

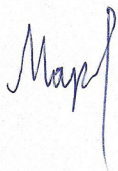
На правах рукописи
УДК 681.78

Маренов Никита Евгеньевич

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ
ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

Специальность 2.2.6
«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Колючкин Василий Яковлевич**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры лазерных и оптико-электронных систем ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты **Кортаев Валерий Викторович**
доктор технических наук, профессор, профессор института «Высшая инженерно-техническая школа» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Казаков Василий Иванович
кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией акустооптической обработки информации ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждения науки «Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук»

Защита состоится «27» _____ мая 2026 г. в ____:____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Ваш отзыв на автореферат диссертации, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.331.07 по адресу 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ).

Телефон для справок: +7 499 263 65 93

Автореферат разослан «__»_____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.07,
к.т.н., доцент

Д.Г. Денисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания нового поколения аппаратуры, которая должна обеспечить контроль состояния железнодорожного пути на высокоскоростных магистралях (ВСМ). Своевременное обнаружение дефектов железнодорожных путей позволяет повысить безопасность движения на железнодорожном транспорте и обеспечить штатное движение по высокоскоростным магистралям. Неотъемлемыми требованиями, предъявляемыми к такой аппаратуре контроля, являются высокая точность, бесконтактность и оперативность. Этим требованиям в полной мере удовлетворяет аппаратура, основанная на оптических методах.

Исследования в области контроля состояния железнодорожного транспорта проводятся во ВНИИЖТ, АО НПЦ ИНФОТРАНС, АО «Фирма Твема», а также в зарубежных организациях таких, как MER MEC S.p.A., Sperry Rail Service и др. Разработке методов и аппаратуры контроля железнодорожных путей посвящены работы отечественных специалистов, в том числе А.М. Боронахина и Д.Ю. Ларионова (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), а также зарубежных исследователей М. Torabi, S.M. Mousavi G. (Iran University of Science and Technology). Значительных успехов в этой области достигли специалисты КНР, в том числе, Q. Mao, Q. Li (Wuhan University), C. Wang (Hunan University) и др.

Общим недостатком известных технических решений аппаратуры контроля дефектов поверхности катания является относительно низкая скорость движения при выполнении процедур оперативного контроля, которая, судя по публикациям, не превышает 30 км/ч. Но выполнение процедур диагностирования и мониторинга путей ВСМ не должно влиять на график движения составов. Поэтому путеизмерительные вагоны, на которых устанавливается аппаратура контроля, должны двигаться со скоростями, соизмеримыми с принятыми для ВСМ, а аппаратура контроля при этом должна сохранять свою эффективность.

В связи с этим тема диссертации, посвящённая созданию оптико-электронной высокоточной аппаратуры, предназначенной для оперативного контроля поверхности катания железнодорожных путей в условиях эксплуатации на высокоскоростных магистралях, является актуальной.

Целью диссертации является разработка высокоточной оптико-электронной системы для высокоскоростного оперативного контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие **задачи**:

- обоснованы требования к оптико-электронной системе контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути;
- разработан принцип действия аппаратуры контроля;
- разработана математическая модель и сформулирована целевая функция проектирования аппаратуры контроля;
- разработаны алгоритмы обработки данных;

- разработана методика проектирования аппаратуры контроля;
- проведены лабораторные и натурные экспериментальные исследования с целью проверки теоретических положений диссертации.

Методология и методы исследования

При решении задач диссертации использовались методы математического моделирования, цифровой обработки изображений, теории вероятности и математической статистики, а также методы экспериментальных исследований.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана оригинальная схема двухканальной оптико-электронной системы (ОЭС) контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути, основанная на триангуляционном методе регистрации изображений, отличительными особенностями которой является регистрация изображения структурированной подсветки линейной камерой, обеспечивающей высокое быстродействие, а также использование алгоритмов, позволяющих производить измерение размеров дефектов с субпиксельной точностью в условиях эксплуатации на высокоскоростных магистралях.

2. Введён в состав ОЭС дополнительный канал, система координат регистрации изображений которого за счёт оригинальной тарировки связана с системой координат основного канала, позволяющий компенсировать неопределённость положения зоны контроля поверхности катания, возникающей из-за колебаний установочной базы в процессе эксплуатации.

3. Создана математическая модель и на её основе разработана методика проектирования, позволяющая определить рациональное сочетание конструктивных параметров составных частей ОЭС контроля поверхности катания при условии минимизации вероятности пропуска дефектов и СКО погрешности измерения этих дефектов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная оригинальная схема двухканальной ОЭС контроля, в которой регистрация изображений структурированной подсветки осуществляется линейной камерой, а для обработки изображений используются алгоритмы оценки координат с субпиксельной точностью, в отличие от известных образцов аппаратуры в реальных условиях эксплуатации при скоростях движения путеизмерительного вагона, превышающих 140 км/ч, позволяет практически исключить пропуск дефектов и определять размеры дефектов с СКО погрешности, не превышающей 0,25 мм.

2. Алгоритм обработки изображений структурированной подсветки в триангуляционной системе, основанный на методе оценки параметров сигнала по критерию максимального правдоподобия, позволяет определять расстояние до поверхности объекта с СКО погрешности не превышающим 0,05 мм при пиковом ОСШ, равном 10, и эффективной ширине изображения полосы структурированной подсветки, равной 0,65 пикселя;

3. Алгоритм обработки изображений структурированной подсветки в триангуляционной системе, основанный на оценке положения пика по нескольким значениям сигнала в окрестности этого пика, позволяет определять расстояние до поверхности объекта с СКО погрешности не

превышающим 0,15 мм при пиковом ОСШ, равном 10 и отношении полуширины пика к размеру пикселя, равном 3.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что её результаты могут быть использованы при создании высокоточной аппаратуры оперативного бесконтактного контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути, которая требуется для оснащения скоростных путеизмерительных вагонов.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью постановки задач и использованных допущений, а также согласованностью результатов математического моделирования и экспериментальных исследований.

Реализация и внедрение результатов

Результаты диссертации использованы в ЗАО «ПИК Прогресс» при создании комплекса оборудования для путеизмерительных вагонов, что подтверждено соответствующим актом.

Апробация результатов

Результаты диссертации докладывались на трёх научно-технических конференциях, в том числе: на XXXI международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии» (Новороссийск, 2023 г.); на II Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых «Железная дорога: путь в будущее» (Москва, 2024 г.); на конференции «The 6th 2024 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering» (Москва, 2024 г.).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе: в трёх научных статьях, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, в описании к двум патентам РФ на изобретение, а также в тезисах трёх докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков, 10 таблиц, список литературы включает 123 библиографических описаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту, а также приведена структура диссертации.

В первой главе выполнен обзор существующей аппаратуры для контроля железнодорожного пути, сформулированы требования к оптико-электронной аппаратуре контроля, обоснована актуальность диссертации, определены цель и задачи исследований.

Начальная волнообразная деформация поверхности катания, возникает при прокатке и правке рельсов на металлургических комбинатах вследствие вибрации прокатной клетки, биения валков и других причин. При изготовлении

железнодорожных рельсов осуществляют контроль основных геометрических параметров рельса, в том числе, контролируют полный профиль в поперечных сечениях рельса, прямолинейность поверхности катания, а также скрученность относительно продольной оси рельсов. Автором предложен оригинальный способ и устройство оперативного контроля геометрических параметров рельсов в процессе их изготовления на прокатном стане. Для этого на прокатном стане устанавливаются измерительные блоки, которые представляют собой оптико-электронные приборы триангуляционного типа.

Динамическое воздействие подвижного состава при движении по коротким неровностям, имеющим длину от 30 до 250 мм, вызывает сдвиги или повышенное истирание верхних слоев металла, а также приводит к повышенной вибрации и шуму. В связи с этим требуется контролировать неровности в сечениях вдоль рельса именно на коротких участках, а также величину горизонтальной и вертикальной ступенек в местах стыков рельсов. На рисунке 1 показан пример дефектов в виде короткой неровности (а) и горизонтальной и вертикальной ступенек в стыке рельсов (б).

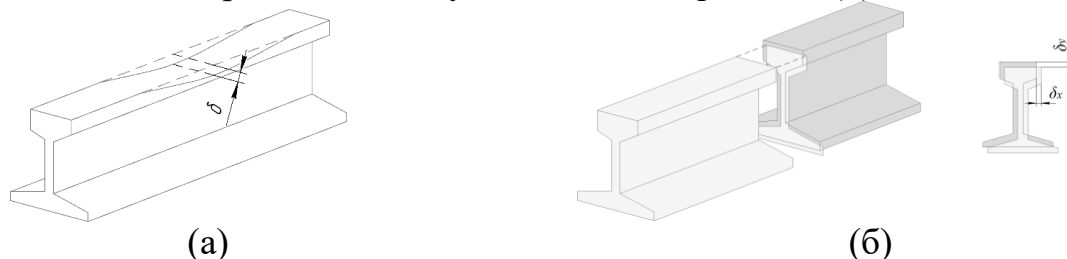


Рисунок 1 – Деформации головки рельса в виде коротких неровностей (а) и горизонтальная и вертикальная ступеньки в стыке рельсов (б)

Из-за больших ударно-динамических нагрузок может возникнуть излом рельсов и стыковых болтов. Согласно регламентирующим документам погрешность определения величины зазоров в стыках рельсов не должна превышать 1 мм, что накладывает особенные требования к быстродействию и пространственному разрешению аппаратуры контроля, функционирующей в составе путеизмерительных вагонов. На рисунке 2 приведена классификация аппаратуры для контроля железнодорожного пути.

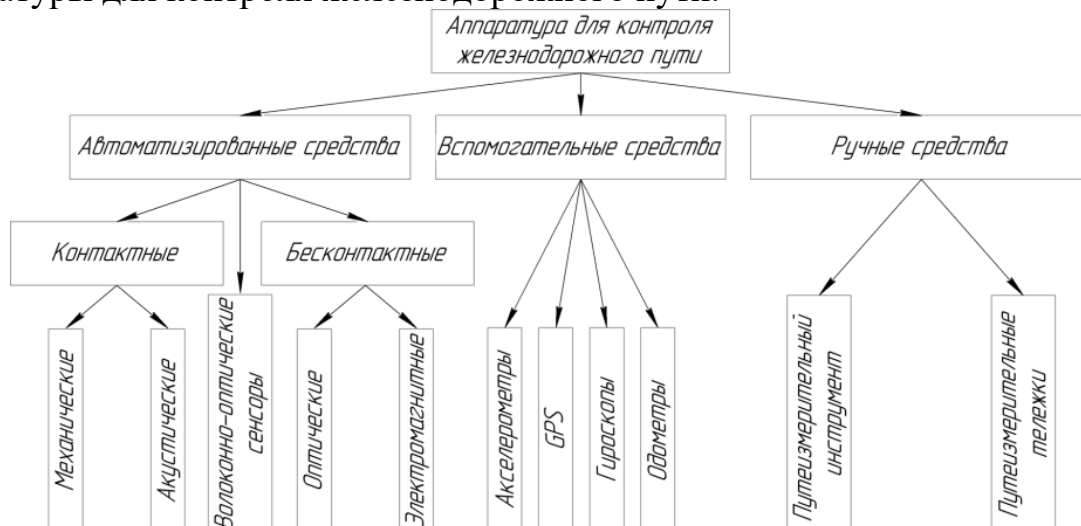


Рисунок 2 – Аппаратура для контроля железнодорожного пути

На основе анализа литературных и патентных источников установлено, что для контроля дефектов железнодорожного пути наибольшее распространение получили ОЭС регистрации 3D-изображений объектов, основанные на триангуляционном методе со структурированной подсветкой. Достоинством ОЭС данного типа является относительная простота алгоритмов, которые используются для синтеза 3D-образов объектов.

В настоящее время отечественные путеизмерительные вагоны, обеспечивающие оперативный контроль состояния верхнего строения железнодорожного пути, не оснащены аппаратурой для оперативного контроля таких дефектов поверхности катания пути, как деформации рельсов в виде коротких неровностей, а также ступенек в рельсовых стыках.

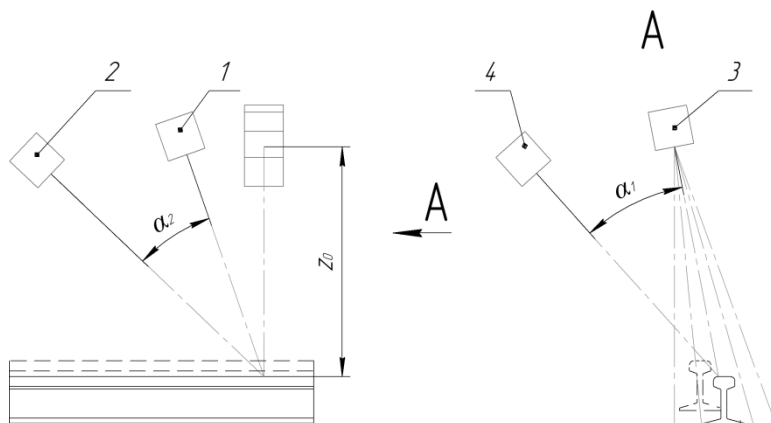
Известны принципы действия устройств и прототипов, основанных на триангуляционном методе регистрации изображений, которые позволяют обнаруживать и измерять размеры дефектов поверхности катания железнодорожных путей с погрешностями, удовлетворяющими требованиям отечественного стандарта для высокоскоростных железнодорожных линий, но только при скоростях движения, не превышающих 30 км/ч. Однако, чтобы выполнение процедур диагностирования и мониторинга пути существенно не влияло на график движения составов, путеизмерительные вагоны, на которых устанавливается аппаратура контроля, должны двигаться со скоростями, соизмеримыми с принятыми для высокоскоростных магистралей. Таким образом, общим недостатком известных технических решений аппаратуры контроля дефектов поверхности катания, описание которых изложено в литературных и патентных источниках, является относительно низкая скорость выполнения процедур оперативного контроля.

На основе проведенного анализа публикаций сделан вывод об актуальности темы диссертации, сформулирована цель и задачи диссертации.

Во второй главе приведено описание принципа действия предложенной двухканальной ОЭС контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути. Выведены математические соотношения, связывающие зависимость координат пространства предметов и плоскости регистрации в триангуляционных схемах регистрации основного и дополнительного каналов системы контроля. Выполнен анализ чувствительности измерительных схем аппаратуры контроля.

Для контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути предложено использовать двухканальную ОЭС. Основной канал представляет собой устройство триангуляционного типа, предназначенное для контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути. Главная особенность этого устройства заключается в использовании для регистрации изображений структурированной подсветки линейной камеры. За счёт этого осуществляется регистрация изображений поперечных сечений поверхности рельсов, отстоящих на расстояние порядка 0,5 мм, при скорости движения путеизмерительного вагона превышающей 140 км/ч. Дополнительный канал предназначен для измерения относительного перемещения контролируемой зоны поверхности катания и установочной базы, возникающего из-за

случайных колебаний вагона. Данные, получаемые в дополнительном канале, используются для компенсации влияния колебаний на результаты измерения. На рисунке 3 представлена схема регистрации изображений в основном и дополнительном каналах.



1 – блок подсветки дополнительного канала; 2 – ТВ-камера дополнительного канала; 3 – блок подсветки основного канала; 4 – линейная камера основного канала.

Рисунок 3 – Схема регистрации изображений в основном и дополнительном каналах ОЭС контроля дефектов поверхности катания

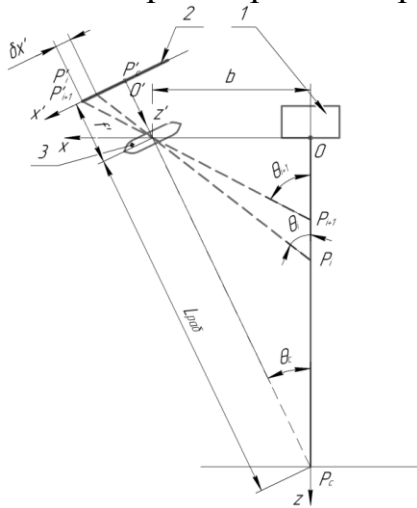
Визирная ось линейной камеры 4 основного канала составляет параллаксный угол α_1 с осью блока подсветки 3, который лежит в плоскости, перпендикулярной оси рельса. Изображение, регистрируемое линейной камерой, представляет собой набор последовательно зарегистрированных строк, ориентированных перпендикулярно оси рельса. При наличии дефектов на поверхности катания изображения этих пятен смещаются в направлении оси чувствительных элементов линейной камеры. Оригинальность устройства, реализованного в основном канале, подтверждена патентом.

Дополнительный канал также является устройством триангуляционного типа, в котором осуществляется регистрация изображения полосы лазерного излучения, создаваемой блоком подсветки 1 на поверхности рельса. При этом визирная ось регистрирующей телевизионной камеры 2 с матричным приёмником составляет параллаксный угол α_2 в плоскости, проходящей через ось рельса и перпендикулярной к его поверхности. Изображение, регистрируемое в дополнительном канале, представляет собой сечение поперечного профиля головки рельса.

Эффект, достигаемый за счёт использования описанной выше двухканальной системы, проиллюстрируем примером. Положим, что скорость движения путеизмерительного вагона равна 90 км/ч. Тогда при частоте кадров телевизионной камеры, равной 100 Гц, в дополнительном канале производится регистрация изображений профиля головки рельса через каждые 250 мм, а в основном канале, имеющем в своём составе линейную камеру с частотой кадров 50 кГц, сечения профиля регистрируются через 0,5 мм. Так как основным источником колебаний вагонов являются стыки между рельсами, то при типовой длине рельсов, равной 25 м, и скорости движения 90 км/ч частота

основной гармонике колебаний равна 1 Гц. Поэтому во временных интервалах между кадрами телевизионной камеры, составляющих 0,01 с, относительные координаты поверхности рельсов можно интерполировать с достаточно высокой точностью.

Для оценки погрешности измерений в основном канале ОЭС с использованием аппарата векторной алгебры выведены математические выражения, описывающие функционирование лазерной триангуляционной системы, в состав которой входит линейная камера и проектор. На рисунке 4 показана схема регистрации в триангуляционной системе.



1 – блок подсветки; 2 – линейная камера; 3 – объектив.

Рисунок 4 – Схема регистрации в триангуляционной системе

В соответствии с рисунком 4 ось пучка лазерного излучения, формирующего пятно с центром в точке $P_i=P(0,0,z_i)$ пространства предметов, лежит на оси OZ главной системы координат XYZ , начало которой совпадает с узловой точкой объектива блока подсветки. Точка $P_c=P(0,0,z_c)$, в которой пересекаются визирные оси объектива линейной камеры и блока подсветки, лежит на опорной плоскости, относительно которой осуществляется измерение дальности до объекта. В принятой для описания пинхольной модели объектив линейной камеры представляет собой тонкую линзу с

задним фокусным расстоянием f' . Ось $O'Z'$ совпадает с оптической осью этого объектива, а ось $O'X'$ совпадает с осью ЛПИ. Зависимость между системами координат пространства предметов XYZ и пространства изображений $X'Y'Z'$ определяется выражением:

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{T} \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

где $\mathbf{T}$ и $\mathbf{R}_y(\theta)$ – линейные операторы, которые описываются матрицами переноса и поворота соответственно.

Координаты точек изображения структурированной подсветки связаны с соответствующими координатами пространства предметов уравнением:

$$x_i' = (x_i^* - x_0) \cos \theta - (z_i^* - z_0) \sin \theta, \quad (2)$$

$$\text{где } z_i^* = \frac{z_i(z_c z_0 + b^2 - b x_0)}{b^2 + z_c z_i}, \quad x_i^* = -\frac{b(z_c z_0 + b^2 - b x_0)}{b^2 + z_c z_i} + b; \quad (3)$$

$(x_0; z_0)$ – координата точки центра линейки чувствительных элементов;

z_c – положение опорной плоскости; b – базовое расстояние.

Представленные выше формулы позволяют вычислить координату изображения любой точки P_i на приемнике излучения. В работе показано, что

чувствительность системы нелинейно зависит от величины Δz смещения поверхности объекта контроля относительно базовой плоскости:

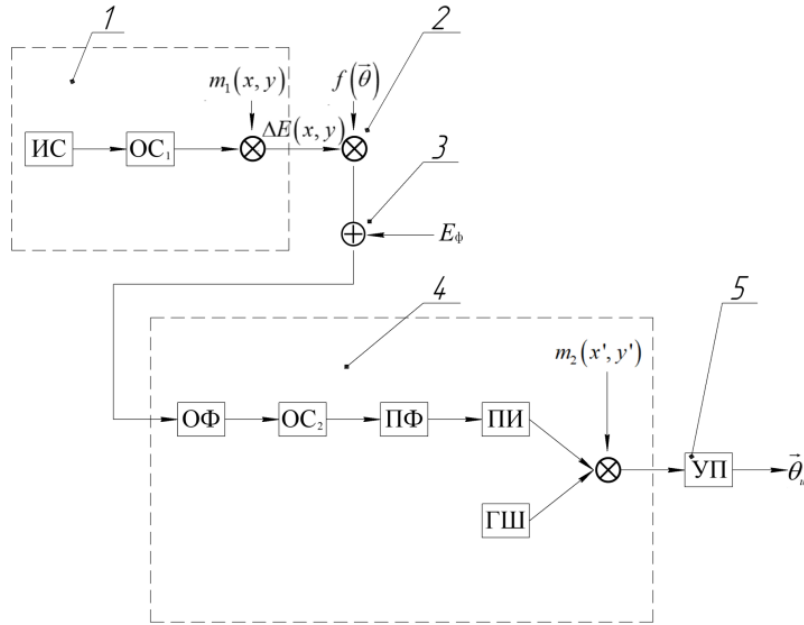
$$\Delta x' = S_1(\Delta z). \quad (4)$$

Вид функции $S_1(\Delta z)$, характеризующей чувствительность измерительной схемы, зависит от фокусного расстояния объектива и линейного параллакса. Таким образом, возникающие при движении вагона вертикальные колебания могут приводить к погрешностям измерения положения участков контролируемой поверхности катания. Кроме этого, в результате горизонтальных смещений на величину Δx путеизмерительного вагона возникает неопределённость, связанная с определением номера регистрируемой полосы структурированной подсветки. Данные, которые формируются в дополнительном канале, позволяют измерить смещения Δz и Δx , возникающие при колебаниях установочной базы и компенсировать неопределённость при анализе изображений полос структурированной подсветки.

Во второй главе было показано, что при измерении перемещений поверхности контроля с погрешностью, определяемой размером одного пикселя, за счёт увеличения линейного параллакса или фокусного расстояния объектива камеры не удаётся достигнуть требуемой погрешности при существующих габаритных ограничениях аппаратуры. В связи с этим предложено использовать алгоритмы цифровой обработки, позволяющие производить оценку координат изображения структурированной подсветки с погрешностью, составляющей доли от размера одного пикселя.

В третьей главе определены показатели эффективности системы контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути, и на основе математического моделирования определена связь этих показателей с конструктивными параметрами составных частей системы. Проведён анализ алгоритмов обработки сигналов, обеспечивающих субпиксельную точность оценки координат изображений. Изложена методика проектирования системы контроля на системотехническом уровне, основанная на математическом моделировании.

Каждый из каналов аппаратуры контроля работает как прибор триангуляционного типа со структурированной лазерной подсветкой, позволяющий определить пространственное положение поверхности катания. Основные отличия устройств основного и дополнительного каналов заключается в схемах взаимного положения визирных осей систем подсветки и регистрации изображений относительно поверхности рельса, а также различных устройствах регистрации изображений лазерных полос. Но при математическом моделировании эти каналы аппаратуры контроля, как объекты проектирования на системотехническом уровне, представлены единой структурной схемой, изображённой на рисунке 5.



1 – источник тестового оптического сигнала; 2 – объект контроля;

3 – источник фонового излучения; 4 – система регистрации и предварительной обработки сигнала; 5 – устройство принятия решений

Рисунок 5 – Структурная схема аппаратуры триангуляционного типа, как объекта проектирования

В плоскость объекта контроля – рельса, источником тестового оптического сигнала проецируется изображение узкой полосы. Пространственное распределение яркости излучения с учётом коэффициента отражения и индикатрисы отражения описываемым выражением:

$$L(x, y; \Delta x) = L_0 \operatorname{rect} \left(\frac{x - \Delta x}{a_x}, \frac{y}{a_y} \right) \otimes H_{\text{пр}}(x, y), \quad (5)$$

где L_0 – среднее значение яркости поверхности контроля в направлении визирной оси системы регистрации изображения тестового сигнала; a_x и a_y – размеры тест-объекта в виде полосы, причём $a_x \ll a_y$; Δx – смещение полосы, возникающее при перемещении поверхности контроля на Δz ; $H_{\text{пр}}(x, y)$ – функция рассеяния оптической системы проектора, которая аппроксимирована двумерной функцией Гаусса с эффективным радиусом $r_{\text{пр}}$ пятна рассеяния.

При допущении об изопланатичности ОС распределение облучённости в её плоскости изображения определяется формулой:

$$E(x', y'; \Delta x') = \pi \left(\frac{D_{\text{зр}}}{2f'} \right)^2 \tau_{\lambda} L \left(\frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta}; \Delta x' \right) \otimes H_{\text{ос}}(x', y'), \quad (6)$$

где $D_{\text{зр}}$ – диаметр входного зрачка ОС; f' – фокусное расстояние ОС; τ_{λ} – коэффициент пропускания ОС на длине волны лазерного излучения; β – линейное увеличение ОС; $H_{\text{ос}}(x', y')$ – функция рассеяния ОС, которая также

аппроксимирована двумерной функцией Гаусса с r_{oc} эффективным радиусом пятна рассеяния.

С учётом пространственной фильтрации оптического сигнала и его дискретизации, которые в модели реализуются такими элементами структурной схемы, как ПФ и ПМ, Электрический сигнал, на выходе ПИ описывается выражением:

$$U_s(x_1; \Delta x') = S_\lambda \Phi(x_1; \Delta x') = S_\lambda \left[A_{\text{пи}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x' - x_1, y'; \Delta x') H_{\text{пи}}(x', y') dx' dy' \right] m(x_1), \quad (7)$$

где S_λ – спектральная чувствительность ПИ; $H_{\text{пи}}(x', y') = \frac{1}{A_{\text{пи}}} \text{rect}\left(\frac{x'}{b_x}, \frac{y'}{b_y}\right)$ – импульсный отклик ПФ; $A_{\text{пи}} = b_x b_y$ – площадь одной чувствительной площадки (пикселя) ПИ; $m(x_1) = \text{comb}\left(\frac{x_1}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{NT_x}\right)$ – модулирующая функция, описывающая процедуру пространственной дискретизации; T_x – период расположения пикселей в ЛПИ или в строках (столбцах) МПИ; N – количество пикселей в ЛПИ или в строках (столбцах) МПИ.

Причём выражение (7) может быть представлено в виде:

$$U_s(x_1; \Delta x') = U_M H(x_1; \Delta x') m(x_1), \quad (8)$$

где U_M – амплитуда сигнала; $H(x_1; \Delta x')$ – функция, описывающая тестовый сигнал после его пространственной фильтрации оптикой проектора, ОС системы регистрации и площадками ПИ.

Для описания помехи, которую добавляет ПИ к регистрируемому сигналу, принята модель «квазибелого шума», подчиняющегося нормальному закону, при допущении об отсутствии неоднородности параметров и характеристик пикселей ЛПИ или МПИ. Наличие этой помехи учтено в структурной модели генератором шума, спектральная плотность на выходе которого описывается формулой:

$$\tilde{K}v(\nu_x) = \tilde{K}v_0 \text{rect}\left(\frac{\nu_x}{\nu_{xM}}\right), \quad (9)$$

где $\nu_{xM} = 1/T_x$ – полоса пространственных частот, в пределах которой спектральная плотность постоянна и равна значению $\tilde{K}v_0$.

Тогда ковариационную функцию можно представить в виде:

$$Kv(\xi) = \sigma_{\text{ш}}^2 \text{sinc}(\pi \nu_{xM} \xi) \approx \tilde{K}v_0 \delta(\xi), \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{ш}}^2 = \tilde{K}v_0 / T_x$ – дисперсия помехи.

С учётом полученных выше выражений пиковое отношение сигнала к шуму, от которого в значительной степени зависит эффективность аппаратуры контроля, на выходе системы регистрации и предварительной обработки сигнала определено выражением:

$$\mu_{\Pi} = \frac{U_M}{\sigma_{\Pi}}. \quad (11)$$

На основе рассмотренного преобразования оптического сигнала в принятой структурной схеме объекта проектирования определён перечень составляющих вектора переменных проектирования, т.е. конструктивных параметров, для основного и дополнительного каналов аппаратуры контроля: параметры схем регистрации в основном и дополнительном каналах; мощность источника лазерного излучения; диаметр $D_{зр}$ и фокусное расстояние f' ОС системы регистрации сигнала; ширина полосы a_x тестового сигнала; эффективные радиусы $r_{пр}$ и $r_{ос}$ пятен рассеяния проектора и ОС системы регистрации сигнала; размеры b_x и b_y , а также период T_x расположения чувствительных элементов ПИ.

Проведён анализ методов оценки координат изображения, которые могут быть использованы в аппаратуре контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути. Установлено, что при использовании метода максимального правдоподобия СКО погрешности определения координат составляет десятые доли пикселя. Однако для реализации метода максимального правдоподобия требуется априори знать вид функции, описывающей сигнал. Но поверхность рельса, как правило, отличается от плоскости, что вносит неопределённость вида регистрируемого сигнала. Кроме этого, данный метод требует значительных ресурсов вычислительных средств при обработке данных, что ограничивает возможность контроля в реальном времени. Однако метод максимального правдоподобия предложено использовать в дополнительном канале, в котором не требуется столь высокое быстродействие и вид сигнала почти не зависит от формы поверхности рельса.

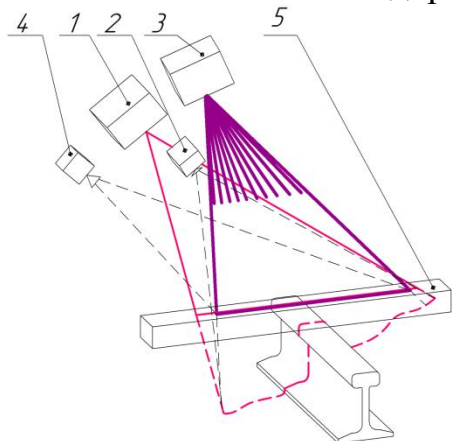
Выполнен анализ методов субпиксельного уточнения, основанных на оценке положения пика по нескольким зарегистрированным значениям сигнала в окрестности этого пика. Эти методы свободны от ограничений, связанных с необходимостью наличия априорной информации о форме сигнала, т.к. для расчёта величины δ субпиксельного уточнения координат пика $f(i)$ используются значения сигналов в двух соседних пикселях $f(i-1)$ и $f(i+1)$. В реальных условиях эксплуатации часть изображения структурированной подсветки может находиться на уровне насыщения, а другая часть, регистрироваться при низком уровне фона. Для достижения высокой точности измерений в таких сложных условиях регистрации требуется использовать специальные алгоритмы. Предложено определять положение пиков по второй производной изображения, отфильтрованного КИХ-фильтром. Показано, что использование алгоритмов, основанных на таком методе, позволяет за счет фильтрации ослабить влияние аддитивного шума, а также получить надёжную оценку положения пиков при использовании параболической интерполяции.

В главе изложена методика проектирования двухканальной ОЭС для контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути, которая основана на системном подходе. Данная методика позволяет определить

рациональное сочетание значений конструктивных параметров элементов функциональной схемы прибора, при которой достигается минимум целевой функции проектирования, определяющей зависимость СКО погрешности измерений дефектов пути от этих конструктивных параметров.

В четвертой главе изложены методики, которые предложено использовать для калибровки, основного и дополнительного каналов аппаратуры, приведено описание предложенной автором методики тарировки двухканальной ОЭС контроля дефектов поверхности катания для реальных условий эксплуатации, а также приведены результаты лабораторных и натурных экспериментальных исследований, которые подтвердили правильность основных теоретических положений диссертации.

Тарировка ОЭС выполняется для компенсации погрешностей измерения дефектов поверхности катания, возникающих из-за вертикальных колебаний путеизмерительного вагона в пределах 200 мм, когда проявляется нелинейность чувствительности измерительной схемы. На рисунке 6 приведена схема измерений, которая используется при тарировке системы контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути.



- 1 – блок подсветки дополнительного канала; 2 – ТВ-камера дополнительного канала; 3 – блок подсветки основного канала; 4 – линейная камера основного канала; 5 – тестовая пластина.

Рисунок 6 – Схема измерений при тарировке ОЭС контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути

Эта процедура выполняется после установки основного и дополнительного каналов ОЭС на штатные места крепления на путеизмерительном вагоне. В процессе тарировки определяется зависимость между смещением точек изображений структурированной лазерной подсветки, обусловленных дефектами на поверхности катания и регистрируемых линейной камерой основного канала, при наличии вертикальных смещений путеизмерительного вагона.

Для тарировки используются четыре тестовые пластины, толщиной ΔZ_0 , равной 50, 100, 150 и 200 мм, которые имитируют колебания вагона в вертикальной плоскости. Кроме этого, при проведении измерений используется тонкая пластина толщиной $h=1$ мм, которая имитирует

дефекты на поверхности катания железнодорожного пути. Толщина всех пластин контролируется с погрешностью, не превышающей 0,1 мм. В методике тарировки принято допущение о том, что центральная часть поперечного сечения рельса близка к прямой линии. Кроме этого, полагалось, что смещение δx_i изображения i -того пятна в строке, измеренное в основном канале при

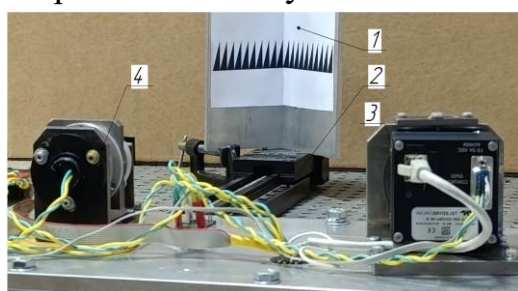
установке тонкой пластины толщиной h на тестовую пластину толщиной ΔZ_0 , определяется уравнением:

$$h / \delta x_i = (a_1 + a_2 x_i + a_3 x_i^2) + (a_4 + a_5 x_i + a_6 x_i^2) Z + (a_7 + a_8 x_i + a_9 x_i^2) Z^2, \quad (12)$$

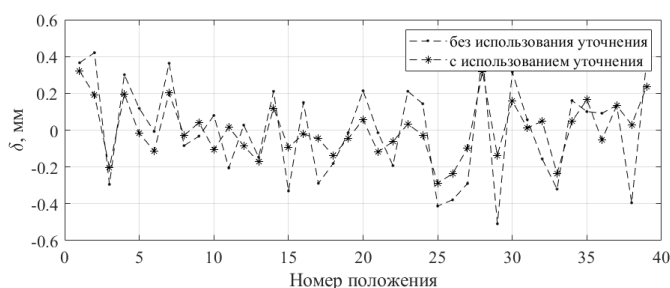
где x_i – координаты i -того пятна в строке, измеренные с субпиксельной точностью до установки тонкой пластины; $Z = Z_0 + \Delta Z_0$ – расстояние от вершины головки рельса до начала системы координат, связанной с проектором основного канала при установке тестовых пластин толщиной ΔZ_0 ; Z_0 – расстояние от вершины головки рельса до начала системы координат, связанной с проектором основного канала; $a_1, \dots, a_9$ – тарифовочные коэффициенты, определяемые путём решения полученной переопределённой системы уравнений.

Результаты тарифовки используются в виде таблиц данных при цифровой обработке в реальном времени изображений, которые регистрируются в основном и дополнительном каналах системы контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути.

Для проведения лабораторных исследований с целью апробации методики калибровки аппаратуры был изготовлен калибровочный тест-объект с нанесённым узором в виде треугольников. На рисунке 7(а) представлена экспериментальная установка.



(а)



(б)

1 – тест-объект; 2 – моторизованный линейный транслятор;
3 – камера; 4 – проектор.

Рисунок 7 – Экспериментальная установка (а) и график значений погрешности измерений дальности при различных положениях тест-объекта (б)

При перемещении тест-объекта в пределах рабочего диапазона от 650 до 850 мм от переднего края системы, было зарегистрировано 40 изображений лазерного пятна. В результате калибровки были определены параметры триангуляционной системы. На рисунке 7(б) представлены графики значений погрешности измерений дальности при различных положениях тест-объекта в рабочем пространстве.

В результате лабораторных исследований установлено, что СКО погрешности измерения координат ОЭС оперативного контроля не превышает 0,15 мм. Достигнутая погрешность измерения дефектов, удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к аппаратуре контроля дефектов поверхности катания железнодорожных рельсов.

Для проведения натурных экспериментов был изготовлен опытный

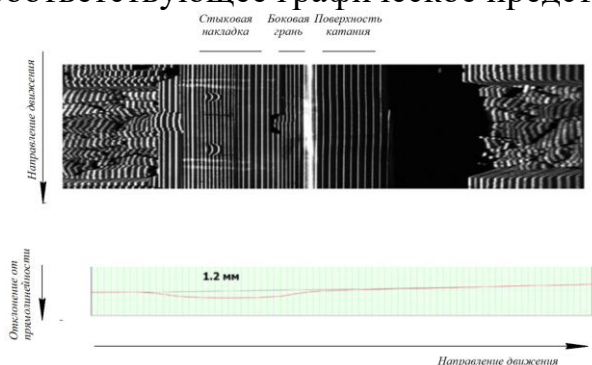
образец ОЭС для оперативного контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути, фотография которого представлена на рисунке 8, устанавливался на мобильном диагностическом комплексе МДК-498 (РЦДМ Санкт-Петербург).



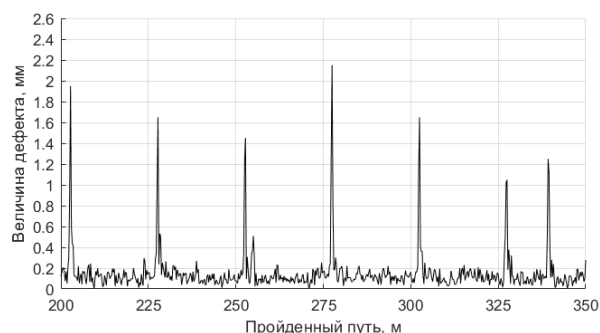
Рисунок 8 – Фотография испытательного образца ОЭС для оперативного контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути

Для вычисления значений величин коротких неровностей на поверхности катания и размеров стыковых ступенек по изображениям, регистрируемым ОЭС для оперативного контроля дефектов поверхности катания, было разработано специальное программное обеспечение. Обработка данных регистрации выполнялась в реальном времени с фиксацией к пройденному пути с погрешностью до 1 мм, что обеспечивалось

одометрической системой, входящей в состав оборудования путеизмерительного вагона. На рисунке 9 (а) представлен пример зарегистрированного изображения неровности на поверхности катания и соответствующее графическое представление короткой неровности вдоль пути.



(а)



(б)

Рисунок 9 – пример изображения зарегистрированной неровности поверхности катания и отображение результата обработки этого дефекта (а) и отображение величин зарегистрированных дефектов с привязкой к пройденному расстоянию (б)

На верхней части рисунка представлено изображение, зарегистрированное в основном канале. Слева на этом изображении представлена стыковая накладка, боковая поверхность рельса, а справа – поверхность катания рельса. Искривление зарегистрированных полос свидетельствует о наличии дефекта в зоне сварного стыка на поверхности катания. На нижнем графике эта неровность в виде продольного профиля середины поверхности катания изображена утолщённой кривой, а тонкая прямая – идеальный профиль, относительно которого оценивается величина дефекта.

В режиме реального времени осуществляется вывод обработанной информации. В качестве примера на рисунке 9 (б) представлен фрагмент пройденного бесстыкового пути. Зарегистрированные неровности на графике представлены в виде «пиков». Из графиков видно, что наибольшие отклонения следуют через каждые 12,5 или 25 метров, что соответствует стандартным длинам рельсов.

Значения неровностей измерялись после испытательных поездок вручную с использованием специальных шаблонов. В результате проведённых натурных испытаний установлено, что СКО погрешности измерения дефектов поверхности катания не превышает 0,25 мм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что опытный образец, в котором реализованы предложенные принципы действия, обеспечивает высокоточный скоростной оперативный контроль дефектов поверхности катания железнодорожного пути в реальных условиях эксплуатации.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана оригинальная схема двухканальной ОЭС триангуляционного типа, предназначенная для оперативного контроля дефектов поверхности катания железнодорожных рельсов. В отличие от известных аналогов предлагаемая система обладает высоким быстродействием, прецизионной точностью и позволяет осуществлять контроль дефектов в поперечных сечениях рельса, отстоящих на расстоянии 0,5 мм при скоростях движения путеизмерительного вагона превышающих 140 км/ч и наличии колебаний установочной базы, возникающих при высоких скоростях движения путеизмерительного вагона.

2. На основе созданной математической модели ОЭС контроля разработана методика проектирования на системотехническом уровне, позволяющая определить рациональное сочетание значений конструктивных параметров составных частей аппаратуры, при которых обеспечиваются минимальные значения вероятности пропуска дефектов и СКО погрешности их определения.

3. Разработанная методика проектирования двухканальной ОЭС контроля дефектов поверхности катания железнодорожного пути апробирована при создании опытного образца аппаратуры.

4. Для повышения точности измерения размеров дефектов в основном канале ОЭС предложено использовать алгоритм обработки изображений, основанный на методе субпиксельного уточнения координат изображения пиков, а в дополнительном канале – алгоритм, основанный на методе максимального правдоподобия.

5. Предложена методика тарировки двухканальной ОЭС контроля в реальных условиях эксплуатации, которая позволяет связать координаты основного и дополнительного каналов системы с целью компенсации погрешностей измерений, обусловленных колебаниями установочной базы.

6. Проведённые лабораторные и натурные испытания подтвердили

основные теоретические положения диссертации. В результате натурных экспериментов в реальных условиях эксплуатации установлено, что за счёт использования дополнительного канала существенно уменьшено влияние колебаний установочной базы аппаратуры, и СКО погрешности измерения дефектов поверхности катания по результатам контрольных замеров не превысило 0,25 мм.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Колючкин В.Я., Маренов Н.Е., Егоров А.О. Оптико-электронная система для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2023. № 3 (144). С. 33–48. (1,25 п.л./0,42)
2. Колючкин В.Я., Маренов Н.Е., Оценка погрешности оптико-электронной системы оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов. Контенант. 2024. Т. 23, №1. С. 31–40. (0,68 п.л./0,34 п.л.)
3. Колючкин В.Я., Маренов Н.Е. Двухканальная оптико-электронная система контроля железнодорожных рельсов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2025. № 2 (151). С. 19–34. (1,0 п.л./0,50 п.л.)
4. Патент № 2822859 С1 Российская Федерация, МПК G01B 11/24 (2006.01), B61K 9/08 (2006.01). Устройство контроля профиля поверхности протяженных объектов: № 2023135038 : заявл. 25.12.2023 : опубл. 15.07.2024 / Егоров А.О., Маренов Н.Е.; заявитель Егоров А.О. 11 с. (0,56 п.л./0,28 п.л.)
5. Патент № 2837941 С1 Российская Федерация, МПК B61K 9/08 (2006.01), E01B 35/00 (2006.01), G01B 11/02 (2006.01), G01B 11/04 (2006.01). Способ и устройство контроля геометрических параметров движущихся железнодорожных рельсов: № 2024121126 : заявл. 25.07.2024 : опубл. 07.04.2025 / Егоров А.О., Кулешова М.П., Маренов Н.Е., Мухаметшин А.А., Рязанцев Е.Ю., Шахнович О.С. 18 с. (0,56 п.л./0,09 п.л.)
6. Колючкин В.Я., Маренов Н.Е., Егоров А.О. Алгоритмы обработки сигналов в системе для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов в условиях фоновых засветок. ЛАЗЕРНО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (ЛИТ-2023) Труды XXXI международной научной конференции. Новороссийск. 2023. С. 216–217. (0,12 п.л./0,06 п.л.)
7. Колючкин В.Я., Маренов Н.Е., Егоров А.О. Экспериментальное исследование оптико-электронной системы оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов. II Международная научная конференция "Железная дорога: путь в будущее". Сборник материалов аспирантов и молодых ученых к 80-летию аспирантуры и научного центра "Экономика комплексных проектов и тарифообразования" АО "ВНИИЖТ". 2024. С. 580–585. (0,42 п.л./0,14 п.л.)
8. Koluchkin V.Y., Marenov N.E. Algorithms of Signal Processing in the System for High-Speed Corrugation Monitoring of Rails. 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. 2024. P. 1-5. (0,84 п.л./0,41 п.л.)