



Горделий Виталий Иванович

**Разработка автоматизированных
систем неразрушающего контроля рельсов
с применением электромагнитно-акустических
преобразователей**

05.02.11 – «Методы контроля и диагностика в машиностроении»

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Новосибирск – 2004

Работа выполнена в Сибирском государственном университете путей сообщения

Научный руководитель:

доктор технических наук

Попов А.М.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук профессор

Гурвич А.К.

доктор технических наук, профессор

Буденков Г.А.

Ведущая организация:

Всроссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта

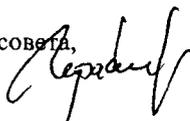
Защита состоится 18 ФЕВРАЛЯ 2005г. в 14³⁰ час. на заседании диссертационного совета Д.218.012.04. при Сибирском государственном университете путей сообщения по адресу:

630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук 191, 1-й корпус ауд. 226, тел /факс (3832) 28-73-16

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета путей сообщения

Автореферат разослан 29 ДЕКАБРЯ 2004г.

Ученый секретарь специализированного совета,
доктор технических наук, профессор



Герасимов С.И.

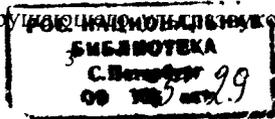
Общая характеристика работы

Актуальность проблемы и предмет исследования. Неразрушающий контроль (НК) - эффективное, а в ряде случаев и единственно возможное средство, предотвращающее чрезвычайные ситуации на железнодорожном транспорте вследствие изломов рельсов из-за дефектов в них. На 2003 год на сети железных дорог России находилось в эксплуатации 5449 съёмных и мобильных (автоматрисы, вагоны-дефектоскопы) средств ультразвукового неразрушающего контроля рельсов. Указанные системы вооружены микропроцессорной техникой, оснащены регистраторами результатов сплошного контроля обеих нитей рельсового пути. Ими ежегодно только в путевом хозяйстве страны контролируется более 4 млн. км пути и 3 млн. сварных стыков. И к настоящему времени эти усилия начинают приносить зримую пользу. Так, по данным МПС России, в результате работы структур НК на железных дорогах страны ежегодно обнаруживается от 100 до 150 тысяч дефектных рельсов, в том числе от 30 до 42 тыс. острodefekтных, т.е. подлежащих немедленной замене. Предотвращается свыше 70 тыс. потенциально возможных изломов ответственных объектов пути и подвижного состава. В то же время указанная эффективность достигается за счёт высокой, в ряде случаев избыточной частоты контроля рельсового пути (от 24 до 60 раз в год одних и тех же участков пути).

Стойко низкая вероятность обнаружения потенциально опасных дефектов в рельсах при однократном контроле их в пути съёмными, а тем более мобильными средствами ультразвуковой дефектоскопии обуславливается, прежде всего, отсутствием стабильного акустического «жидкостного» контакта между преобразователями и материалом рельса. Кроме того, уровень стабильности акустического контакта весьма критичен к скорости сканирования (контроля) рельсов. Проблема обеспечения необходимой надёжности ультразвукового контроля рельсов в условиях их эксплуатации мобильными средствами может быть решена при переходе на бесконтактные («сухие») способы возбуждения и приёма упругих колебаний в рельсе.

Попытки в 1970 – 1990 гг. применить средства ультразвуковой дефектоскопии на базе пьезопреобразователей для входного контроля старогодных рельсов без их предварительной очистки на рельсосварочных предприятиях, а также для контроля новых рельсов после их производства на металлургических заводах не дали положительного результата из-за невозможности обеспечения стабильного акустического контакта. Поэтому решение задач неразрушающего входного контроля рельсов на рельсосварочных поездах (РСП) и выходного контроля на металлургических комбинатах возможно только при условии бесконтактного возбуждения (приёма) упругих волн в металле рельсов.

В этой связи в настоящее время одним из важнейших направлений работ по совершенствованию средств неразрушающего ультразвукового контроля явля-



ется создание способов бесконтактного возбуждения и приёма упругих волн в рельсе посредством электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) Их отличительные особенности заключаются в способности возбуждать и регистрировать ультразвуковые объемные волны (продольной и поперечной S_V , S_{II} поляризации) по нормали и под углом к поверхности, а также поверхностные волны (Рэлея) без применения контактной жидкости. С помощью ЭМАП открывается возможность контролировать рельсы при наличии воздушного зазора между ЭМАП и поверхностью рельса, в широком диапазоне частот, температур и скоростей сканирования. Однако этот способ оказался недостаточно проработанным для его применения в промышленности, поэтому, несмотря на известные его преимущества, до настоящего времени в практике ультразвукового контроля (УЗК) он используется редко. Изучению его, созданию надёжных многофункциональных ЭМАП, применению их для создания автоматизированного УЗК рельсов и посвящена настоящая диссертационная работа

Целью работы является кардинальное повышение эффективности систем автоматизированного ультразвукового контроля рельсов в процессе их производства, эксплуатации, восстановления и сварки путём создания специализированных средств дефектоскопии на базе ЭМАП, использования современных комплексов автоматики и вычислительной техники.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

- оценить перспективы применения ЭМАП для решения актуальных проблем НК рельсов;
- выполнить анализ достижений в направлении создания многофункциональных ЭМАП, возможностей разрабатываемой и работающей аппаратуры НК и их использованием;
- произвести экспериментальное и теоретическое исследование зависимости ЭМАП от их параметров с целью добиться наилучшего соотношения сигнал-помеха, повышения чувствительности контроля и обнаружения наиболее опасных дефектов в рельсах;
- создать конструкцию ЭМАП, отвечающую потребностям НК рельсов;
- разработать схемы контроля, позволяющие наилучшим образом реализовать преимущества ЭМАП при диагностике рельсов;
- разработать программно-аппаратный комплекс, предназначенный для бесконтактного УЗК рельсов;
- разработать конструкцию, изготовить и внедрить установку для НК стародеревянных рельсов на РСР с использованием ЭМАП

Методы исследования и достоверность результатов. Экспериментально-теоретические исследования проводились с применением теории лучевой акустики, дифракции звуковых и электромагнитных волн. Использованный мате-

матический аппарат включал в себя теории упругости, вероятности и статистики, соответствующие дифференциальные уравнения, метод конечных элементов. Для теоретических исследований разработана методика численного расчета электромагнитных и акустических полей, применялись вычислительный язык MathCAD-2001, программы ELCUT, система COSMOS/M, современные ЭВМ. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием стандартной и специально созданной аппаратуры на различных образцах, моделях дефектов и натуральных объектах. Разработанная установка УД-ЭМА-PCП-01 подвергалась длительной производственной проверке и уже внедрена на 19 PCП. Результаты её работы сопоставлялись с результатами, полученными с помощью съёмных ультразвуковых дефектоскопов для сплошного контроля рельсов (Поиск-10^Э, РДМ-2 и АВИКОН-01) с регистраторами.

Научная новизна.

1. Установлены принципы и разработаны пути создания оптимизированной магнитной системы ЭМАП, позволившие минимизировать их массогабаритные характеристики и повысить индукцию получаемого магнитного поля.

2. Просчитаны и экспериментально отработаны особенности воздействия на генерируемый звук конструктивных элементов ЭМАП: катушек, экранов, размеров, межвитковых расстояний токопроводов, величин зазоров, временной формы импульсов, параметров объектов контроля.

3. Создан ЭМАП, способный последовательно излучать импульсные сигналы под углами 35° и 60°. Причём, волны, генерируемые и принимаемые им под углами, заметно отличающимися от рабочих, оказываются незначительными.

4. Впервые волны Рэля применены в системах автоматизированного НК рельсов.

5. Получено теоретическое решение, позволяющее организовать высокоэффективную работу пары ЭМАП, работающих под разными углами и способных надёжно контролировать любую заданную область сечения головки рельса.

6. Создан ряд программно-аппаратных комплексов НК на базе передовых достижений радиоэлектроники и вычислительной техники, способных в автоматическом режиме осуществлять сбор, анализ, хранение, обработку и представление результатов контроля в реальном масштабе времени. Это позволило повысить надёжность обнаружения дефектов в рельсах, увеличить оперативность контроля и сократить его трудоёмкость.

7. Спроектирована и изготовлена установка УД-ЭМА-PCП-01, предназначенная для входного автоматизированного бесконтактного УЗК старогодных рельсов, в которой реализован электромагнито-акустический способ возбуждения и приема ультразвуковых колебаний, нашли отражение научные принципы, сформулированные в диссертации. Установку можно использовать для приёмочного контроля рельсов при их производстве на металлургических комбинатах.

Практическая ценность работы определяется теоретической и прикладной направленностью всех представленных в ней материалов. Сформулированные в ней решения могут быть использованы при разработке любых мобильных и стационарных средств автоматизированного НК рельсов. Они послужили основой для создания автоматрис дефектоскопных, успешно работающих на всех железных дорогах страны.

Результаты и выводы диссертации позволяют осуществлять проектирование ЭМАП для различных целей с заранее заданными качествами. Созданный экспериментальный стенд даёт возможность проверять справедливость полученных числовых решений и корректировать конструкцию преобразователей и формы применяемых импульсных сигналов. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет организовать работу ЭМАП не только для бесконтактного УЗК рельсов и колёсных пар в процессе «производство-эксплуатация-восстановление», но и для решения других прикладных задач. Технические решения, положенные в основу установок УД-ЭМА-РСП-01 для входного автоматизированного бесконтактного НК старогодных рельсов на РСП, опыт их эксплуатации могут быть реализованы при создании автоматрис и вагонов-дефектоскопов, использующих ЭМАП, а также в других областях. Они могут быть полезными при отработке способов защиты ЭМАП от внешних электромагнитных помех, от попадания на них стружки, грязи, ржавчины и др., при выборе наиболее перспективных схем контроля, обработки, документирования и хранения информации о состоянии рельсов.

Реализация и внедрение результатов работы. По результатам работы автора разработаны, изготовлены и эксплуатируются на путевом хозяйстве страны около 50 автоматрис различного класса, а также свыше 10 вагонов-дефектоскопов. Только с 1997 по 2004 гг. находящимися в эксплуатации автоматрисами проконтролировано выше 1.5 млн. км пути и обнаружено свыше 5000 ОДР. Кроме того, созданы и успешно эксплуатируются 19 автоматизированных установок типа УД-ЭМА-РСП-01, предназначенных для входного автоматизированного бесконтактного НК старогодных рельсов, в которых нашли применение созданные ЭМАП. Отработаны способы и конструкции ЭМАП для возбуждения и приёма ультразвуковых волн различного типа при проверке рельсов в рельсосварочных поездах. Спроектированы, изготовлены и установлены в ультразвуковом канале автоматрис и вагонов-дефектоскопов программно-аппаратные комплексы сбора и обработки информации «Поиск-20», «Поиск-20М», а для совмещённого УЗК рельсов «Поиск 20М1» и «Поиск-2000». Для бесконтактного УЗК рельсов и колёсных пар с применением ЭМАП создан программно-аппаратный комплекс УД-ЭМА-РСП. В ходе эксплуатации таких комплексов был выявлен ряд их эксплуатационных преимуществ по сравнению с ранее применяемой для этих целей аппаратурой.

Внедрение результатов диссертационной работы предусмотрено «Программой повышения безопасности движения транспорта в 2001-2005 гг.».

Апробация работы. Основные положения и результаты, полученные в работе на различных стадиях её выполнения, обсуждались: на 3-й Международной конференции «Диагностика трубопроводов» (Москва, 2000 г.), в Школе-семинаре «Состояние и направления развития средств дефектоскопии рельсов в условиях реформирования путевого хозяйства» (СПб, 2002 г.), на Третьей Украинской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», (Днепропетровск, 2000 г.), на Девятой и Десятой международных конференциях «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», (Ялта, 2001 г.), на XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика», (СПб, 2002 г.), на 13 и 14 Международных деловых встречах «Диагностика-2003» и «Диагностика-2004» (Мальта и Египет), на 1-й Национальной конференции «Методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», (Кишинёв, 2003 г); на У Всероссийском научно-техническом семинаре «Методы и средства НК», (СПб, 2004г.); на Международной научно-практической конференции «Безопасность и логистика транспортных систем» (Самара, 2004 г), на секциях НК НТС МПС России. Мобильные и стационарные средства, приборы и аппаратура НК, в которых реализованы результаты диссертационной работы, неоднократно демонстрировались на международных, российских и др. выставках, удостоившись Дипломов МПС России. Они использовались в НИР и НИОКР, проводимых в рамках Государственной программы и решении Коллегии МПС в НПП «ВИГОР». Результаты выполненных исследований нашли применение в учебном процессе, на организованных курсах для операторов-дефектоскопистов в МИИТ, РАПС и других учебных заведениях, а также в обучающей программе, удостоенной Диплома 1-й степени МПС РФ на выставке путевой техники. в Калуге, 2002 г.

Основные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся комплексное решение проблемы повышения эффективности НК рельсов, создания автоматизированных средств с применением бесконтактных преобразователей, теоретические и прикладные аспекты разработки и эксплуатации ЭМАП. А именно:

1. Экспериментально-теоретические основы проектирования ЭМАП с заданными характеристиками, установленные особенности влияния зазоров, экранов, магнита и катушек на параметры излучаемого и принимаемого звука.

2. Принципы конструирования ЭМАП, способных последовательно работать под углами 35° и 60° , в которых излучение под углами, заметно отличающимися от рабочих, незначительно.

3. Аналитические решения и конкретные результаты, позволяющие с помощью 2-х и более ЭМАП организовать полный обзор головки рельсов или их участков с поверхности катания.

4. Зависимости волн Рэлея от параметров возбуждающих их ЭМАП, от величин зазоров и характеристик контролируемых объектов

5. Научно-прикладные принципы разработки и эксплуатации ультразвуковых установок типа УД-ЭМА-РСИИ-01 на базе ЭМАП, предназначенных для входного автоматизированного бесконтактного НК старогодных рельсов, используемые в них программно-аппаратных комплексов.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе 21 без соавторов. Из них 15 статей в российских и зарубежных изданиях, 15 докладов и 10 патентов.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы по исследуемой тематике, включающего в себя 178 наименований. Основной текст диссертации изложен на 152 страницах машинописного текста и содержит 118 фотографий, таблиц, графиков и рисунков.

Основное содержание работы

Во введении обоснована цель работы, её актуальность, перспективность, новизна и практическая значимость результатов исследований. Приведена краткая аннотация работы по главам.

В первой главе проведен анализ действующих систем НК рельсов и методов неразрушающего контроля, используемых как в России, так и за рубежом. Описаны типы и виды дефектов в рельсах, а также дана оценка вероятности их обнаружения существующими средствами НК. Показано, что современной аппаратурой наиболее уверенно обнаруживаются дефекты кодов 30Г, 26, 38, 30В и 27. На их долю пришлось 36% из всех выявленных в 2003 г. дефектов и практически отсутствовали аварии по их вине. Хуже выявляются дефекты кодов 21, 24, 20, 53 и 70. Из-за них произошло 28% аварий и они составили 52% из всех обнаруженных дефектов. Хуже всего находятся дефекты 69, 66, 65, 79, 60 и 62 кодов, на которые пришлось 52% аварий, но лишь 1% из зафиксированных дефектов. При этом около 65 % дефектов приходится на дефекты металлургического происхождения (коды 21, 30Г, 30В) и 8 % - на дефекты сварки (26.3, 56.3, 66.3).

Сейчас для повседневного контроля рельсов применяются средства как магнитного, так и ультразвукового контроля. Однако с помощью магнитного канала обнаруживаются только дефекты, расположенные в непосредственной близости от поверхности катания головки (3 – 5 мм). Ультразвуковой контроль об-

ладает более широкими возможностями, однако при его реализации возникают специфические трудности, связанные с особенностями ввода звука через зазор между преобразователем, контактирующей жидкостью и поверхностью головки рельса. Это приводит к нарушению между ними акустического контакта, особенно при низких температурах, при наличии загрязнений, на высоких скоростях. Поэтому здесь в первую очередь требуется применять бесконтактные приборы и методы контроля, не зависящие от этих факторов.

НК при восстановлении и сварке рельсов на РСП до недавнего времени ограничивался визуально-измерительными и ультразвуковыми приёмочными испытаниями только сварных стыков рельсов, что приводило к возможности отправки на железные дороги страны рельсов с потенциально опасными дефектами в основном металле. В полевых условиях НК рельсов в основном производится съёмными дефектоскопами. Они в целом обладают высокой чувствительностью, с их помощью обнаруживается более 94% всех дефектов. Однако такой контроль весьма трудоёмок, его результаты существенно зависят от человеческого фактора. Поэтому актуальной является задача разработки и внедрения мобильных автоматизированных средств НК, надёжность и чувствительность обнаружения дефектов у которых должна быть по крайней мере не ниже, чем у съёмных дефектоскопов. Только с их использованием появляется возможность организовать унифицированную комплексную систему НК и мониторинга всего рельсового хозяйства страны, не требующую больших трудовых и материальных затрат, сформировать единые стандарты обнаружения, хранения и передачи информации, создать комфортные условия для содержания аппаратуры и труда для персонала.

При реализации контактных методов (прежде всего пьезоэлектрического) поверхность контроля должна иметь соответствующую подготовку, а между нею и датчиком требуется помещать контактирующую среду. Увеличение скорости контроля при использовании контактного ультразвука ведёт к потере акустического контакта датчиков с рельсом, росту помех и существенному понижению достоверности контроля. Поэтому в настоящее время контроль мобильными средствами разрешается производить лишь со скоростью, не превышающей 40 км/час. В этой связи актуальным является разработка методов бесконтактного возбуждения и приёма ультразвука, не столь сильно зависящего от указанных обстоятельств. И среди них наиболее перспективным является электромагнито-акустический метод и датчики ЭМАП, вопросы разработки и применения которых для контроля рельсов рассмотрены в последующих главах диссертации.

Во второй главе проведен анализ работы основных узлов ЭМАП. Рассмотрены конструктивные особенности и характер работы ЭМАП, подробно анали-

зируется физическая природа ЭМА-эффекта, генерация и регистрация звуковых импульсов с его использованием.

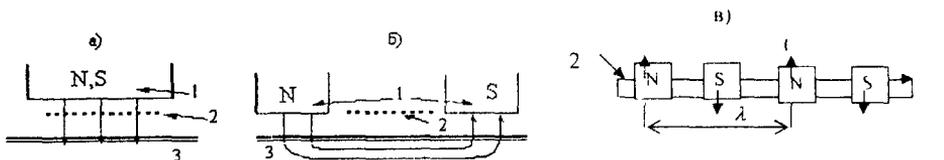


Рис 1 Схемы работы типовых ЭМА-преобразователей

Магнитное поле, создаваемое источниками 1 (рис. 1), проникает в контролируемое изделие 3, между магнитом и изделием помещается катушка с током 2. Под действием переменного электрического поля, генерируемого ею, в электропроводящей поверхности изделия индуцируются вихревые токи Фуко. Они, вступая во взаимодействие с внешним магнитным полем 1, вызывают силы Ампера, становящиеся источником приповерхностных механических напряжений. Причём, если магнитное поле 1 падает по нормали к поверхности, тогда преимущественно генерируются поперечные ультразвуковые волны (рис. 1а), а если оно распространяется вдоль поверхности – излучаются волны продольной поляризации (рис. 1б). Когда над катушкой располагаются магниты с чередующимися магнитными полюсами, генерируются SH-поляризованные поперечные волны (рис. 1в).

Кроме того, при контроле ферромагнетиков вместе с указанным механизмом возбуждения ультразвука возникают магнитострикционные и магнитные силы, которые также способны служить источником акустических колебаний. Однако, как показали исследования, последние заметны только в малых магнитных полях, а поэтому не оказывают существенного воздействия на работу обычно применяемых для неразрушающего контроля ЭМАП поперечных волн.

Обратный эффект проявляется в возникновении индукционных токов в гокопроводах катушки, когда поверхность металлов – а значит и располагаемые в них электроны, под действием ультразвука начинают колебаться в постоянном магнитном поле. Причём, поскольку ЭМАП являются обратимыми, для них справедлив принцип взаимности, согласно которому характеристики излучения и приёма звука такими преобразователями идентичны. И это даёт возможность изучать работу ЭМАП, исследуя либо только их режим излучения, либо только режим приёма.

Анализ публикаций, посвященных современному состоянию разработок ЭМАП показал, что ЭМАП уже прошли стадию предварительной отработки и превратились в полноправные средства бесконтактного УЗК изделий самого широкого профиля. С их помощью может осуществляться контроль как при высоких, так и при низких температурах, с обработанными или шероховатыми

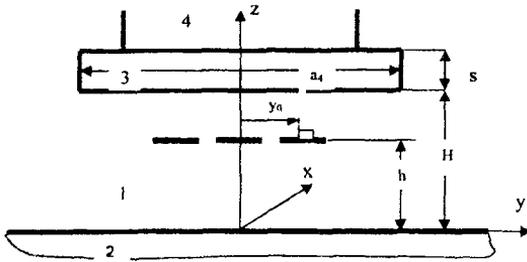


Рис 2 Расчетная модель

поверхностями, сквозь слой покрытия или грязи, как в ручном, так и в автоматизированном режимах, в покое и в движении. Несомненным преимуществом их является бесконтактность. Соотношение сигнал/шум у них оказалось примерно таким же, как и у аналогичных по сечению излучающей части и рабочей частоте ПЭП. И это позволяет с помощью ЭМАП достигать чувствительности контроля, близкой к получаемой современными контактными методами. В то же время следует признать, что несмотря на большое число публикаций, ещё не создано достаточно эффективного теоретического аппарата, который позволил бы надёжно рассчитывать конструкцию ЭМАП. Не хватает экспериментальных исследований, способных предоставить сведения, необходимые для создания датчиков с заданными характеристиками. В связи с этим исследования в этих направлениях остаются весьма актуальными.

В третьей главе представлены результаты исследования работы ЭМАП поперечных волн. Создана соответствующая модель и выполнен расчет магнитного тракта преобразователей, что позволило оптимизировать их конструкцию.

В результате учёта воздействующих на работу ЭМАП факторов расчётная модель задачи выглядит следующим образом (рис.2). Номером 1 в ней показана среда, в которой располагается катушка преобразователя, 2- контролируемая среда, 3 - обозначен ограниченный экран, расположенный перед магнитопроводом 4. Соответствующие размеры в направлении y показаны на рисунке. В продольном направлении x - размер работающей части катушки для всех элементов преобразователя конечен и полагался равным ширине магнитопровода 1. На электроны в металлах, находящиеся под действием переменного магнитного поля, действуют силы Лоренца, вызывающие появление токов Фуко I_Φ . Их взаимодействие с полем постоянного магнита индукцией B_0 ведёт к появлению силы Ампера \vec{F} , возникающей вследствие передачи электронами механических импульсов решётке металла. Она описывается уравнением $\vec{F} = I_\Phi [\Delta \vec{l} \times \vec{B}_0]$, где $\Delta \vec{l}$ - длина проводника с током в магнитном поле. Будем считать $I_\Phi = j_\Phi \Delta S$, т.е. сила токов Фуко равна их плотности j_Φ в сечении проводника площадью ΔS , перпендикулярном направлению токов. Тогда $\vec{j} = \vec{F} / \Delta V = [j_\Phi \times \vec{B}_0]$ - механическая сила, действующая на единицу объёма вещества, помещённого в магнитное поле.

После выполнения всех требуемых преобразований находим $f_y = i\omega B_0 \sigma_2 \Psi_2$. Объёмная сила f_j служит источником всех волн в изделии и характеризует направление их действия. Для анализа акустических сигналов, возбуждаемых указанным источником, использовалось дифференциальное уравнение Навье. В результате его преобразований получены следующие дифференциальные уравнения, описывающие поведение скалярного и векторного потенциалов акустических смещений: $(\Delta + k^2)\Phi = -\frac{1}{\rho\omega^2} \text{div } \vec{f}$, $(\Delta + k_t^2)\vec{\Gamma} = -\frac{1}{\rho\omega^2} \text{rot } \vec{f}$, где k и k_t - волновые числа, ω - параметр преобразования Фурье импульсного сигнала, а ρ - плотность материала.

После использования граничных условий на поверхности тел контроля и выполнения всех требуемых преобразований для напряжения поперечной волны, генерируемых одним токопроводом в магнитном поле, получено соответствующее решение. Суперпозиция волн, излучаемых каждым токопроводом, формирует амплитуду и направленность излучения всего ЭМАП. Справедливость полученных теоретических решений была подтверждена соответствующими экспериментальными исследованиями. В дальнейшем эти результаты использовались для определения параметров ЭМАП при их конструировании и оптимизации.

На основе проработанных моделей проведено изучение магнитного графта ЭМАП, которое позволило оптимизировать их конструкцию, сократить весогабаритные характеристики при повышении в то же время индукции постоянного магнитного поля. Исследования проводились с помощью как натурального, так и численного эксперимента, выполняемого с применением программы EL-CUT. Учитывались как параметры магнитов, магнитопровода и кожуха, так и зависимость магнитной проницаемости применяемых материалов от напряжённости магнитного поля.

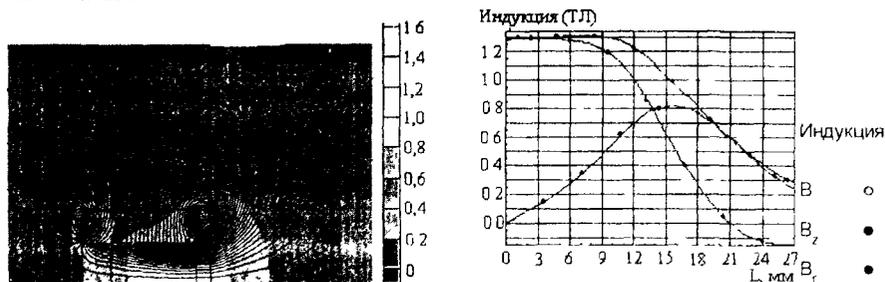


Рис. 3. Пространственное распределение магнитной индукции и её значения вдоль поверхности рельса при зазоре 5 мм. В – полное, B_z - нормальная и B_r - радиальная составляющие поля

На рис. 3 слева показан магнитопровод, составленный из магнита и стали. Над ними располагается магнит, немагнитный кожух не указан. Данные расчё-

ты, а также натурные эксперименты легли в основу оптимизированной магнитной системы ЭМАП. В частности, удалось установить, что ослабление индукции магнитного поля при увеличении зазора носит экспоненциальный характер с показателем экспоненты, равным $(0.150 \pm 0.007) \text{ мм}^{-1}$.

Для проведения экспериментальных исследований был создан специальный измерительный стенд. С его помощью были изучены особенности генерации поперечных волн одним токопроводом (монополем) и одним диполем. Результаты расчета и эксперименты показали, что максимум излучения токопроводом поперечно поляризованных акустических сигналов располагается по нормали к поверхности контролируемого образца. Имеют также место два симметричных максимума, обусловленные 3-м критическим углом контролируемого материала. За пределами указанных углов сигналы быстро убывают, что свидетельствует о трудности проектирования ЭМАП, работающих под большими углами, и сравнительной простоте их конструирования, когда они работают под углами, близкими к $\theta = 0$ или к $\theta \approx \theta_{кр}$. При наличии экрана в центре характеристики наблюдается минимум, поскольку последний формируется отражением электромагнитной волны от экрана, которая падает на поверхность мишени в противофазе с прямой волной и частично компенсирует её.

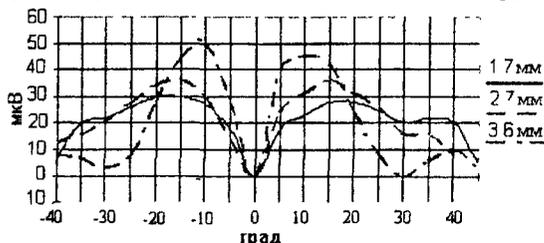


Рис. 4. Влияние базы диполей на характеристики излучаемого звука

Исследовано влияние базы диполя (расстояния между токопроводами) на характеристики излучаемого звука (рис. 4). Как расчёт, так и эксперимент показали, что увеличение базы диполя, которое требуется для увеличения угла излучения, сопровождается

появлением дополнительных максимумов под меньшими углами.

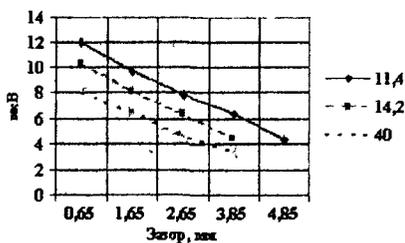


Рис. 5. Экспериментальные зависимости амплитуды волн сигналов прямых ЭМАП по нормали от величины зазора при различных экранах (мм)

Описаны особенности конструкции ЭМАП, работающих под прямыми углами. Из измерений выяснилось, что диаграммы направленности излучения таких преобразователей слабо зависят от зазора и размеров экрана, однако амплитуда при варьировании указанных параметров меняется значительно (рис. 5). Таким образом, чем большим был экран, тем меньшей оказывалась амплитуда излучения при одном и том же зазоре.

В целом можно констатировать, что прямые ЭМАП работают надёжно и при их проектировании обычно не встречается существенных трудностей. Описаны особенности создания ЭМАП, работающих под косыми углами. При разработке таких преобразователей обычно используется теория излучения решёток. Однако на практике ЭМАП под такими углами работают более сложным образом, чем следует из классических соображений. Выяснилось, что их надёжная работа во многом зависит от параметров импульсов возбуждения, от вида и размеров используемых экранов, от числа проводов в каждом токопроводе, количества диполей и даже от расстояний кагушки до экрана и до объекта контроля. Поэтому проектирование хороших преобразователей, работающих под такими углами, представляет собой сложную задачу. Ещё в большей мере усложняется она, когда требуется спроектировать ЭМАП, работающий под большими углами, поскольку диполи под ними излучают звук плохо.

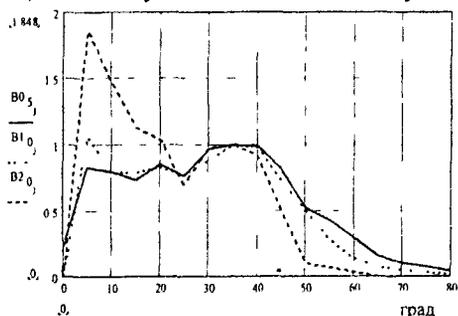


Рис 6. Нормированные диаграммы направленности экспериментально спроектированного ЭМАП при различных зазорах (B_{05} - 0.5 мм, B_{10} - 1 мм, а B_{20} - 2 мм).

В частности, на рис. 6 приведены данные измерений направленности ЭМАП, первоначально применяемых на установках УД-ЭМА-РМП-01. Очевидно, что работать со столь широкой диаграммой направленности сложно. Здесь амплитуда полезного сигнала сравнительно невелика, существенна зависимость от зазора, затруднено получение хорошего соотношения сигнал-помеха. Следовательно, при работе с такими датчиками трудно достичь высокой чувствительности, сложно

установить, где в действительности располагается дефект.

После многочисленных расчётных и экспериментальных исследований удалось сконструировать ЭМАП, в котором указанные недостатки во многом ликвидированы (рис. 7).

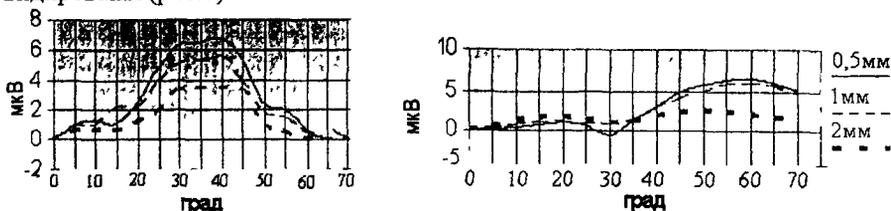


Рис. 7. Экспериментальные характеристики излучения оптимизированного ЭМАП, предназначенного для работы на углах 35° и 60° , при различных зазорах

Кроме того, при возбуждении на различных частотах он способен последовательно работать под разными углами и это открывает дополнительные возможности. Очевидно, что с такими преобразователями работать значительно удобнее. Преобразователь защищён патентом.

Одной из самых злободневных проблем современного НК является обнаружение вертикально расположенных трещин внутри головки рельсов со стороны поверхности катания. Для их обнаружения обычно применяют системы, в которых звуковые волны падают на подголовочную часть рельса и, отражаясь от неё, изменяют угол своего распространения вдоль рельса, однако формируемая при этом волна ведёт себя сложным образом. А.А.Марков предложил для этой цели использовать два идентично работающих преобразователя, лучи от которых встречаются на поверхности рельса. Однако при применении ЭМАП приходится учитывать, что они надёжно работают только под углами 35° и 60° , к тому же интерес представляют любые дефекты, расположенные в головке рельса, и это существенно усложняет задачу. В связи с этим был выполнен математический анализ соответствующих схем прозвучивания.

Для исследования поведения сигналов от двух источников, расположенных на верхней части головки рельсов с координатами b_1 и $-b_2$, повернутых под углами относительно оси рельса x , равными β_1 и $-\beta_2$ и излучающих звук под углами относительно поверхности θ_1 и θ_2 , рассматривались схемы, представленные на рис. 8. Из геометрических соображений следует, что углы α_{1x} и α_{1y} связаны с характеристиками источников 1 и 2 следующим образом $\alpha_{1,2x} = \arctg(\tg \theta \cos \beta_{1,2})$; $\alpha_{1,2y} = \arctg(\tg \theta \sin \beta_{1,2})$

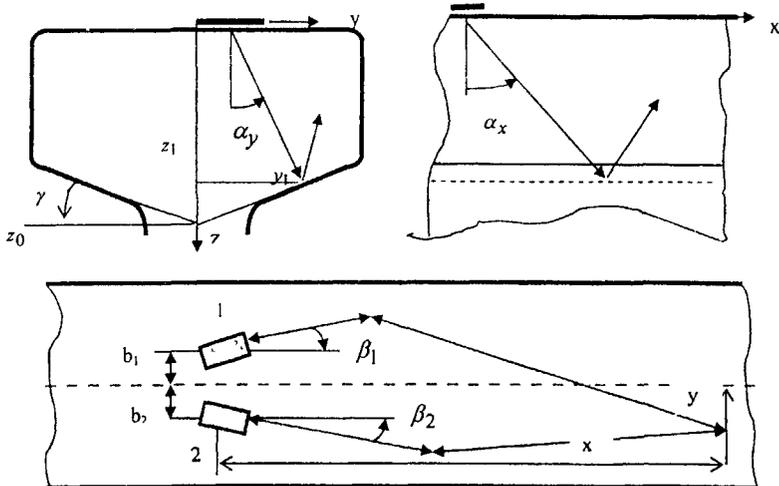


Рис. 8. Схема излучения источника, расположенного на головке рельса.

Тогда координаты точки касания луча на поверхности нижней кромки головки рельса описываются следующими выражениям, в которых угол γ определяет наклон нижней кромки головки рельса:

$$\pm y_{1,2}^0 = b_{1,2} + \frac{(z_0 - b_{1,2} \operatorname{tg} \gamma) \operatorname{tg} \theta \sin \beta_{1,2}}{1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \theta \sin \beta_{1,2}}; \quad z_{1,2}^0 = \frac{z_0 - b_{1,2} \operatorname{tg} \gamma}{1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \theta \sin \beta_{1,2}}.$$

При этом координаты источников b_j и β_j связаны между собой уравнением $b_{1,2} = y_0(1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \theta \sin \beta_{1,2}) - z_0 \operatorname{tg} \theta \sin \beta_{1,2}$. Его использование позволяет вычислять искомые параметры $b_{1,2}$ и $\beta_{1,2}$, требуемые для совмещения сигналов от обоих преобразователей в выбранной точке головки рельса. Расчеты показали, что сигналы от обоих преобразователей в рельсе Р65 встречаются (т.е. будет наблюдаться наивысшая чувствительность контроля) на расстоянии 70 мм практически в центре головки рельсов, если угол поворота первого преобразователя равен 0° , а второго -30° . Причём, на других расстояниях сигналы расходятся, охватывая практически всю головку. При этом центр преобразователя №1 (35°) должен располагаться относительно оси рельса на расстоянии 27 мм, а №2 (60°) – на расстоянии 10 мм на той же стороне рельса. С помощью полученных решений можно просмотреть и другие ситуации, представляющие практический интерес.

В целом из результатов данного раздела можно сделать следующие основные выводы. В токопроводящих материалах, таких, как сталь рельса, генерация звука ЭМАП в основном обусловлена токами Фуко, взаимодействующими с постоянным магнитным полем. При сравнительно больших зазорах наибольшие значения индукции постоянного магнитного поля вблизи поверхности контролируемого изделия наблюдается, когда в качестве материала магнитопровода в магнитной системе ЭМАП используются сталь или магнетодиэлектрик. При зазорах, меньших 3 мм, вследствие насыщения стального магнитопровода этот эффект снижается. Влияние зазора между экраном и токопроводом в ЭМАП, а также между токопроводом и поверхностью изделия идентично. Их увеличение не только приводит к понижению амплитуды излучения, но и делает более узкой его направленность. Рост базы диполя, требуемый для увеличения угла излучения, приводит к возникновению паразитных сигналов под малыми углами.

При использовании токопроводящих экранов наблюдается понижение амплитуды сигналов, излучаемых под нормальным углом. Причём, чем больше размеры этих экранов, тем сильнее этот феномен. Зависимость ослабления излучаемого звука от зазора оказывается значительно большим, чем соответствующее уменьшение постоянного магнитного поля. Указанный эффект в наибольшей мере проявляется при повышении частоты и увеличении угла наблюдения. Направленность излучения прямых преобразователей практически не за-

висит от величины зазора, а у наклонных она значительна и проявляется тем в большей степени, чем выше угол излучения, частота и величина зазора. Число периодов импульсного сигнала должно быть равно количеству используемых диполей, но не меньше 3-х. При этом достигается наименьшая мёртвая зона контроля и успевает сформироваться нужная диаграмма направленности. ЭМАП способны устойчиво работать только под углами 0° , 35° и 60° , на всех других углах максимумы излучения неустойчивы. Применением 2-х и более ЭМАП, одни из которых работают в режиме излучения, а другие – приёма, расположенных на головке рельса, с помощью разработанного математического аппарата можно обеспечивать контроль всей головки рельса или выбранного его участка.

В четвертой главе представлены результаты исследования волн Рэлея, излучаемых электромагнитно-акустическими преобразователями.

В последнее время все больший интерес вызывает применение волн Рэлея для НК рельсов, так как они позволяют уверенно обнаруживать не только поверхностные дефекты, но и те, которые располагаются на глубине нескольких миллиметров и более. В данной главе приводятся результаты исследования волн Рэлея, излучаемых токопроводом и диполем. Установлено, что зависимость амплитуды таких волн от конструктивных параметров преобразователя аналогичны таковым для обычных ЭМАП, а направленности излучения этих волн как монополюс, так и диполем одинаковы и слабо зависят от величины зазора.

Приводятся результаты изучения работы всего ЭМАП для рэлеевских волн. Измерения производились в рельсе двумя ЭМАП, один из которых излучал, а другой принимал указанные сигналы. Из результатов измерения следует, что амплитуды волн Рэлея с расстоянием в рельсе на различных частотах убывают немонотонно (рис. 9).

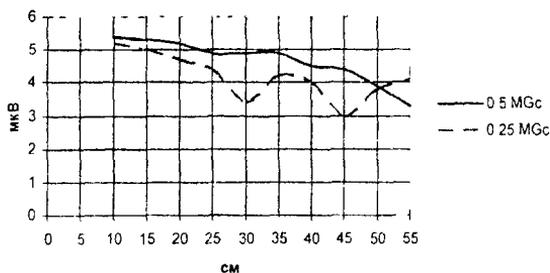


Рис. 9. Ослабление волн Рэлея от расстояния в рельсе

Особенно это характерно для частоты 0,25 МГц, у которой наблюдаются устойчивые минимумы на расстоянии 30 и 45 см, но заметны они также и на частоте 0,5 МГц при 25 и 40 см. Они определяются частотой и формой исследуемого объекта и свидетельствуют о заметном влиянии волн, формируемых нижней кромкой рельса.

Так, при испытаниях на образцах толщиной 20 и 70 мм на частоте 0.25 МГц наблюдалось появление волн Рэля, отражённых от противоположной грани, уже начиная с расстояния 40 см. Данное обстоятельство свидетельствует о непростой природе волн, излучаемых данными ЭМАП, в головке рельса, указывает на формирование в ней уже начиная с некоторого расстояния волн Лэмба.

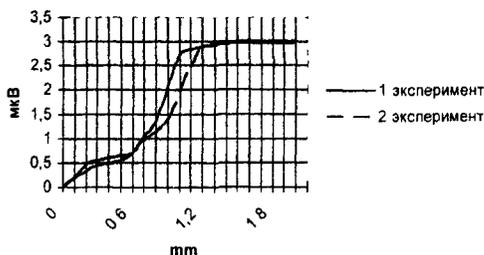


Рис. 10. Отражение рэлеевской волны от пропилов разной глубины

На рис. 10 приведены результаты измерения амплитуд волны Рэля частотой 0.5 МГц, отражённой от пропилов различной глубины, полученные на образце 20 x 200 мм. Из них следует, что при увеличении глубины пропила, большей 1,2 мм, отражение практически перестает зависеть от его глубины

Это отвечает теории волн Рэля, но не соответствует результатам, полученным в образцах, сопоставимых с толщиной головки рельса.

Представляет интерес также исследовать диаграммы направленности типовых ЭМАП рэлеевских волн. Полученные диаграммы оказались типичными для произвольных линейных излучателей импульсных сигналов.

Анализ результатов показал, что волны Рэля, начиная с некоторых расстояний, определяемых геометрией источника, частотой и длительностью импульсов, при распространении в рельсе убывают сравнительно слабо, но не монотонно. Это объясняется тем, что в нём в связи с ограниченностью толщины головки начинают формироваться волны Лэмба, которые распространяются на существенно большую глубину, чем классическая волна Рэля. Поэтому с помощью возникающих таким образом волн можно обнаруживать дефекты в головке, располагаемые на существенно большей глубине, чем это следует из свойств рэлеевских волн. И это в полной мере подтверждается опытом эксплуатации установок УД-ЭМА-РСР-01. В то же время в толстом образце и при работе на частоте 0.5 МГц, когда генерируются чистые рэлеевские волны, сигнал отражения увеличивается с ростом глубины пропила монотонно до значения, равного всего лишь 1.25 мм. Направленность излучения волны Рэля определяется длиной токопроводов, частотой и является типовой для линейного излучателя. Она слабо зависит от величины зазора, в то же время для неё сохраняются зависимости от параметров ЭМАП, характерные для обычных поперечных волн.

В пятой главе описана установка для входного автоматизированного бесконтактного ультразвукового неразрушающего контроля старогодных рельсов

на рельсосварочных комплексах УД-ЭМА-РСР-01. До настоящего времени входной контроль старогодных рельсов в системе рельсосварочных поездов (РСР) МПС РФ осуществлялся главным образом визуальным методом. И это зачастую приводило к некачественному состоянию рельсов, поставляемых на дороги, после их восстановления и ремонта. Поэтому для надёжного входного автоматизированного бесконтактного ультразвукового контроля старогодных рельсов разработана установка УД-ЭМА-РСР-01, в которой реализован электромагнито-акустический способ возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний (ЭМА-способ). Основным элементом установки является дефектоскопический комплекс, состоящий из стойки генераторной, блока ЭМАП, усилительного и согласующего блоков. Электрические сигналы, вырабатываемые генераторной стойкой, подаются на ЭМАП, которые возбуждают в контролируемом рельсе ультразвуковые колебания. Отражённые волны возвращаются к ЭМАП, где преобразуются в электрические сигналы. Полученные таким образом импульсы после усиления подаются на вычислительный комплекс для обработки и регистрации. Структурная схема установки приведена на рис. 11.

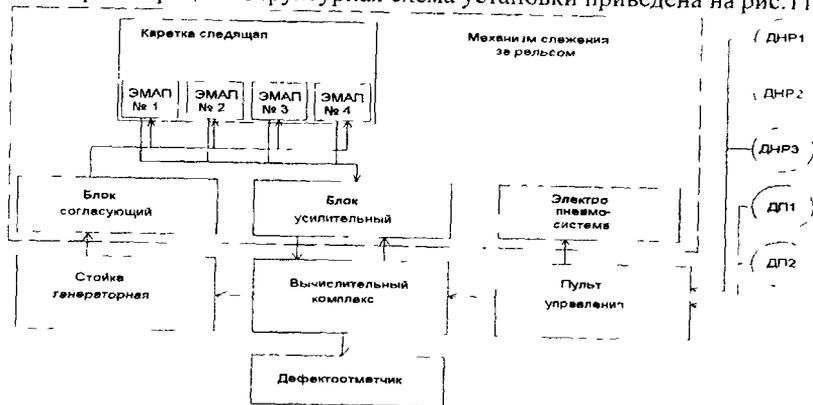


Рис. 11. Структурная схема установки УД-ЭМА-РСР-01

В данной схеме введены следующие обозначения: ДП1, ДП2 – датчики пути;

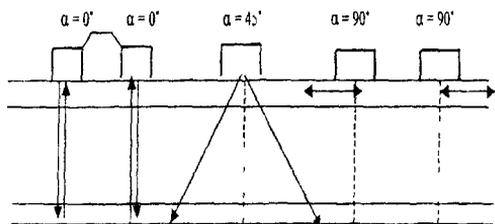


Рис. 12 Схема размещения ЭМАП над контролируемым рельсом в РСР

ДНР1, ДНР2, ДНР3 – датчики наличия рельса. ЭМАП размещены на следящей коретке, служащей для центровки положения преобразователей по оси поверхности катания головки рельса. Зазор между рабочей поверхностью ЭМАП и поверхностью катания головки рельса составляет величину порядка 1 мм.

Для оптимального обнаружения дефектов принята схема прозвучивания рельса, базирующаяся на использовании 5-ти ЭМАП (рис. 12). В ней преобразователь, излучающий звук под нормальным к поверхности углом ($\alpha = 0^\circ$), работает на частоте 1,8 МГц, применяется для контроля шейки рельса и её проекции в головку и подошву эхо-импульсным и зеркально-теневым методами и обнаружения дефектов кодов 52.1-2, 53.1-2 и 69. ЭМАП рэлеевских волн ($\alpha = 90^\circ$, частоты 0,5 МГц и 0,2 МГц) предназначены для контроля головки рельса низкочастотными поверхностными волнами эхо-импульсным и теневым методами одновременно в двух противоположных направлениях. Очевидно, что внедрение разработанных ЭМАП, работающих под углом 60° , ещё в большей мере расширяет возможности установки. Подача рельсов на контроль осуществляется в ручном и в автоматическом режимах. Устанавливается код дефекта и его местоположение в рельсе, данные контроля сохраняются для последующей расшифровки и принятия решения. Отметка дефектных зон осуществляется дефектоотметчиком, механизм слежения может выводиться из зоны контроля для периодического обслуживания и ремонта. Для калибровки установки используется контрольная плеть, состоящая из эталонных образцов с созданными в них моделями дефектов типов 11, 21, 26.3, 27, 30Г, 30В, 50, 52, 55, 56.3, 60 и 69.

В процессе контроля в реальном режиме времени предоставляется следующая информация: порядковый номер испытаний, ФИО мастера и оператора текущей смены, текущее время, номер контролируемого рельса (предусмотрена автоматическая и ручная их нумерация), показываются число дефектов и их местоположение в рельсе (расстояние от его начала). Изображаются дефектограммы получаемых сигналов в виде В-развёрток (контрастность цвета пропорциональна амплитуде сигнала), а при необходимости – А-развёрток, помещаются отметки дефектных сечений с автоматическим срабатыванием звуковой сигнализации при нахождении дефекта (рис. 13).

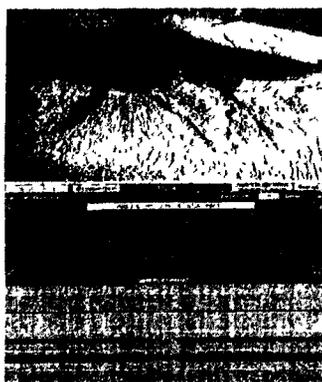


Рис. 13. Дефект рельса и его запись

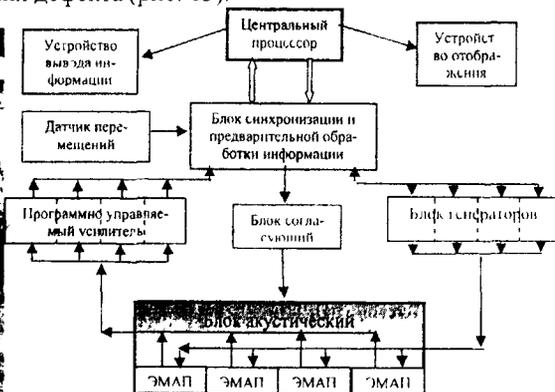


Рис. 14. Структурная схема комплекса УД-ЭМА-РСП

Аппаратная часть дефектоскопического комплекса состоит из электронной стойки УД-ЭМА-РСЦ, её структурная схема представлена на рис. 14. Использование комплекса позволяет автоматизировать как процесс измерений, так и систему обработки информации, её хранения и передачи. Осуществляется подсказка оператору о наличии дефекта на шифрограмме в автоматическом режиме, вычисляется истинная длина рельса и производится подсчёт сменного метража, осуществляется распечатка дефектограмм и ведомостей конгроя. Комплекс состоит из унифицированных блоков и может применяться не только на РСЦ, в мобильных средствах НК рельсов в пути с использованием ЭМАП, но также в системах контроля колёсных пар подвижного состава. Комплекс несложен в обслуживании благодаря программному обеспечению и простоте конструкции.

В процессе опытной эксплуатации установок УД-ЭМА-РСЦ-01 только за 10 месяцев 2004 года ими проконтролировано 791 171 км рельсов, в которых обнаружено 2 123 ОДР и 8 927 ДР. Одновременно на 3-х РСЦ (№№2, 20 и 21) производился контроль съёмными дефектоскопами. При этом оказалось, что если съёмными дефектоскопами в условиях РСЦ обнаруживалось 1.838 ОДР и 12.58 ДР на 1 км. старогодных рельсов, то установками УД-ЭМА-РСЦ 01 – уже 2.32 и 13.49 соответствующих дефектов

Производственная эксплуатация показала, что установки бесконтактного ультразвукового контроля УД-ЭМА-РСЦ-01 надёжно контролируют рельсы загрязнённые, ржавые, покрытые наледью и маслом в условиях высоких и низких температур. В них не требуется применять контактные жидкости, не нужно проводить сложные подготовительные мероприятия, понижаются требования к величине боковых, вертикальных и наклонных смещений рельса в процессе контроля. Установки работают не хуже существующих съёмных дефектоскопов, а использование в них поверхностных волн Релея позволяет обнаруживать дефекты не только в приповерхностном слое головки рельса, но и в её глубине. Созданный программно-аппаратный комплекс УД-ЭМА-РСЦ обеспечивает надёжную автоматизированную работу всех узлов установки, её автоматики и системы получения, обработки, анализа и хранения информации

Таким образом, установка бесконтактного ультразвукового контроля УД-ЭМА-РСЦ-01 является новым эффективным средством НК рельсов. ЭМА-метод контроля обладает широкими возможностями для использования в рельсовой дефектоскопии, в том числе при диагностике их мобильными средствами скоростного контроля, при выходном контроле рельсовых плетей на РСЦ после сварки, а также при выходной проверке качества рельсов на предприятиях-изготовителях. То есть он способен охватить весь цикл изготовления-эксплуатации-ремонта рельсов. ЭМАП могут найти широкое применение для контроля и других объектов железнодорожного транспорта, в том числе колёс-

ных пар, элементов подвижного состава. Они также могут найти широкое использование в других отраслях народного хозяйства: в нефтяной, газовой области, в воздушном и морском, автомобильном транспорте, на объектах тяжёлого машиностроения и др.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнено комплексное экспериментально-теоретическое исследование ЭМАП, позволяющее путём варьирования многими их параметрами, в том числе данными магнитов, характеристиками катушек, магнитопровода, экранов и величиной всех зазоров, формой применяемых электрических импульсных сигналов конструировать ультразвуковые бесконтактные системы, обладающие заданными качествами. А именно, направлять их излучение под нужными углами, ограничивать генерацию звука под углами, не являющимися рабочими, получать преобразователи, работающие под углами, близкими к 60° , формировать комбинирование схемы контроля несколькими преобразователями, излучающими различные виды акустических сигналов и т. д.

2. Разработан и внедрён ряд специализированных программно-аппаратных комплексов: для контактного ультразвукового контроля «Поиск-20М», «Поиск-2000» для бесконтактного автоматизированного контроля - «УД-ЭМА-РСП». Они установлены на автотомтрисах, вагонах-дефектоскопах и в установках УД-ЭМА-РСП-01. Это позволило обеспечивать мониторинг развития дефектов в рельсах, переходить к планированию их ремонта и замены с учётом реального технического состояния рельсов, осуществлять надёжное функционирование систем бесконтактного ультразвукового контроля, увеличить скорость контроля в самых экстремальных климатических условиях.

3. Разработана стационарная установка УД-ЭМА-РСП-01, предназначенная для входного автоматизированного бесконтактного ультразвукового неразрушающего контроля старогодных рельсов, в которой реализован ЭМА-способ возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний. Такие установки внедрены на 19 РСП и подтвердили свои высокие диагностические и эксплуатационные преимущества.

4. Создан новый класс мобильных средств контроля – дефектоскопные автотомтрисы. И уже сейчас их спроектировано 11 видов, изготовлено и поставлено на железные дороги страны около 50 единиц. Они используются в процессе эксплуатации дорог и не требуют приостановки движения по ним. Различные их модификации способны работать автономно, с увеличенными зонами обслуживания, в районах с суровыми климатическими условиями и даже на узко-

колейках и в туннелях (АМДС), обеспечивают нормальные условия для работы аппаратуры и повышенную комфортность для обслуживающего персонала Ведутся работы по использованию в них ЭМАП.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Горделий В.И. Состояния и направления развития средств неразрушающего контроля рельсов в пути Школа-семинар: «Состояние и направления развития средств дефектоскопии рельсов в условиях реформирования пугевого хозяйства», Сборник трудов. Санкт-Петербург, 2002 г. с 126 - 130

2. Горделий В.И. К вопросу оптимизации систем автоматизированного неразрушающего контроля рельсов Четвёртая национальная научно-техническая конференция и выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». Киев – 2003, с. 27 – 31.

3. Горделий В.И. К вопросу о повышении разрешающей способности скоростных систем неразрушающего контроля рельсов. Третья Украинская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». Днепропетровск – 2000, с. 184 – 186.

4. Горделий В.И. Повышение эффективности функциональных возможностей мобильных средств дефектоскопии рельсов. "В мире неразрушающего контроля" №1, 2000, с. 38 - 40.

5. Горделий В.И. Результаты работ НПП "ВИГОР" по созданию и внедрению высокоэффективных скоростных систем неразрушающего контроля рельсов Сборник научных трудов, выпуск 5; Киев-Львов, 2000 г. с 32 – 37.

6. Горделий В.И. Результаты работ НПП «ВИГОР» по созданию и внедрению высокоэффективных скоростных систем неразрушающего контроля рельсов Сборник материалов Третьей Украинской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», Днепропетровск 2000 г.

7. Горделий В.И. Следящая и искательная системы дефектоскопных автотомтрис НПП «ВИГОР». Материалы Девятой международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Ялта, 2001 г.

8. Горделий В.И., Ашуров Р.З. Мобильные средства для скоростного контроля рельсов НПП «ВИГОР». Москва. Материалы Десятой юбилейной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Ялта, 2002 г. с 15 – 16.

9. Горделий В.И. Следящая и искательная системы дефектоскопных автотомтрис НПП «ВИГОР», Москва Материалы Девятой международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Ялта, 2001 г.

10. Горделий В.И. Аппаратно-программный комплекс для скоростных средств контроля рельсов магнитными методами. "В мире неразрушающего контроля" №6, 1999, стр. 49.

11. Горделий В.И. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс для регистрации, хранения и обработки сигнала от искателей вагона-дефектоскопа, дефектоскопной автомотрисы «Неразрушающий контроль и диагностика», Санкт-Петербург, 2002 г.

12. Горделий В.И. Современная многоканальная универсальная стойка электронная «Поиск-2003». Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2004, №1, с. 62 – 63.

13. Горделий В.И., Алексеев А.В., Щекотков Ю.М. Устройство для слежения за боковой поверхностью рельса». Решение о выдаче свидетельства на полезную модель № 95114715/20 (025005).

14. Горделий В.И., Манохин В.А. Автомотриса дефектоскопная Патент №35095, приоритет от. 02.09.03 г.

15. Горделий В.И., Ситдииков Р.М. Автономная подвесная дефектоскопная тележка. Патент №37345, приоритет от 29.01.04 г.

16. Горделий В.И. Средство для ультразвуковой дефектоскопии Патент №37832 от 24.02.2004.

17. Горделий В.И., Станков И.М. Устройство для центровки искательной системы Мобильного дефектоскопа. Патент №38708 от 30.03.2004.

18. Горделий В.И. Установка для автоматизированного контроля рельсов Патент № 38148, приоритет 03.03.2004.

19. Горделий В.И. Дефектоскопные автомотрисы для ультразвукового контроля рельсов в пути. "В мире неразрушающего контроля" №5, 1999, с. 46 - 47

20. Горделий В.И. Об эффективности работы дефектоскопных автомотрис в 2000 г. "В мире неразрушающего контроля" №1, 2001 г., с.60 - 64

21. Горделий В.И. Об эффективности работы дефектоскопных автомотрис в 2000 году. Сб. 3-й Международной конференции «Диагностика трубопроводов». Москва, 2001 г.

22. Горделий В.И. Комплекс средств для бесконтактного ультразвукового контроля рельсов с применением электромагнитоакустических преобразователей (ЭМАП). "В мире неразрушающего контроля", №6, 1999, с. 49.

23. Горделий В.И., Чабанов В.Е. Исследование работы сфокусированного ЭМА-преобразователя. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №1, 2004, с. 29 – 33.

24. Чабанов В.Е., Горделий В.И. Теоретическое и экспериментальное исследование ЭМА-преобразователей. Четвёртая национальная научно-

техническая конференция и выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». Киев – 2003, с. 312 – 317.

25. Горделий В.И., Чабанов В.Е. Научные основы проектирования ЭМА-преобразователей, работающих под большими углами Международный научный форум специалистов Университетов, СПб, 2003 г., с. 18.

26. Чабанов В.Е., Горделий В.И. Наклонные электромагнитно-акустические преобразователи и анализ их работы. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. №2, 2004 г. с. 40 – 45.

27. Горделий В.И., Чабанов В.Е. Электромагнитно-акустический преобразователь. Патент № 37833, приоритет 19.02 2004.

28. Чабанов В.Е., Горделий В.И. Исследование волн Рэлея, излучаемых электромагнитно-акустическими преобразователями. Неразрушающий контроль и диагностика материалов, конструкций и окружающей среды. Сборник докладов У Всероссийского научно-практического семинара. СПб, 2004, с. 111 – 123.

29. Горделий В.И., Матвиенко В.С. Применение ЭМА-метода в рельсовой дефектоскопии. Материалы Десятой юбилейной международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Ялта, 2002 г. с.16 – 17.

30. Горделий В.И., Матвиенко В.С. К вопросу о входном неразрушающем контроле всего сечения старогонных железнодорожных рельсов бесконтактным электромагнитно-акустическим методом в условиях рельсосварочных поездов Материалы конференции «Методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Молдова, Кишинев – 2003, с. 151 – 154.

31. Горделий В.И. Конструкция и особенности работы ЭМА-систем УД-ЭМА-РСП-01, работающих в установках для контроля старогонных рельсов Четвёртая национальная научно-техническая конференция и выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». Киев – 2003, с. 300 – 305

32. Горделий В.И. Конструкция и особенности работы ЭМА-систем УД-ЭМА-РСП-01, работающих в установках для контроля старогонных рельсов. «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», №4, 2003, с. 54 - 57

33. Горделий В.И. Установка для входного автоматизированного бесконтактного ультразвукового неразрушающего контроля старогонных рельсов на рельсосварочном поезде. "Неразрушающий контроль и диагностика" Санкт-Петербург, 2002. Материалы XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика», Петербург, 2002 г.

34. Горделий В.И., Лещенко Н.Г. Программно-аппаратный комплекс УД-ЭМА-РСП для контроля бесконтактным ультразвуковым методом с применением электромагнитно-акустических преобразователей. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. №2, 2004 г. с. 55 – 56.

35. Горделий В.И., Лещенко Н.Г. Программно-аппаратный комплекс ультразвуковой дефектоскопии. Патент № 41156, приоритет 12.72 2004.

36. Горделий В.И., Ситдиков Р.М. Дефектоскопная тележка для магнитного и ультразвукового контроля рельсового пути. Патент №38320, приоритет от 16.03.04 г.

37. Попов А.М., Горделий В.И. К вопросу повышения эффективности неразрушающего контроля состояния пути на железнодорожном транспорте Труды международной научно-практической конференции «Безопасность и логистика транспортных систем», Самара – 2004

38. Горделий В.И., Ежов В.С., Анисимов В.В., Анисимов М.В. Искательная система с защитой от обледенения. Патент № 40977, приоритет 12.07 2004

39. Чабанов В.Е., Горделий В.И., Попов А.М. Исследование одного из типов нормальных волн, возбуждаемых ЭМА-преобразователями в трубопроводах. «Актуальные проблемы транспорта». Сборник научно-технических трудов, т.5, СПб, 2004 г. с. 63 – 72.

40. Горделий В.И. Экспериментальное исследование волн Рэлея, возбуждаемых ЭМА - преобразователями в железнодорожных рельсах «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», №4, 2004 г., с. 41-44.

Подписано в печать 21.12.2004
Объем 1,5 печ. л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1344

Отпечатано с готового оригинал-макета в издательстве СГУПС
Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191

Р - - 708

РНБ Русский фонд

2006-4

2756