискретизации, с учётом переналадок стенда, общее время градуировки составляет около 4 часов.

В режиме измерения, при контроле взаимного положения рельсов, вектор \bar{P}_s рассматривается как отклонение $\Delta\bar{P}_s$ относительно известного положения \bar{P}_0 факторного пространства. Используя кусочно-линейную аппроксимацию функции отклика, представим вектор сигнальных напряжений $\bar{U}(P_s)$ как отклонение от вектора напряжений $\bar{U}(P_0)$ в градуировочной точке \bar{P}_0 факторного пространства:

$$\bar{U}(\bar{P}_0 + \Delta\bar{P}_s) = \bar{U}(\bar{P}_0) + \nabla\bar{U}\Delta\bar{P}_s + \varepsilon, \quad (4)$$

где $\bar{U}(P_0 + \Delta P_s) = \bar{U}(P_s)$ — вектор сигнальных напряжений МВП; $\nabla\bar{U}$ — матрица, определяющая чувствительность ПНО по каждому контролируемому фактору; ε — погрешность определения факторов. Выражая из (4) отклонение $\Delta\bar{P}_s$, получим:

$$\Delta\bar{P}_s = (\nabla\bar{U})^{-1}[\bar{U}(P_0 + \Delta P_s) - \bar{U}(P_0)]. \quad (5)$$

Выбор базовой точки \bar{P}_0 из градуировочного массива выполняется по условию:

$$\|U\| = \min \left[\sqrt{\sum_1^{n_y} (u_{s_i} - u_{0_i})^2} \right].$$

С целью упрощения решения уравнения (5) представим разность сигнальных напряжений $\bar{U}(P_s)$ и напряжений $\bar{U}(P_0)$ градуировочного массива в виде:

$$\begin{cases} u_{s_1} - u_{0_1} = k_z(u_{z_1} - u_{0_1}) + k_y(u_{y_1} - u_{0_1}) + k_b(u_{b_1} - u_{0_1}) + k_\varphi(u_{\varphi_1} - u_{0_1}), \\ u_{s_2} - u_{0_2} = k_z(u_{z_2} - u_{0_2}) + k_y(u_{y_2} - u_{0_2}) + k_b(u_{b_2} - u_{0_2}) + k_\varphi(u_{\varphi_2} - u_{0_2}), \\ \dots \\ u_{s_n} - u_{0_n} = k_z(u_{z_n} - u_{0_n}) + k_y(u_{y_n} - u_{0_n}) + k_b(u_{b_n} - u_{0_n}) + k_\varphi(u_{\varphi_n} - u_{0_n}), \end{cases} \quad (6)$$

где $u_{z_k}, u_{y_k}, u_{b_k}, u_{\varphi_k}$ — дополнительные напряжения ПНО МВП по каждому контролируемому фактору, выбираемые в окрестности \bar{P}_0 . При выборе дополнительных точек, вектор $\bar{U}(P_0)$ исключается. В каждой такой точке имеем вектора напряжений:

$$\begin{aligned} \bar{U}(P_z) &= \bar{U}(h_{z_0} + \Delta h_z, h_{y_0}, b_{r_0}, \varphi_{x_0}), \\ \bar{U}(P_y) &= \bar{U}(h_{z_0}, h_{y_0} + \Delta h_y, b_{r_0}, \varphi_{x_0}), \\ \bar{U}(P_b) &= \bar{U}(h_{z_0}, h_{y_0}, b_{r_0} + \Delta b_r, \varphi_{x_0}), \end{aligned}$$

$$\bar{U}(P_\varphi) = \bar{U}(h_{z_0}, h_{y_0}, b_{r_0}, \varphi_{x_0} + \Delta\varphi_x).$$

Для малого шага дискретизации $\Delta\bar{P}$ факторного пространства коэффициенты отклонений разности напряжений Чэ в выражении (6) считаем равными коэффициентам отклонений сигнальной точки от базовой:

$$h_z = h_{z_0} + k_z \Delta h_z,$$

$$h_y = h_{y_0} + k_y \Delta h_y,$$

$$b_r = b_{r_0} + k_b \Delta b_r,$$

$$\varphi_x = \varphi_{x_0} + k_\varphi \Delta \varphi_x$$

Количество уравнений (6) соответствует количеству ПНо МВП, поэтому система линейных уравнений является переопределённой. Значения коэффициентов определяем методом наименьших квадратов, реализованным во многих распространённых программах обработки экспериментальных данных. Условием существования решения системы (6) является наличие известных и различных $U_i = f_i(P)$, что обеспечивается заданной асимметрией размещения ПНо МВП относительно контролируемых факторов, приводящей к отличию от нуля функционального определителя (Якобиана):

$$\partial(U_1, U_2, \dots, U_n) / \partial(h_z, h_y, b_r, \varphi_x) \neq 0.$$

Программное обеспечение лабораторного стенда реализовано в среде Matlab с помощью интерпретатора со встроенного языка программирования, что позволяет без дополнительной перенастройки стенда изменять алгоритм обработки измерительных сигналов МВП. Дополнительно была выполнена оценка времени измерения, которая составила 20 мс, что при скорости движения подвижного состава 100 км/ч позволяет выполнить не менее 15 отсчётов по длине рельса.

Полученные результаты позволяют дать рекомендации по использованию измерительных модулей с дискретной токовой шиной для контроля геометрических параметров и перемещений объектов сложной формы. Ниже приведены основные технические характеристики устройства экспресс-контроля перемещений и геометрии рельса, полученные на лабораторном стенде:

Технические характеристики устройства:

№	Контролируемые параметры	Диапазон изменения	Погрешность
1.	Диапазон вертикальных перемещений, мм	5.0-15.0	0.25
2.	Диапазон поперечных горизонтальных перемещений, мм	±25.0	0.40
3.	Диапазон изменения ширины ОК, мм	60.0-72.0	0.85
4.	Диапазон изменения углового положения ОК, °	±5.0	0.5

В заключении формулируются основные выводы и результаты работы. В приложении приведены таблицы отступлений от нормативных значений по ширине колеи и геометрии рельса, решение о выдаче патента на полезную мо-

дель устройства электромагнитного контроля с матричным преобразователем, свидетельства об отраслевой регистрации разработки программ и исходные тексты основных модулей программ, акты внедрения разработанных устройств контроля, позволяющие расширить функциональные возможности средств диагностики железнодорожного пути и повысить производительность испытаний дорогостоящего оборудования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обоснована возможность построения перспективных матричных вихревых преобразователей с сильной электромагнитной связью между образующими их чувствительными элементами для многофакторного экспресс-контроля геометрических параметров и перемещений объектов сложной формы.

2. Исследованы основные характеристики возбуждающих полей МВП и полей вихревых токов ОК. Установлено, что в случае использования в качестве информативной компоненты комплексной составляющей сопротивления, выбор оптимального диапазона изменения зазоров по условию наибольшего изменения вносимой индуктивности получается при значении относительного зазора $6\Delta h_z/D_3 \approx 0.8$.

3. Предложена математическая модель и алгоритмы численных расчётов электромагнитных полей дискретных токовых элементов, с помощью которых исследованы характеристики комплексной составляющей сопротивлений, учитывающие изменение границ сечений конструктивно неограниченных магнитных потоков преобразователей.

4. Даны критерии выбора оптимальных конструктивных размеров МВП для многофакторного экспресс-контроля геометрических параметров ОК сложной формы в широком диапазоне изменения контролируемых факторов.

5. Предложена методика комплексной обработки измерительной информации многоканальной аппаратуры экспресс-контроля с автоматической селекцией контролируемых факторов по сигналам МВП с сильной электромагнитной связью первичных преобразователей, позволяющая повысить помехозащищённость устройств вихретокового контроля.

6. Разработана многоканальная аппаратура экспресс-контроля перемещений и геометрических параметров ОК, включающая матричный вихретоковый преобразователь, блок формирования выходных напряжений и программное обеспечение для автоматизированной обработки измерительной информации, позволяющая расширить функциональные возможности современных средств диагностики железнодорожного пути и повысить производительность испытаний дорогостоящего оборудования.

7. Создан многоканальный компьютеризированный лабораторный стенд для исследований электромагнитных систем, который используется в промышленности, научных исследованиях и учебном процессе.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. Лавров А. Ю., Меркулов А. И. Бесконтактный экспресс-контроль взаимного положения рельсов железнодорожной колеи [Текст] // Самара: Компьютерная оптика. — 2008. Т. 32 № 3. — С. 270-277.

2. Лавров А. Ю., Меркулов А. И. Линейный матричный электромагнитный преобразователь перемещений с односторонним доступом к объекту контроля [Текст] // Самара: Известия Самарского научного центра РАН. — 2008. № 3. — С. 823-830.

Получено:

3. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2008125730/22 (031299) РФ, G 01B7/00, G 01N27/90. Устройство электромагнитного контроля с матричным преобразователем / Меркулов А. И., Лавров А. Ю., Меркулов Б. А. – заявл 24.06.08.

4. Лавров А. Ю. Монитор экспресс-контроля геометрических параметров изделий сложной формы PVGR1a v.2.03 // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9304 от 20.10.2007. М.: ВНИИЦ — № 50200702321

5. Лавров А. Ю. Моделирование вихретокового устройства экспресс-контроля изделий сложной формы. // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9378 от 26.10.2007. М.: ВНИИЦ — № 50200402380

Опубликовано в других изданиях и прошли научную экспертизу на научно-технических конференциях:

6. Меркулов А. И., Лавров А. Ю. Кластер ортогональных электромагнитных преобразователей [Текст] // Неразрушающий контроль и техническая диагностика: тезисы докладов 18-й Всероссийской конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». — М.: Машиностроение, 2008. — С. 43-44.

7. Лавров А. Ю., Меркулов А. И. Кластер вихретоковых преобразователей для устройств экспресс-контроля перемещений изделий сложной формы [Текст] // Вестник Самарского отделения Поволжского центра Метрологической академии России «Информационные, измерительные и управляющие системы». — Самара: Самарский научный центр РАН, 2007. — С. 128-132.

8. Лавров А. Ю., Меркулов А. И. Взаимодействие полей токовых элементов вихретоковых преобразователей [Текст] // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. ст. / ред.: А. И. Громько, А. В. Сарафанов. — Красноярск: Сибирский федеральный университет; Политехнический институт, 2007. — С. 346-348.

9. Лавров А. Ю., Меркулов А. И. Компоновка кластеров экранированных вихретоковых преобразователей перемещений [Текст] // Материалы Международной научно-практической конференции аспирантов и научных работников. — Астрахань: АГУ, 2007. — С. 31-34.

10. Меркулов А. И., Лавров А. Ю. Дискретизация токов вихретокового преобразователя пространственного положения изделий сложной формы [Текст] // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Ма-

териалы Всероссийской научно-технической конференции / Под ред. И. Г. Мироненко, М. Н. Пиганова — Самара: СГАУ, 2006. — С. 103-109.

11. Меркулов А. И., Лавров А. Ю., Меркулов Б. А. Анализ конструктивной топологии электромагнитных преобразователей перемещений [Текст] / Материалы XVII Российской НТК Неразрушающий контроль и диагностика. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2005. — С. 22.

12. Меркулов А. И., Лавров А. Ю., Меркулов Б. А., Скоробогатов Е. Г. Численный расчёт параметров экранированных электромагнитных преобразователей перемещений [Текст] / Материалы XVII Российской НТК Неразрушающий контроль и диагностика. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2005. — С. 52.

13. Меркулов А. И., Лавров А. Ю. Многофакторная ИИС для бесконтактного контроля железных дорог [Текст] // Актуальные проблемы радиоэлектроники. Материалы Всероссийской научно-технической конференции — Самара: Изд-во "НТЦ", 2003. — С. 77-78.

14. Меркулов А. И., Лавров А. Ю., Конюхов Вл. Н., Меркулов Б. А. Широкодиапазонные преобразователи перемещений и формы изделий с повышенной разрешающей способностью [Текст] // Актуальные проблемы науки и образования. Труды международного юбилейного симпозиума: в 2-х т. Т. 2 / Под ред. д.т.н., проф. М.А. Щербакова — Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2003. — С. 221-223.

15. Буткевич Р. В., Лавров А. Ю. Многоэлементные электромагнитные преобразователи перемещений и деформаций изделий [Текст] // Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления: VI Всероссийская научная конференция. — Таганрог: 2002. — С. 193-194.

16. Буткевич Р. В., Лавров А. Ю., Меркулов А. И. Моделирование частных петель гистерезиса магнитопроводов электромагнитных преобразователей перемещений [Текст] // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: VII Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. — Рязань: 2002. — С. 8-9.

17. Меркулов А. И., Лавров А. Ю., Скоробогатов Е. Г. Система бесконтактного измерения профиля верха головки рельса [Текст] // Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении. Материалы международной конференции. — Саратов: 2002. — С. 189-190.

18. Меркулов А. И., Скоробогатов Е. Г., Лавров А. Ю. Электромагнитные преобразователи для контроля перемещений поверхности металлических изделий [Текст] // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: Труды третьей всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ). — Ульяновск: 2001. — С. 42-44.

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве:

В работах [1, 2, 3] предложена математическая модель для численных расчётов индуктивности вихретоковых преобразователей МВП, представленного в виде дискретной токовой шины с общим электромагнитным полем, реализация которой представлена в [6]. В [1, 2, 11] дано обоснование определения границ

конструктивно неограниченных квазистационарных полей синфазных токовых элементов для расчёта индуктивности преобразователей. В [13] дан сравнительный анализ систем измерения перемещений и геометрии контролируемых объектов. Критерии выбора оптимальных конструктивных размеров МВП, работающего в широком диапазоне изменения контролируемых факторов, рассмотрены в [8, 9]. Основные характеристики МВП с сильной электромагнитной связью ПНо исследованы в [7, 9, 15]. В [4, 10, 12] разработана базовая конструкция ортогонального МВП для устройств экспресс-контроля рельсов железнодорожной колеи при одностороннем доступе к объекту контроля и в [8] даны практические рекомендации по выбору геометрических параметров ПНо на основе анализа эквивалентных параметров. Принципы построения и структура устройства экспресс-контроля представлены в [14, 16, 17]. В работах [1, 2, 11] описан алгоритм селекции компонентов вектора контролируемых факторов, программная реализация которого представлена в [5]. В [1, 2] описан созданный многоканальный компьютеризированный лабораторный стенд вихретокового контроля объектов сложной формы.