

На правах рукописи



ЛЯНОЙ Вадим Вадимович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ
РЕГИСТРАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА**

05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
СЕРГЕЕВ Борис Сергеевич

Официальные оппоненты:

– **РОЗЕНБЕРГ Ефим Наумович**, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), первый заместитель генерального директора;

– **ШВАЛОВ Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Защита состоится 27 сентября 2019 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС) по адресу: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, аудитория Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан « ____ » « _____ » 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований. Действующие устройства железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) на сети дорог России морально и физически устарели. По данным отчётов ОАО «РЖД», последние десять лет темпы старения эксплуатируемого оборудования опережали темпы его обновления. Положения действующей в настоящее время «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» и других документов, определяющих развитие железнодорожного транспорта в РФ, не выполняются в части своевременного обновления и модернизации устаревших средств ЖАТ. Основная причина этого – несоответствие выделяемых объёмов финансирования и ресурсов, требуемых для обновления и модернизации систем ЖАТ традиционными методами.

В то же время в соответствии с нормативными документами РФ и стран содружества основным элементом контроля свободности участков пути были и остаются рельсовые цепи (РЦ), имеющие высокую ресурсоёмкость и, как следствие, высокую стоимость жизненного цикла (СЖЦ).

Одним из методов снижения темпов старения систем железнодорожной автоматики и телемеханики в условиях недостаточного финансирования является использование индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса (ИДК) вместо РЦ в системах контроля и системах централизации и блокировки (СЦБ) железнодорожного транспорта общего пользования. Системы ЖАТ (прежде всего, системы счёта осей) с использованием индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса обладают лучшими технико-экономическими показателями, чем у аналогичных систем с использованием рельсовых цепей. На модернизируемых участках пути они могут внедряться как системы наложения вместо устаревшей аппаратуры СЦБ – поэтапно, практически без остановки движения. Кроме того, функциональные возможности ИДК шире, чем функциональные возможности РЦ.

Но есть проблемы применения индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса, т.к. при их работе возможны сбои. Традиционно последствия сбоев в работе ИДК нейтрализуются логистическими методами с применением значительно большего количества оборудования, чем это требуется для решения конкретных функциональных задач. А это нивелирует основные преимущества использования индуктивных датчиков вместо рельсовых цепей. Отсюда

следует, что поиск новых решений для повышения эффективности использования ИДК в системах ЖАТ является важной и актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области разработки и использования индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса занимались отечественные организации и вузы: ВНИИЖТ, НИИАС, МИИТ, Гипротрансигналсвязь, НПЦ «Промэлектроника», ПГУПС, УрГУПС и др.

Среди учёных и инженеров, внёсших значительный вклад в разработку ИДК, следует отметить В.И. Антипова, В.П. Бухгольца, Г.А. Красовского, А. Г. Кириленко, М.А. Кривду, В.М. Лисенкова, Е.Н. Розенберга, Б.С. Сергеева, И.Г. Тилька, В.И. Талалаева, А.Э. Штанке, С.А. Щиголева. Среди зарубежных специалистов можно выделить таких исследователей, как А. Boehme, J. Frauscher, M. Thiel, G. Grundnig, M. P. Orlassino, C. Pucher, F. Rainer, M. Rosenberger, R. Thalbauer, I. Weltman.

Несмотря на то, что разные типы ИДК на железных дорогах мира применяются и совершенствуются в самых разных направлениях более 50 лет, общепризнанных методов и теории по их разработке на сегодня не существует.

Целью диссертационной работы является научное обоснование метода математического моделирования и методики разработки индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса, обеспечивающих их надёжную работу в системах ЖАТ железнодорожного транспорта без использования избыточного оборудования, а также синтез алгоритмов работы ИДК, позволяющих при проходе над датчиком различных металлических предметов выделять именно колесо железнодорожной подвижной единицы.

В диссертации поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Проведён ретроспективный анализ развития индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса и научно обоснованы направления их дальнейшего совершенствования. Разработаны принципы конструирования ИДК, отвечающие современным требованиям систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

2. Исследован процесс регистрации железнодорожного колеса индуктивным датчиком и установлены причины сбоев индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса (пропуск колеса и ложная регистрация колеса) при работе в реальных условиях эксплуатации.

3. Проведён анализ известных средств моделирования взаимодействия электромагнитного поля (ЭМП) с металлическими объектами. Разработана и

научно обоснована математическая модель взаимодействия индуктивного датчика регистрации железнодорожного колеса с колесом и рельсом, позволяющая гарантированно обеспечить регистрацию колеса и улучшить характеристики ИДК.

4. Разработаны и научно обоснованы алгоритмы обработки сигнала в индуктивных датчиках регистрации железнодорожного колеса, позволяющие регистрировать именно колесо железнодорожной подвижной единицы и определять его диаметр при любых скоростях прохода колеса.

Область исследования: системы автоматики и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, методы их построения и испытания.

Объект исследования: индуктивные датчики регистрации железнодорожного колеса, применяемые в системах автоматики и телемеханики, предназначенных для управления перевозочным процессом.

Методология и методы исследования. При разработке темы диссертации использовались основы теории моделирования, методы моделирования взаимодействия ЭМП с разными объектами, теоретические основы электротехники, методы классической теории линейных электрических цепей, методы математического и физического моделирования сложных электротехнических систем.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- исследован процесс регистрации колеса индуктивным датчиком и установлены причины сбоев индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса в реальных условиях эксплуатации;
- впервые предложена и научно обоснована математическая модель объёмного взаимодействия индуктивного датчика регистрации железнодорожного колеса, колеса и рельса, позволяющая детерминированно описать и исследовать наиболее важные зависимости и таким образом улучшить основные характеристики индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса;
- разработаны, исследованы и научно обоснованы алгоритмы регистрации прохода колеса, позволяющие при проходе над ИДК различных металлических объектов выделять именно колесо железнодорожной подвижной единицы;
- разработаны, исследованы и научно обоснованы алгоритмы регистрации прохода железнодорожного колеса, позволяющие с достаточной степенью точности определять диаметр колеса при любых скоростях движения и любом диаметре колеса.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Проведённые исследования позволили выявить и устранить причины сбоев в работе индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса, обусловленные недостаточным уровнем напряжённости электромагнитного поля ИДК при возможных износах колеса и рельса в реальных условиях эксплуатации.

2. Разработана математическая модель индуктивного датчика регистрации железнодорожного колеса, которая уже на стадии разработки ИДК позволяет провести необходимые исследования, минимизировать размеры датчика и гарантированно обеспечить регистрацию колеса в реальных условиях эксплуатации.

3. Разработаны алгоритмы обработки сигнала в индуктивных датчиках регистрации железнодорожного колеса, которые позволили:

– регистрировать именно колесо подвижной железнодорожной единицы и определять его диаметр при любых диаметрах колеса и скоростях прохода над датчиком и тем самым обеспечили возможность более широкого применения индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса на железнодорожном транспорте общего пользования (без избыточного оборудования);

– снизить требования к контроллерам индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса, что даёт возможность использования существующих аппаратных средств без дорогостоящей переработки датчиков.

4. Разработаны и введены в эксплуатацию новые индуктивные датчики регистрации железнодорожного колеса, обладающие улучшенными параметрами надёжности и стоимости жизненного цикла. Это позволяет сместить границу применимости индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса (и систем счёта осей на их базе) как основного средства контроля свободности участка пути (взамен РЦ) в область более высокой интенсивности движения (любое, кроме особо интенсивного и высокоскоростного). На участках с особо интенсивным и высокоскоростным движением системы счёта осей на базе индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса могут применяться совместно с рельсовыми цепями как резервные системы для повышения готовности комплекса систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

Положения, выносимые на защиту.

1. Научное обоснование конструкции индуктора для индуктивного датчика регистрации прохода колеса.

2. Математическая модель объёмного взаимодействия индуктивного датчика регистрации железнодорожного колеса, колеса и рельса и научное обоснование этой модели.

3. Технология регистрации именно колеса железнодорожной подвижной единицы и научное обоснование этой технологии.

4. Интеллектуальные алгоритмы обработки электрического сигнала в индуктивных датчиках регистрации железнодорожного колеса и их научное обоснование.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность проведённых в диссертационной работе исследований и полученных результатов обеспечивается использованием корректного математического аппарата, современными методами исследования, соответствующими целям и задачам исследования, в частности, математического и физического моделирования. Достоверность результатов исследований подтверждена всесторонними лабораторными испытаниями образцов индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса и апробацией (актами приёмочных испытаний) ИДК, разработанных на основании указанных исследований.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на V и VI научно-технических конференциях с международным участием «ИСУЖТ-2016», «ИСУЖТ-2017» (Москва, ОАО «НИИАС»), научных семинарах аспирантов и кафедральных семинарах УрГУПС (Екатеринбург, 2017, 2018). В целом диссертационная работа докладывалась на расширенном заседании кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения в декабре 2018 года.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в семи статьях (из них две в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ), а также в шести патентах РФ по теме настоящей диссертационной работы.

Объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, состоящего из 123 наименований. Текст диссертации содержит 161 страницу, две таблицы и 44 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, цель и задачи исследований, формулировку научной новизны, теоретическую и практи-

ческую значимость работы, положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность полученных результатов, апробацию и публикации по основным результатам диссертационной работы.

В первой главе проведён сопоставительный анализ использования рельсовых цепей и систем счёта осей на базе индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса. Показано, что модернизация существующих и строительство новых систем ЖАТ в России и странах СНГ идёт преимущественно с использованием РЦ, что требует значительных материальных ресурсов и существенных временных затрат.

В качестве альтернативы применению РЦ для обновления и модернизации аппаратуры ЖАТ в условиях недостаточного финансирования предложено использовать ИДК и системы счёта осей на их основе.

По результатам ретроспективного анализа развития индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса и средств обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта с их применением сформулированы направления дальнейшего совершенствования ИДК и требования, предъявляемые к ним, для обеспечения их применения без избыточного оборудования на железнодорожном транспорте общего пользования.

Во второй главе приводятся результаты исследований процесса регистрации железнодорожного колеса и других металлических объектов индуктивными датчиками, параметров электромагнитного поля в зависимости от конструкции и геометрических параметров индуктора.

Рисунок 1 (составленный по опубликованным данным) показывает многообразие картин распределения ЭМП и соответствующих зон чувствительности датчиков приближения в зависимости от их конструктивного исполнения.

В этой же главе на основе анализа нормативной документации показано, что в реальных условиях эксплуатации гребень колеса может отклоняться от боковой поверхности головки рельса на расстояние до 80 мм и проходить над поверхностью ИДК на удалении от 6 до 20 мм. В этих границах по специально разработанной методике, описанной в диссертации, исследованы напряжённость ЭМП индуктора ИДК и процессы его взаимодействия с колесом и рельсом. По результатам исследований обоснованы основные принципы конструирования перспективных ИДК с учётом их реальных условий эксплуатации.

Результаты исследований. На рисунке 2, *а* и *б* в аксонометрической и фронтальной проекциях приведены данные измерения напряжённости ЭМП над

поверхностью ИДК на расстоянии 6 мм. Аналогичные данные в диссертации приведены и для расстояния 20 мм.

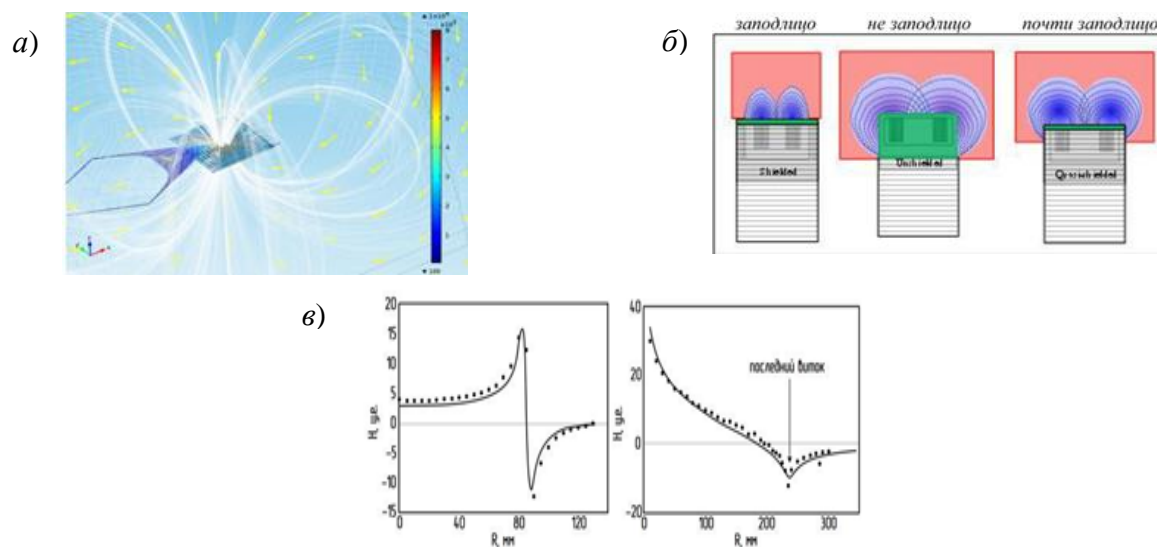


Рисунок 1 – Распределение ЭМП и соответствующих зон чувствительности индукторов датчиков приближения разной конструкции:

а – ЭМП по данным А.К. Palit, COMSOL Conference 2014, Cambridge, 17–19th September 2014. Данные для спиральной печатной обмотки; *б* – ЭМП по данным фирмы Kamap и А.В. Федотова; *в* – ЭМП по данным Н.В. Богача, А.Н. Никишенко и И.А. Громыко (H – нормальная компонента напряжённости магнитного поля в относительных единицах)

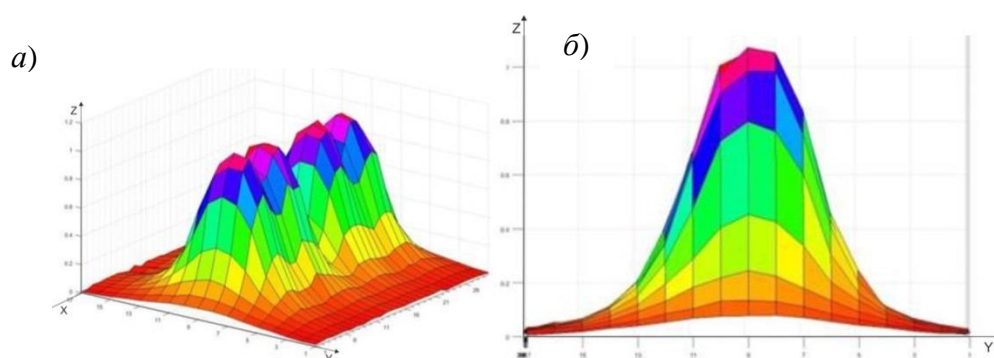


Рисунок 2 – Нормированная напряжённость ЭМП на расстоянии 6 мм над поверхностью датчика:

а – объёмное изображение; *б* – то же, вид спереди

По оси Z (рисунок 2, *а*) и по оси Y (рисунок 2, *б*) показано нормированное значение напряжённости ЭМП, по оси X (рисунок 2, *б*) и по оси Y (рисунок 2, *а*) –

отклонение от оси симметрии датчика в см, по оси X (рисунок 2, a) – расстояние вдоль оси симметрии ИДК в см. Аналогичные обозначения величин по осям X , Y , Z использованы на рисунке 3.

В таблице приведены данные изменения модуля напряжённости ЭМП на разных расстояниях от поверхности ИДК над точкой с максимальным значением напряжённости и над точкой с максимально возможным удалением гребня колеса от боковой поверхности головки рельса.

Характер распределения напряжённости ЭМП на расстоянии 6 мм над поверхностью датчика в случае, когда ИДК закреплён на рельсе в рабочем положении, представлен на рисунке 3. В диссертационном исследовании аналогичные данные по распределению напряжённости ЭМП приведены и для расстояния 20 мм от поверхности ИДК.

Из этих данных следует, что характер распределения напряжённости ЭМП над поверхностью ИДК существенно отличается от опубликованных данных. По поверхности датчика на расстояниях 6 и 20 мм от поверхности характер распределения напряжённости ЭМП практически не меняется. Амплитудное значение напряжённости ЭМП в зависимости от возможных вариантов прохода колеса над датчиком изменяется более чем в десять раз. Характер распределения напряжённости ЭМП над поверхностью ИДК при закреплении его на рельсе практически не изменяется. Напряжённость ЭМП над всей поверхностью ИДК с увеличением расстояния от поверхности изменяется по экспоненциальному закону (таблица).

Расстояние до поверхности чувствительного элемента ИДК, мм	Значение модуля напряжённости ЭМП над осью индукторов ИДК, у.е.	Значение модуля напряжённости ЭМП на расстоянии максимально возможного удаления гребня, у.е.
6	0,97	0,175
12	0,65	0,14
20	0,435	0,125
26	0,3	0,09

Во второй главе также приводятся данные исследования чувствительности ИДК к проходу колеса в зависимости от вариантов прохода гребня колеса над датчиком относительно продольной оси симметрии ИДК. Обобщённые результаты этих исследований приведены на рисунке 4. На рисунке 4, a и b показан характер изменения напряжения на выходе сенсорных обмоток зоны «0» и зоны «1» датчика, закреплённого на рельсе при проходах гребня колеса на расстоянии 6 мм

от его поверхности и при разных (от 0 до 8 см) расстояниях его прохода от боковой поверхности головки рельса.

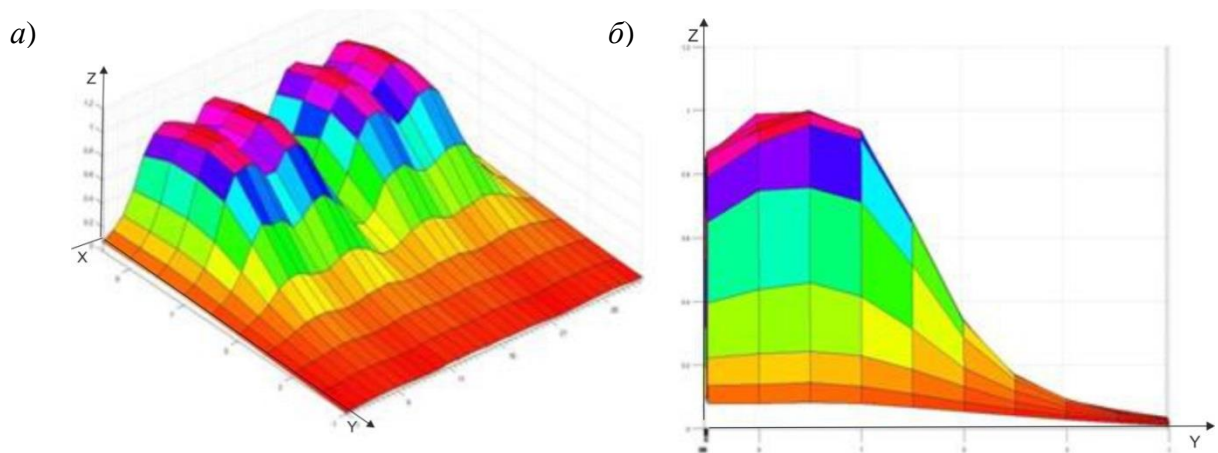


Рисунок 3 – Напряжённость ЭМП на расстоянии 6 мм над поверхностью датчика, когда датчик закреплён на рельсе в рабочем положении:

a – объёмное изображение; *б* – фронтальное изображение (вид спереди)

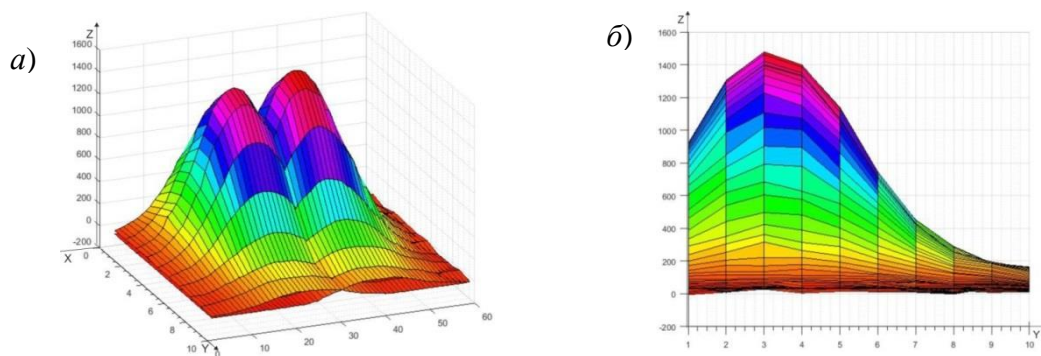


Рисунок 4 – Отклонение напряжения на выходе сенсорных катушек зон «0» и «1» у датчика, закреплённого на рельсе при проходе гребня колеса на расстоянии 6 мм от его поверхности:

a – объёмное изображение; *б* – фронтальное изображение (вид спереди)

По оси Z (рисунок 4, *a*) показано отклонение напряжения (в усл. ед.) от своего первоначального значения, когда гребень колеса над датчиком регистрации прохода колеса отсутствовал. По оси X показано отклонение гребня колеса от боковой поверхности головки рельса (в см), по оси Y – проход гребня колеса вдоль рельса над поверхностью датчика (в см). На рисунке 4, *б* по оси X показано отклонение гребня от боковой поверхности головки рельса (в см), по оси Y – отклонение напряжения (в усл. ед.).

На основании проведённых исследований сделан вывод, что некорректно выбранные размеры и конструкция индуктора ИДК могут быть причиной нестабильной работы ИДК, причём этот процесс носит вероятностный характер.

Для исключения случаев нестабильной работы ИДК необходимо разработать математическую модель работы ИДК с функциональной зависимостью выходного сигнала ИДК от электрических параметров компонентов ИДК, геометрических параметров индуктора, геометрических параметров колеса и параметров их возможного взаимного расположения во время прохода гребня колеса над датчиком.

В третьей главе приводится разработка математической модели для исследования и оптимизации электрических параметров элементов ИДК и конструктивных параметров катушек индуктивности индуктора.

Исходные данные для разработки математической модели приведены на рисунке 5.

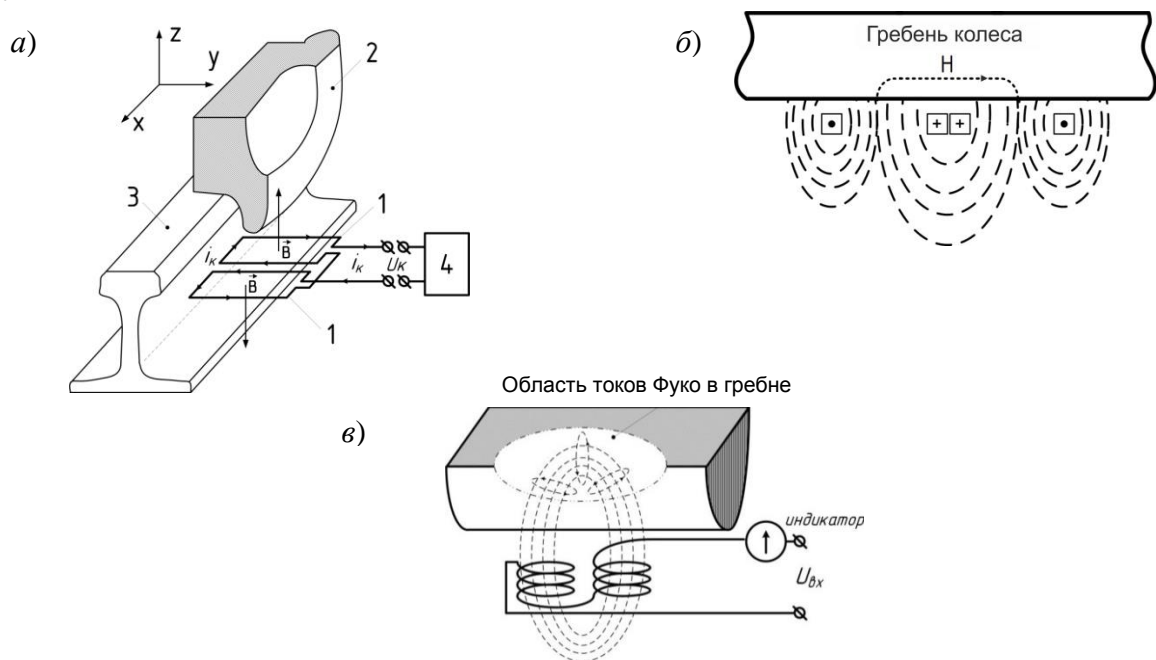


Рисунок 5 – Исходные данные для разработки математической модели:

a – схема взаимного расположения катушек индуктора, колеса и рельса;

б – условное взаимодействие колеса и катушек по взаимной индукции; *в* – условная схема взаимодействия по токам Фуко.

Здесь *1* – чувствительный элемент датчика (две согласно включённые и последовательно соединённые катушки индуктивности, расположенные в одной плоскости в области прохода гребня колеса); *2* – колесо железнодорожного транспортного средства; *3* – рельс; *4* – схема возбуждения индуктора ИДК и схема регистрации сигнала, возникающего при проходе колеса

Поскольку создать одну модель, полностью изоморфную системе, представленной на рисунке 5, *а*, оказалось трудно, то, в соответствии с основными положениями теории моделирования, для исследования интересующих нас свойств этой системы разработаны две упрощённые модели.

Первая модель разработана для исследования и оптимизации электрических параметров ИДК. Вторая модель разработана для описания объёмного взаимодействия колеса и ЭМП индуктора. Она предназначена для исследования и оптимизации конструктивных параметров индуктора ИДК с учётом диаметра регистрируемого колеса.

Модель для исследования электрических параметров ИДК

Взаимодействие катушек индуктивности ИДК с колесом и рельсом представлено эквивалентной схемой замещения (рисунок 6, *а*). Для возбуждения индуктора и регистрации сигнала использована типовая схема Колпица, которая широко применяется в датчиках приближения (в упрощённом виде представлена на рисунке 6, *б*).

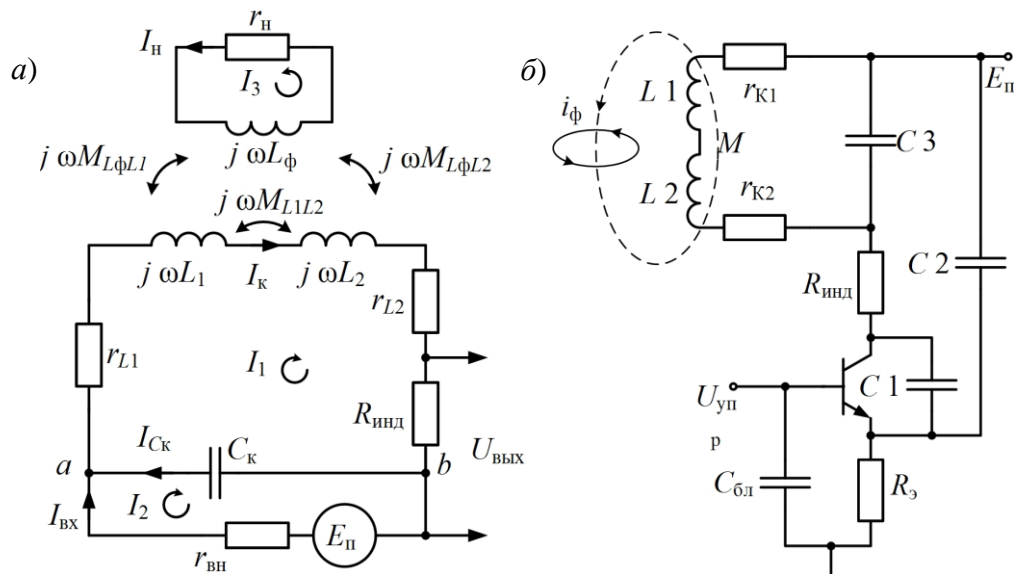


Рисунок 6 – Эквивалентная схема замещения взаимодействия катушек ИДК и гребня колеса (*а*) и упрощённая схема возбуждения катушек и регистрации сигнала (*б*).

В схемах на рисунке 6: $L_1 = L_2 = L$ – индуктивности первой и второй катушек индуктора ИДК; $M_{L_1L_2}$ – взаимная индуктивность между этими катушками; r_{L_1} и r_{L_2} – активное сопротивление катушек L_1 и L_2 ; L_Φ – эквивалентная индуктивность от контуров токов Фуко, возникающих в гребне колеса; $M_{L_\Phi L_1}$ и $M_{L_\Phi L_2}$ – взаимная индуктивность катушки L_Φ с катушками L_1 и L_2 , соответственно; $r_\text{н}$ – экви-

валентное сопротивление нагрузки для токов Фуко; I_n – обобщённый эквивалентный ток нагрузки токов Фуко; I_k – ток возбуждения катушек ДК; ω – угловая частота тока возбуждения; $R_{инд}$ – активное сопротивление, на котором выделяется полезный сигнал $U_{вых}$ при проходе гребня колеса; $E_{п}$ – источник напряжения с внутренним сопротивлением $r_{вн}$, $I_{вх}$ – ток возбуждения; C_k – эквивалентная ёмкость резонансного контура, в который включены катушки индуктивности; $I_{ск}$ – ток, протекающий через конденсатор; I_1 , I_2 и I_3 – токи в соответствующих контурах. Конденсатор C_3 в схеме использован для защиты транзистора от скачков перенапряжений.

Частота выходного сигнала в схеме Колпица определяется выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{2LC_k(1+K_{св})}}, \quad (1)$$

где $K_{св}$ – коэффициент связи двух магнитосвязанных катушек L_1 и L_2 .

Для схемы (рисунок 6, а) составим уравнения по законам Кирхгофа.

В точке а:

$$\dot{I}_{вх} + \dot{I}_c = \dot{I}_k, \quad (2)$$

$$(2r_k + R_{инд})\dot{I}_k + 2j\omega(L + M)\dot{I}_k + 2j\omega M_{L\phi L}\dot{I}_n - j\frac{1}{\omega C_k}\dot{I}_{ск} = 0, \quad (3)$$

$$\dot{I}_{вх}r_{вн} - \left(-\frac{1}{\omega C_k}\dot{I}_{ск}\right) = \dot{E}_{п}, \quad (4)$$

$$(r_n + j\omega L_\phi)\dot{I}_n + 2j\omega M_{L\phi L}\dot{I}_k = 0. \quad (5)$$

Для контурных токов I_1 , I_2 и I_3 уравнения (2)–(5) будут иметь вид:

$$\left(2r_k + R_{инд} + 2j\omega(L + M) - j\frac{1}{\omega C_k}\right)\dot{I}_1 + 2j\omega M_{L\phi L}\dot{I}_3 + j\frac{1}{\omega C_k}\dot{I}_2 = 0, \quad (6)$$

$$\left(r_{вн} + j\frac{1}{\omega C_k}\right)\dot{I}_2 + j\frac{1}{\omega C_k}\dot{I}_1 = \dot{E}_{п}, \quad (7)$$

$$(r_n + j\omega L_\phi)\dot{I}_3 + 2j\omega M_{L\phi L}\dot{I}_1 = 0. \quad (8)$$

Сокращённо выражения (6)–(8) можно записать следующим образом:

$$\dot{Z}_1\dot{I}_1 + \dot{Z}_{31}\dot{I}_3 + \dot{Z}_{21}\dot{I}_2 = 0, \quad (9)$$

$$\dot{Z}_2\dot{I}_2 + \dot{Z}_{12}\dot{I}_1 = \dot{E}_{п}, \quad (10)$$

$$\dot{Z}_3\dot{I}_3 + \dot{Z}_{13}\dot{I}_1 = 0. \quad (11)$$

Решение системы уравнений (9)–(11) относительно I_1 даёт:

$$\dot{I}_1 = \frac{-\dot{E}_\Pi}{\frac{4\omega^2 M_L \Phi L^2}{r_n + j\omega L_\Phi} - j\frac{1}{\omega C_K} - (2r_k + R_{\text{инд}} + 2j\omega(L+M) - j\frac{1}{\omega C_K})} \quad (12)$$

$$\text{или } \dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_\Pi}{\frac{4\omega^2 M_L \Phi L^2}{r_n + j\omega L_\Phi} + R_{\text{инд}} + 2(r_k + j\omega(L+M))} \quad (13)$$

И тогда выходное напряжение схемы (рисунок 6, а) будет описываться следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = \dot{I}_1 R_{\text{инд}} = \frac{R_{\text{инд}} \dot{E}_\Pi}{\frac{4\omega^2 M_L \Phi L^2}{r_n + j\omega L_\Phi} + R_{\text{инд}} + 2(r_k + j\omega(L+M))} \quad (14)$$

В соответствии с этим выражением исследованы все необходимые зависимости и были определены электрические параметры основных элементов схемы ИДК, приведённой на рисунке 6.

Упрощённая математическая модель объёмного взаимодействия ИДК с железнодорожным колесом

Для разработки модели введены следующие исходные допущения.

1. Уровень сигнала, регистрируемого ИДК, прямо пропорционален уровню напряжённости ЭМП, с которым в каждый конкретный момент времени взаимодействует гребень железнодорожного колеса.

2. В качестве индуктора используются плоские катушки, для которых известны связь между электрическими и конструктивными параметрами и модуль напряжённости ЭМП над их поверхностью, который определяется экспериментально в соответствии с методикой, изложенной в главе 2 диссертации.

3. Модуль напряжённости ЭМП и, соответственно, чувствительность ИДК в направлении оси Z от поверхности катушек индуктора изменяется по экспоненциальному закону над всей поверхностью и выражается зависимостью $F(Z) = e^{-(Z \cdot a)}$, где параметр a для катушек данной конструкции можно определить по экспериментальным данным (таблица).

4. Объёмная нормированная напряжённость ЭМП над поверхностью катушек в условных единицах определяется произведением нормированных функцио-

нальных зависимостей напряжённости ЭМП по поверхности катушек вдоль осей X и Y и градиента функциональной зависимости напряжённости ЭМП в направлении оси Z .

С учётом этих допущений получены нижеследующие результаты.

1. Исследована и аналитически описана напряжённость ЭМП над поверхностью катушек при некотором произвольном диаметре D . Нормированное значение модуля напряжённости ЭМП (в усл. ед.) по мере удаления от центра катушек и на разном расстоянии от поверхности катушек представлено на рисунке 7.

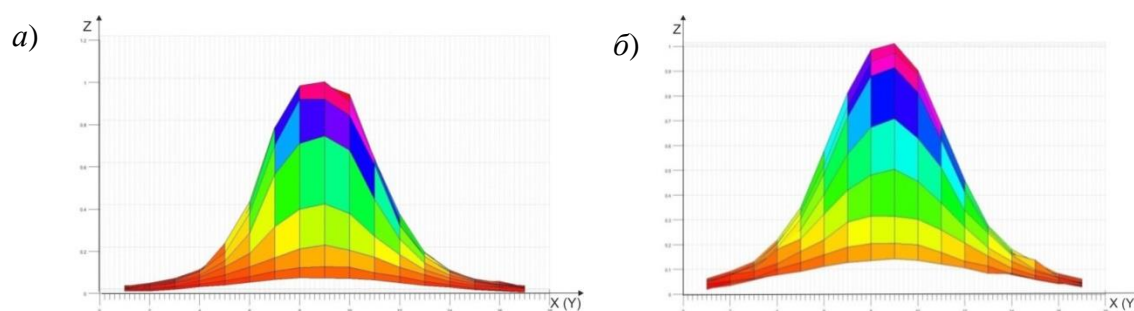


Рисунок 7 – Напряжённость ЭМП над поверхностью катушек индуктора по мере удаления от их центра на расстоянии 6 мм (а) и 20 мм (б) от поверхности

Во второй главе доказано, что нормированное значение модуля напряжённости ЭМП описывается функцией Гаусса, где σ однозначно связано с диаметром катушек индуктивности; $\sigma = 0,446D$. А обработка данных, приведённых в таблице, показала, что напряжённость ЭМП вдоль оси Z описывается показательной функцией

$$F(Z) = e^{-(Z \cdot 0,0587)}. \quad (15)$$

2. С учётом этого и принятых ранее допущений объёмная нормированная напряжённость ЭМП в условных единицах над поверхностью катушек как функция параметров $F(X, Y, Z, D, d)$, где d – расстояние между катушками индуктора, может быть представлена в общем виде следующим выражением:

$$F(X, Y, Z, D, d) = \left(\left(e^{-\frac{(X)^2}{2 \cdot (0,446D)^2}} \right) + \left(e^{-\frac{(X-d)^2}{2 \cdot (0,446D)^2}} \right) \right) \times \\ \times \left(e^{-\frac{(Y)^2}{2 \cdot (0,446D)^2}} \right) \cdot (e^{-(Z \cdot 0,0587)}). \quad (16)$$

Для некоторых исходных данных, например, $D = 5,6$ см, $d = 6,6$ см и $Z = 0$, т.е. непосредственно над поверхностью ИДК, график зависимости, полученный в среде Wolfram Alpha, приведён на рисунке 8.

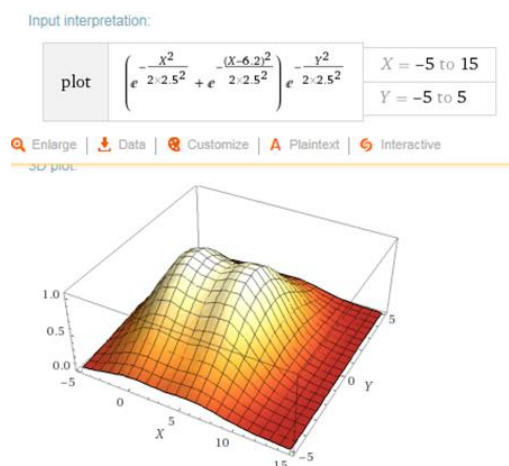


Рисунок 8 – График нормированной напряжённости ЭМП в Wolfram Alpha непосредственно над поверхностью ИДК

3. Для получения нормированной функции взаимодействия (гребня) колеса с ЭМП индуктора ИДК необходимо в выражении $F(X, Y, Z)$ (формула (16)) переменную Z выразить через $Z_{\text{нач}}$ и $Z_{\text{пер}}$, где величина $Z_{\text{нач}}$ соответствует минимально возможному расстоянию от вершины гребня до поверхности ИДК, а величина $Z_{\text{пер}}$ (переменная составляющая величины Z) – изменению расстояния от гребня колеса до поверхности индуктора ИДК (над центром катушек) при прохождении (продвижении) колеса над датчиком. После ряда преобразований получена следующая функциональная зависимость от интересующих нас параметров:

$$F(X, Y, Z, D, d, R) = \left(\left(e^{-\frac{(X)^2}{2 \cdot (0,446D)^2}} \right) + \left(e^{-\frac{(X-d)^2}{2 \cdot (0,446D)^2}} \right) \right) \times \\ \times \left(e^{-\frac{(Y)^2}{2 \cdot (0,446D)^2}} \right) \cdot \left(e^{-0,0587 \cdot (Z_{\text{нач}} + R - \sqrt{R^2 - X^2})} \right), \quad (17)$$

где R – радиус проходящего над датчиком колеса.

Для частного случая при $D = 5,6$ см (или $\sigma = 2,5$) имеем:

$$F(X, Y, Z) = \left(\left(e^{-\frac{(X)^2}{2 \cdot (2,5)^2}} \right) + \left(e^{-\frac{(X-d)^2}{2 \cdot (2,5)^2}} \right) \right) \times \\ \times \left(e^{-\frac{(Y)^2}{2 \cdot (2,5)^2}} \right) \cdot \left(e^{-0,0587 \cdot (Z_{\text{нач}} + R - \sqrt{R^2 + X^2})} \right). \quad (18)$$

В четвёртой главе для оценки адекватности полученной математической модели взаимодействия гребня колеса с ЭМП индуктора были проведены соответствующие исследования функциональной зависимости $F(X, Y, Z, D, d, R)$ (выражение (17)) при различных фиксированных значениях $Z_{\text{нач}}$, Y , D , и R . Таким способом имитировались износ поверхности катания колеса и возможное отклонение гребня колеса от боковой поверхности головки рельса в реальных условиях эксплуатации. Аналогичным образом исследовалось ЭМП индуктора в соответствии с выражением (16). Подробно результаты этих исследований приведены в диссертации (глава 4, рисунки 4.1–4.12). В обобщённом виде они приведены на рисунке 9 а, б.

На рисунке 9, а (в см) по оси X показаны направление и расстояние прохода колеса над поверхностью ИДК. По оси Y – отклонение гребня колеса от продольной оси симметрии датчика при этих проходах, по оси Z на рисунке 9, а (в усл. ед.) показано отклонение напряжения на выходе ИДК. Ломаные кривые соответствуют экспериментальным данным, сглаженные – их аппроксимации функцией Гаусса. На рисунке 9, б приведены аналогичные нормированные значения выходного сигнала ИДК по результатам моделирования.

Проведённые в главе 4 исследования показали, что предложенная математическая модель взаимодействия гребня колеса с ИДК с достаточной степенью точности (не хуже $\pm 10\%$) воспроизводит все интересующие нас зависимости.

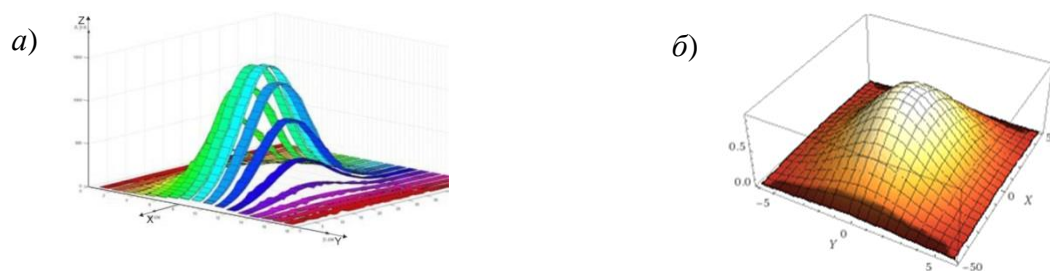


Рисунок 9 – Обобщённые данные взаимодействия колеса и ИДК:

а – экспериментальные данные; б – данные моделирования

В пятой главе представлено описание интеллектуальных алгоритмов обработки сигнала в ИДК и технических решений (основанных на указанных интеллектуальных алгоритмах), которые повышают надёжность работы и расширяющих функциональные возможности ИДК.

Такие ИДК при минимальных габаритах и минимальной потребляемой мощности обеспечивают гарантированную регистрацию проходящего над ним железнодорожного колеса при всех износах колеса и рельса, допускаемых нормативной документацией.

Изложенные решения защищены патентами РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате диссертационных исследований установлено, что основной причиной нестабильной работы индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса в реальных условиях эксплуатации является недостаточный уровень напряжённости ЭМП индуктора в области возможных проходов гребня колеса над датчиком. Проведён ретроспективный анализ развития ИДК, определены основные направления их совершенствования.

2. Разработаны, исследованы и научно обоснованы решения, которые обеспечивают надёжную регистрацию колеса без избыточного оборудования и применения логистических методов обработки информации. Это позволяет снизить стоимость жизненного цикла систем ЖАТ с использованием индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса на 15–30 % и применять разработанные датчики вместо рельсовых цепей на железнодорожном транспорте общего пользования в большинстве случаев (кроме участков с особо интенсивным и высокоскоростным движением, где ИДК могут внедряться совместно с РЦ).

3. Впервые разработана математическая модель работы индуктивного датчика регистрации железнодорожного колеса с имитацией объёмного взаимодействия электромагнитного поля индуктора ИДК с колесом и рельсом, что позволяет исследовать и оптимизировать не только электрические, но и конструктивные параметры индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса.

4. Разработаны и научно обоснованы алгоритмы обработки сигнала в индуктивных датчиках регистрации железнодорожного колеса, улучшающие основные технические характеристики ИДК и расширяющие область применения этих датчиков.

5. Разработаны и внедрены в эксплуатацию новые надёжные ИДК. В настоящее время более 1 тыс. таких датчиков используется на железнодорожном транспорте общего и необщего пользования в 5 странах.

6. Широкое применение индуктивных датчиков регистрации железнодорожного колеса вместо рельсовых цепей при замене и модернизации устаревшего оборудования в устройствах ЖАТ позволит обеспечить доведение технических средств ОАО «РЖД» до уровня, предусмотренного «Стратегией научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года» и другими организационными документами, даже в условиях недостаточного финансирования.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

а) в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней» ВАК Минобрнауки РФ:

1. Ляной, В.В. Разработка упрощенной математической модели взаимодействия индуктивного датчика колеса с железнодорожным колесом [Текст] / В.В. Ляной, Р.В. Гнитько Р.В. // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 24-28.

2. Ляной, В.В. Обеспечение безопасности движения железнодорожного транспорта на основе совершенствования индуктивных датчиков регистрации колеса [Текст] / В.В. Ляной // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 93-98.

б) в опубликованных патентах:

1. Патент RU2624358. Российская Федерация, МПК Способ регистрации прохода колеса рельсового транспортного средства и способ определения диаметра колеса рельсового транспортного средства [Текст] / Р.В. Гнитько, А.А. Курганский, В.В. Ляной, И.Г. Тильк ; заявитель АО «НПЦ «Промэлектроника» ; заявл. 22.08.2016, опубл. 03.07.2017; Бюл. № 19.

2. Патент RU2624140. Российская Федерация, МПК Способ регистрации прохода колеса рельсового транспортного средства. [Текст] / Р.В. Гнитько, А.А. Курганский, В.В. Ляной, И.Г. Тильк ; заявитель АО «НПЦ «Промэлектроника» ; заявл. 16.06.2016, опубл. 30.06.2017; Бюл. № 24.

3. Патент RU2610733, Российская Федерация, МПК В61L 1/16. Способ регистрации прохождения колесных пар подвижного состава по участку пути. [Текст] / Ю.В. Булычев, Р.В. Гнитько, А.А. Курганский, В.В. Ляной, И.Г. Тильк ;

заявитель АО «НПЦ «Промэлектроника» ; заявл. 18.12.2015; опубл. 15.02.2017, Бюл. № 5.

4. Патент RU2564553, Российская Федерация, МПК В61L 1/16. Способ регистрации прохождения колесных пар подвижного состава и устройство для его осуществления [Текст] / И.Г. Тильк, В.В. Ляной, В.Л. Логинов, Г.П. Мелехин, С.А. Юрков ; заявитель АО «НПЦ "Промэлектроника"»; заявл. 17.12.2013 ; опубл. 10.10.2015; Бюл. № 28.

5. Патент RU2641366, Российская Федерация, МПК В61L 1/16 (2006.01), Способ повышения устойчивости работы датчика регистрации прохода колеса к воздействию температуры окружающей среды и бросков тягового тока и соответствующий датчик регистрации прохода колеса [Текст] / В.Л. Логинов, Г.П. Мелехин, В.В. Ляной, И.Г. Тильк ; заявитель АО «НПЦ «Промэлектроника»; заявл. 13.14.2017, опубл. 17.01.2018; Бюл. № 2.

6. Патент RU2657647. Российская Федерация, МПК В61L 1/08, В61L 1/16 (2006.01) Способ повышения устойчивости работы датчика регистрации прохода колеса к воздействию температуры окружающей среды [Текст] / Р.В. Гнитько, А.А. Курганский, В.В. Ляной ; заявитель АО «НПЦ «Промэлектроника»; заявл. 22.05.2017, опубл. 14.06.2018 ; Бюл. № 17.

в) в других изданиях:

1. Ляной, В.В. Индуктивные датчики регистрации прохода колеса железнодорожной подвижной единицы. Проблемы и перспективы использования // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 37–42.

2. Ляной, В.В. Разработка математической модели для исследования параметров индуктивного датчика железнодорожного колеса // Вестник УрГУПС. 2017. № 3 (35). С. 4–13.

3. Ляной, В.В. О повышении надёжности работы индуктивных датчиков регистрации прохода колеса железнодорожных подвижных единиц / Труды V научн.-техн. конф. «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2016). Москва, 17-18 ноября 2016 г., С. 213–217.

4. Ляной В.В. Интеллектуальные технологии в индуктивных датчиках регистрации прохода колеса / Труды VI научн.-техн. конф. «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2017), Москва, 16-17 ноября. С. 186–188.

5. Ляной В.В., Тильк И.Г. Перспективы развития систем ИРДП // АСИ №8 (2007). С. 7–9.

Подписано в печать 20.06.2019. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 1,4. Заказ 39. Тираж 100 экз.
Издательство УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66