

ДВУХКАНАЛЬНАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

В.Я. Колючкин

vkoluch@bmstu.ru

Н.Е. Маренов

marenov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Увеличение объема грузоперевозок и скорости движения поездов требует создания средств контроля состояния железнодорожного пути для своевременного выявления дефектов. Описаны принципы действия высокоскоростной прецизионной аппаратуры для оперативного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов, выполнена экспериментальная оценка погрешности аппаратуры, основанной на этих принципах. Высокая производительность процедуры контроля обеспечивается за счет регистрации изображений структурированной подсветки в поперечных сечениях рельса линейной камерой основного канала. При скорости движения путеизмерительного вагона 180 км/ч практически исключаются пропуски коротких дефектов поверхности, в том числе дефектов в виде ступенек на стыках рельсов. Предложен метод компенсации погрешностей при колебаниях путеизмерительного вагона, основанный на информации о его вертикальных колебаниях в дополнительном канале, регистрирующем смещение изображения головки рельса относительно установочной базы аппаратуры регистрации, и использовании методики тарировки системы контроля. Приведено описание методики тарировки двухканальной оптико-электронной системы. Результаты натурных испытаний опытного образца оптико-электронной системы контроля прямолинейности железнодорожных рельсов подтверждена правильность технических решений, положенных в ее основу

Ключевые слова

Железнодорожные рельсы, оптико-электронная система, структурированная подсветка, контроль, измерение, погрешность

Поступила 09.12.2024

Принята 15.01.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. Увеличение объема перевозимых грузов и скорости движения поездов, а также строительство новых транспортных линий стимулирует создание средств контроля состояния железнодорожного пути. Своевременное обнаружение дефектов железнодорожных путей позволяет избежать аварий, закрытия участков путей и, как следствие, нарушений в расписании движения поездов [1, 2].

При движении железнодорожных составов в верхнем строении пути возникают вибрации различной степени интенсивности. Их вызывают неровности на поверхности катания колес и рельсов, а также зазоры между боковыми гранями головок рельсов и гребнями колес. Для снижения риска аварийных ситуаций, вызванных отклонениями от установленных норм, ведется регулярный мониторинг железнодорожного полотна. Для контроля параметров верхнего строения железнодорожного пути в процессе движения по контролируемому участку путеизмерительные вагоны оснащаются контактными и бесконтактными средствами контроля геометрических параметров рельсов и их взаимного положения [3–7].

Начальная волнообразная деформация поверхности катания возникает при прокатке и правке рельсов на металлургических комбинатах вследствие вибрации прокатной клетки, биения валков и других причин, а в процессе эксплуатации происходит дальнейшее развитие первоначальных дефектов и увеличение амплитуды волнообразных неровностей [8–11]. К коротким неровностям относятся смятие и износ головки рельсов в зоне сварного стыка из-за локального снижения механических свойств металла. Рельсы с глубиной волны более 1 мм при измерении на длине 1 м являются дефектными (инструкция ОАО «РЖД» № 2288р от 14.11.2016 по текущему содержанию железнодорожного пути).

В процессе эксплуатации рельсы претерпевают изменения, что влияет на значения зазоров. Эти изменения происходят вследствие продольного смещения рельсов по подкладкам (вместе со шпалами), вызванного действием сил угона и постоянными температурными колебаниями рельсов. Степень, скорость изменений зазоров и направление их смещения вдоль пути зависят от множества факторов: преобладания определенного направления движения поездов, типа и числа составов, режимов их передвижения (с торможением или без), продольного профиля железнодорожного пути (повышение или понижение), амплитуды суточных и сезонных колебаний температуры и прочих обстоятельств. Вследствие больших ударно-динамических нагрузок в рельсовых стыках может возникнуть излом рельсов и стыковых болтов. В связи с этим требуется контролировать размер ступенек в стыках. Погрешность определения зазора не должна

превышать 1 мм, что исключает возможность пропуска стыков при контроле. Согласно действующей инструкции, при постоянной эксплуатации не допускаются вертикальные ступеньки в стыках, превышающие 2 мм, а при ступеньке более 5 мм движение на этом участке закрывается.

Существует аппаратура [12] для оперативного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов, в том числе с использованием оптико-электронных преобразователей (ОЭП) триангуляционного типа. Основным недостатком такой аппаратуры является ограничение по скорости движения путеизмерительного вагона при контроле поверхности катания железнодорожных рельсов. Описание системы, включающей в себя три лазерных источника излучения и телевизионную камеру с матричным приемником излучения, которая с помощью магнитов устанавливается на несущих рамах путеизмерительного вагона на расстоянии 200 мм от контролируемой поверхности рельсов, приведено в [13, 14]. На поверхность катания проецируются три параллельных полосы вдоль оси рельса, после обработки зарегистрированных изображений вычисляются значения неровностей. Испытания такой системы проводились в лабораторных условиях при смоделированной скорости движения 30 км/ч. Таким образом, при частоте кадров телевизионной камеры 100 Гц возможен контроль в поперечных сечениях рельса, расстояние между которыми составляет 80 мм. Следовательно, возможность оперативного контроля этой системы существенно ограничена, поскольку с высокой вероятностью есть такие места стыков рельсов, где обычно наблюдаются резкие скачки поверхности катания. Система, представляющая собой ОЭП триангуляционного типа, в которой формируется структурированная подсветка в виде трех параллельных полос, ориентированных перпендикулярно оси рельса, и регистрируются три поперечных сечения рельса в одном кадре, приведена в [15, 16]. Испытания подтвердили работоспособность системы при скорости движения, не превышающей 10 км/ч.

Аппаратура контроля устанавливается снизу на несущих рамах путеизмерительного вагона. В связи с этим одним из факторов, который влияет на погрешность контроля прямолинейности рельсов, являются вертикальные колебания, возникающие при движении вагона: чем выше скорость, тем больше частота и амплитуда колебаний. Вертикальные колебания вносят неопределенность в результаты измерений прямолинейности поверхности катания. В перечисленных устройствах контроля этот фактор не учитывался, так как испытания проводились при относительно малых скоростях движения.

Цель настоящей работы — разработка принципов действия высокоскоростной прецизионной аппаратуры для оперативного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов и экспериментальная оценка погрешности аппаратуры, основанной на этих принципах.

Принцип действия системы контроля прямолинейности рельсов. Альтернативой описанным устройствам является предлагаемая авторами оптико-электронная система для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов, которая, как отмечено в [17, 18], позволяет регистрировать изображения сечений поверхности рельсов, отстоящих на расстояние ~ 1 мм, при скорости движения путеизмерительного вагона до 180 км/ч. Высокое быстродействие достигается за счет использования для регистрации изображений структурированной лазерной подсветки не телевизионных камер с матричными приемниками излучения, а камер линейного сканирования, в которых сечения изображения регистрируются с частотой несколько десятков килогерц. На основе методов математического моделирования оптимизированы конструктивные параметры составных частей предлагаемого прибора и показано, что при использовании алгоритмов обработки изображений структурированной подсветки с субпиксельным уточнением координат расчетная пороговая чувствительность измерений координат поверхности катания железнодорожных рельсов составляет сотые доли миллиметров [17].

Для минимизации погрешности изготовленного опытного образца системы, обусловленной неопределенностью параметров измерительной схемы и конструктивных параметров ее элементов, выполнялась калибровка. Приведенные в [19] результаты лабораторных экспериментальных исследований показали, что методика калибровки обеспечивает компенсацию погрешностей, связанных с неопределенностью значений внутренних и внешних параметров системы. Измеренное в лабораторных условиях среднеквадратическое отклонение (СКО) результатов контроля положения изображений структурированной подсветки не более 0,2 мм. Как отмечено ранее, в реальных условиях эксплуатации в составе движущегося с высокой скоростью путеизмерительного вагона происходят колебания, влияющие на внешние параметры измерительной схемы. В частности, размах вертикальных колебаний может достигать 200 мм. Это приводит к неопределенности значения углового параллакса измерительной схемы и, как следствие, к погрешности определения координат поверхности катания.

Для решения проблемы неопределенности, возникающей вследствие колебаний вагона, может быть применена стереосистема с двумя линейными камерами [20]. Компенсировать возникающую при колебаниях неопределенность, используя в составе оптико-электронной системы контроля прямолинейности рельсов дополнительный канал, в котором в процессе движения путеизмерительного вагона измеряется смещение головки рельса относительно установочной базы системы, предлагается в [20]. Таким образом, оптико-электронная система контроля прямолинейности рельсов включает в себя два канала, первый из которых (основной) предназначен для измерения прямолинейности поверхности катания, а второй (дополнительный) — для относительного перемещения базы, на которой установлена система контроля поверхности рельса. Схема регистрации изображений в основном и дополнительном каналах приведена на рис. 1.

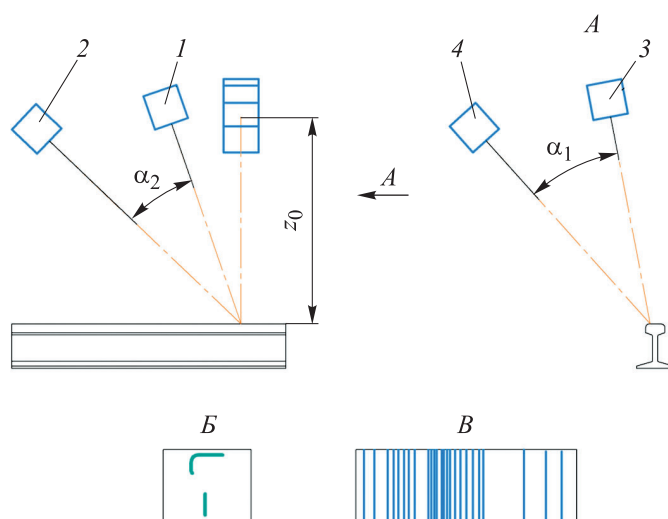


Рис. 1. Схема регистрации изображений в основном и дополнительном каналах оптико-электронной системы контроля прямолинейности рельсов:

1, 3 — проекторы дополнительного и основного каналов; 2 — телевизионная камера дополнительного канала; 4 — линейная камера основного канала

Дополнительный канал представляет собой прибор триангуляционного типа, в котором регистрируется изображение полосы лазерного излучения, проецируемое проектором на поверхность рельса. Визирная ось регистрирующей телевизионной камеры с матричным приемником составляет параллаксный угол α_2 в плоскости, проходящей через ось рельса и перпендикулярной к его поверхности. Изображение B, регистрируемое в дополнительном канале (см. рис. 1), представляет собой сечение поперечного

профиля головки рельса. Визирная ось линейной камеры основного канала составляет параллаксный угол α_1 с осью проектора, который лежит в плоскости, перпендикулярной оси рельса. Согласно схеме на рис. 1, изображение B , регистрируемое линейной камерой, представляет собой набор последовательно зарегистрированных строк, каждая строка содержит набор пятен, ориентированных перпендикулярно оси рельса. Поскольку расстояние между строками в плоскости рельса не превышает 1 мм, на схеме (см. рис. 1) регистрируемое изображение представлено набором линий, ориентированных вдоль рельса. Отметим, что при разработке системы контроля обеспечивается условие, согласно которому погрешность дополнительного измерительного канала не превышает погрешности основного канала.

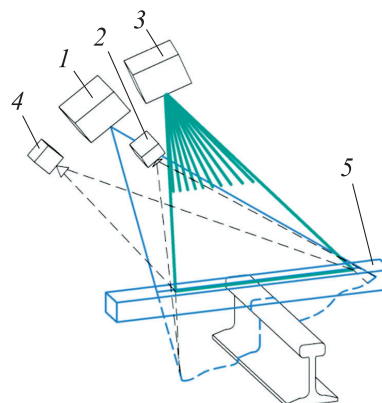
Для иллюстрации возможности предлагаемой двухканальной системы контроля прямолинейности рельсов принимаем, что скорость движения путеизмерительного вагона равна 90 км/ч. При частоте кадров телевизионной камеры 100 Гц в дополнительном канале регистрируются изображения профиля головки рельса через каждые 250 мм, а в основном канале, имеющем в составе линейную камеру с частотой кадров 25 кГц, — через 1 мм. Основным источником колебаний вагонов являются стыки между рельсами, поэтому при типовой длине рельсов 25 м и скорости движения 90 км/ч частота основной гармоник колебаний составляет 1 Гц. В связи с этим во временных интервалах между кадрами телевизионной камеры, составляющими 0,01 с, относительные координаты поверхности рельсов можно интерполировать с достаточно высокой точностью. Чтобы скомпенсировать погрешности оптико-электронной системы контроля прямолинейности, возникающие в процессе эксплуатации вследствие вертикальных колебаний вагона, проводится тарировка этой системы.

Методика тарировки оптико-электронной системы контроля прямолинейности рельсов. Тарировка системы контроля выполняется после установки основного и дополнительного каналов на штатные места крепления путеизмерительного вагона. В процессе тарировки определяется зависимость между смещением изображений пятен структурированной лазерной подсветки, обусловленных отступлением поверхности катания от прямолинейности, и пятен, регистрируемых линейной камерой основного канала при наличии вертикальных смещений путеизмерительного вагона.

Схема измерений, выполняемых при тарировке системы контроля прямолинейности рельсов, приведена на рис. 2. Для тарировки используются четыре тестовые пластины толщиной $\Delta Z_0 = 50, 100, 150$ и 200 мм.

Рис. 2. Схема измерений при тарировке системы контроля прямолинейности рельсов:

- 1, 3 — проекторы дополнительного и основного каналов;
2 — телевизионная камера дополнительного канала; 4 — линейная камера основного канала;
5 — тестовая пластина



Пластинами имитируются колебания вагона в вертикальной плоскости. Кроме того, при проведении измерений применяется тонкая пластина толщиной $h = 1$ мм, которая имитирует отступление поверхности катания рельсов от прямолинейности. Толщина всех пластин должна контролироваться с погрешностью не более 0,1 мм.

В методике тарировки принято допущение о том, что центральная часть поперечного сечения рельса близка к прямой линии. Полагается, что смещение δx_i изображения i -го пятна в строке, измеренное в основном канале при установке тонкой пластины толщиной h на тестовую пластину толщиной ΔZ_0 , определяется уравнением

$$\frac{h}{\delta x_i} = (a_1 + a_2 x_i + a_3 x_i^2) + (a_4 + a_5 x_i + a_6 x_i^2) Z + (a_7 + a_8 x_i + a_9 x_i^2) Z^2,$$

где x_i — координаты i -го пятна в строке, измеренные с субпиксельной точностью до установки тонкой пластины; a_1 – a_9 — тарировочные коэффициенты; $Z = Z_0 + \Delta Z_0$ — 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).

Методика тарировки включает в себя следующую последовательность действий.

1. Установка измерительной системы на штатные места крепления путеизмерительного вагона; измерение расстояния Z_0 .

2. Установка на рельс тестовой пластины толщиной ΔZ_0 ; регистрация сечения лазерной подсветки в основном канале; вычисление координат x_i пятен структурированной подсветки в этом сечении.

3. Наложение на тестовую пластину тонкой полосы толщиной $h = 1$ мм; регистрация сечения лазерной подсветки в основном канале; вычисление смещение δx_i ; изображений i -х пятен лазерной подсветки.

4. Выполнение действий по пунктам 2 и 3 для четырех тестовых пластин.

5. Определение значений тарировочных коэффициентов из полученной переопределенной системы уравнений.

6. Введение поправочных коэффициентов в значения ΔZ , измеряемые в дополнительном канале.

Кроме компенсации погрешностей, обусловленных колебаниями путеизмерительного вагона, результаты тарировки, приведенные в таблице, позволяют выполнить цифровую обработку данных при измерении прямолинейности рельсов в режиме реального времени.

Натурные испытания опытного образца. Для проведения натурных испытаний изготовлен опытный образец оптико-электронной системы для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов. В качестве приемника излучения в опытном образце использована камера линейного сканирования Teledyne DALSA с линейкой чувствительных элементов 1×2048 пикселей (размер пикселя 7,04 мкм) и объективом с фокусным расстоянием

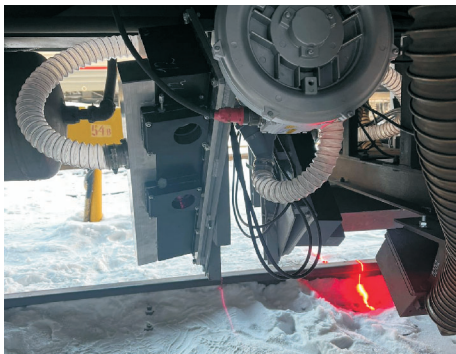


Рис. 3. Опытный образец оптико-электронной системы для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов

35 мм. Проектор системы включал в себя источник излучения в виде лазерного диода с длиной волны 805 нм, излучение которого коллимировалось линзой с фокусным расстоянием 4 мм и направлялось на фазовый транспарант. Созданная структурированная подсветка формировала набор полос в пространстве предметов с периодом ~ 3 мм. Опытный образец оптико-электронной системы для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов (рис. 3) устанавливался на мобильном диагностическом комплексе МДК-498 (РЦДМ, Санкт-Петербург).

Испытательная поездка проведена по направлению Октябрьской железной дороги при скорости движения 90 км/ч. Для оценки значений неровностей и ступенек по изображениям, регистрируемым оптико-электронной системой для оперативного контроля прямолинейности железно-

дорожных рельсов, разработано программное обеспечение, в котором реализовано несколько функций, в том числе определение координат головки рельса, слежение за полосами структурированной подсветки в центральной части поперечного сечения в пределах регистрируемого кадра, поиск неровностей на заданном расстоянии и стыковых зазоров, измерение величины ступеньки на стыках рельсов. Обработка выполнена в режиме реального времени с фиксацией к пройденному пути с точностью до 1 мм, что обеспечивалось одометрической системой, входящей в состав оборудования путеизмерительного вагона.

Для реализации функции слежения за полосами на середине поверхности катания используют информацию о положении головки рельса и изображение в зарегистрированном кадре. Слежение за полосами выполняется в рамках кадра, также сохраняется массив положений полос, который определяется с субпиксельной точностью. Функция поиска неровности — это анализ массива на наличие коротких неровностей. Если в текущем кадре обнаруживают неровность, то записывают информацию об обнаруженном дефекте. Пример зарегистрированного изображения неровности на поверхности катания и соответствующее графическое представление короткой неровности вдоль пути приведены на рис. 4.

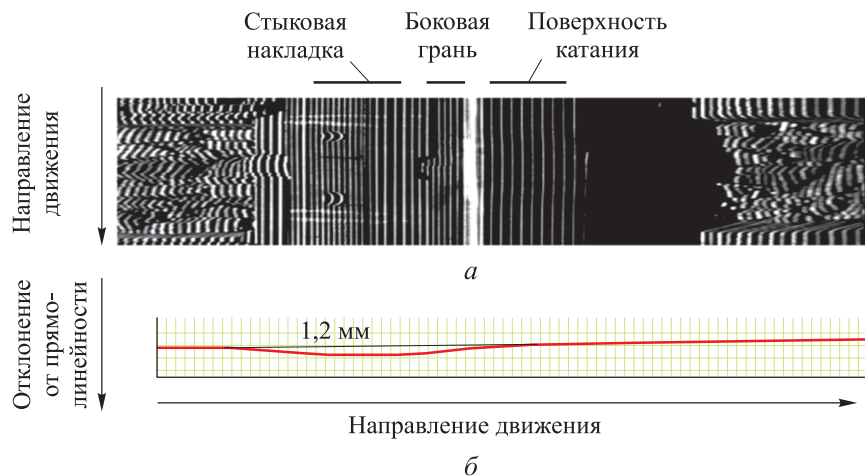


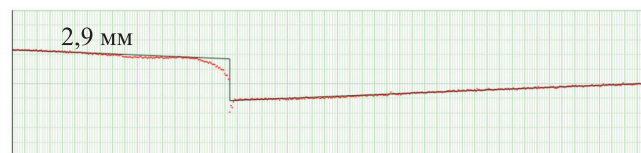
Рис. 4. Пример зарегистрированного изображения неровности на поверхности катания (а) и графическое представление короткой неровности вдоль пути (б)

Изображение, зарегистрированное в основном канале, приведено на рис. 4, а, слева — стыковая накладка и боковая поверхность рельса, а справа — поверхность катания рельса. По искривлению зарегистрированных полос виден дефект в виде неровности в зоне сварного стыка на поверхности катания. Эта неровность на рис. 4, б в виде продольного

профиля середины поверхности катания показана кривой красного цвета, а кривой черного цвета — линия, относительно которой оценивается дефект. Контрольные замеры проводили вручную с использованием металлической линейки и набора щупов для измерения зазоров с погрешностью 0,1 мм. Значения коротких и импульсных неровностей, измеренных оптико-электронной системой, и результаты контрольных замеров этих дефектов приведены ниже (СКО погрешности измерения составляет 0,191 мм):

Контрольный замер, мм	1,3	1,7	1,3	1,4	1,9	2,1	1,5	2,1	1,9	1,9
Зарегистрированный дефект, мм	1,2	1,5	1,1	1,5	2,2	2,0	1,7	2,2	2,1	1,7

Функция поиска стыкового зазора позволяет обнаружить «разрывы» на поверхности катания в местах стыков рельсов. Если стыковой зазор обнаружен, то вычисляют профиль рельсов до и после зазора, а также размер стыковой ступеньки. Пример графического представления зарегистрированной вертикальной стыковой ступеньки в виде облака точек красного цвета для центрального сечения поверхности катания приведен на рис. 5, а, черным цветом обозначена линия, полученная аппроксимацией сечения поверхности катания, относительно этой линии оценивается дефект. Контрольный замер вертикальной стыковой ступеньки с помощью линейки Шестопалова, имеющей погрешность 0,5 мм, приведен на рис. 5, б.



1049660

а



б

Рис. 5. Графическое представление зарегистрированной вертикальной ступеньки в виде облака точек красного цвета (а), контрольный замер вертикальной стыковой ступеньки с помощью линейки Шестопалова (б)

Результаты измерения вертикальных стыковых ступенек оптико-электронной системой и контрольных замеров приведены ниже (СКО погрешности измерения составляет 0,243 мм):

Контрольный замер, мм	3,0	2,5	2,0	2,0	2,5	1,5
Зарегистрированный дефект, мм	2,9	2,7	1,7	1,8	2,8	1,3

Обсуждение результатов экспериментов. В связи с отсутствием априорной информации о расположении коротких и импульсных неровностей на участке предварительная разметка пути с маркировкой и натурным измерением неровностей не проводилась. Значения неровностей измеряли после испытательных поездок вручную специальными шаблонами. В результате проведенных натурных испытаний установлено, что СКО погрешности измерения коротких неровностей от контрольного замера составило 0,191 мм, а СКО погрешности измерения стыковых ступенек — 0,243 мм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что опытный образец, в котором реализованы предложенные принципы действия, обеспечивает высокоточный оперативный контроль прямолинейности поверхности катания рельсов в реальных условиях эксплуатации.

Заключение. Разработаны принципы действия двухканальной триангуляционной оптико-электронной системы для оперативного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов. В отличие от существующих аналогов предлагаемая система имеет высокое быстродействие и прецизионную точность. При скорости движения путеизмерительного вагона 180 км/ч практически исключены пропуски коротких дефектов поверхности, в том числе дефектов в виде ступенек на стыках рельсов. Такое быстродействие достигается за счет применения оптико-электронной системы линейной камеры в основном канале. Прецизионность измерений прямолинейности поверхности рельсов обеспечивается алгоритмами обработки регистрируемых изображений структурированной подсветки с субпиксельной точностью и компенсацией влияния вертикальных колебаний, возникающих при движении путеизмерительного вагона. Результаты натурных испытаний опытного образца оптико-электронной системы подтвердили высокую эффективность предложенных технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Яновский А.С. На 139-й Рельсовой комиссии в Туле. *Путь и путевое хозяйство*, 2023, № 11, с. 5–7. EDN: PTPSTS

- [2] Хвостик М.Ю., Хромов И.В., Быкова О.А. и др. Анализ состояния рабочей поверхности рельсов опытных партий на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». *Вестник ВНИИЖТ*, 2018, т. 77, № 3, с. 141–148.
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-141-148>
- [3] Falamarzi A., Moridpour S., Nazem M. A review on existing sensors and devices for inspecting railway infrastructure. *Jurnal Kejuruteraan*, 2019, vol. 31, no. 1, pp. 1–10.
DOI: [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(1\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(1)-01)
- [4] Liu S., Wang Q., Luo Y. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry. *Transp. Saf. Environ.*, 2019, vol. 1, no. 3, pp. 185–204. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdz007>
- [5] Глазунов Д.В. Диагностические и технологические способы повышения надежности рельсового пути. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2019, № 1, с. 32–40. EDN: PPGLYD
- [6] Назаров Д.Г., Гура Д.А. О системах автоматизированного путеизмерительного контроля. *Научные труды КУБГТУ*, 2019, № 1, с. 135–146. EDN: POFXEN
- [7] Du C., Dutta S., Kurup P., et al. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sens. Actuat. A: Phys.*, 2020, vol. 303, art. 111728.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111728>
- [8] Бондарев Э.С. Прогнозирование технического состояния рельсов по статистическим данным. *Вестник СГУПС*, 2021, № 4, с. 55–61.
DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_59_55
- [9] Коссов В.С., Краснов О.Г., Акашев М.Г. Влияние смятия в зоне сварных стыков на силовое воздействие подвижного состава на путь. *Вестник ВНИИЖТ*, 2020, т. 79, № 1, с. 9–16. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-9-16>
- [10] Oostermeijer K.H. Review on short pitch rail corrugation studies. *Wear*, 2008, vol. 265, no. 9–10, pp. 1231–1237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.037>
- [11] Grassie S.L., Kalousek J. Rail corrugation: characteristics, causes and treatments. *Proc. Inst. Mech. Eng. F*, 1993, vol. 207, no. 1, pp. 57–68.
DOI: https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1993_207_227_02
- [12] Wang Q.A., Huang X.Y., Wang J.F., et al. Concise historic overview of rail corrugation studies: from formation mechanisms to detection methods. *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 4, art. 968. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14040968>
- [13] Gazafrudi S.M.M., Younesian D., Torabi M. A high accuracy and high speed imaging and measurement system for rail corrugation inspection. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2021, vol. 68, no. 9, pp. 8894–8903. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3013748>
- [14] Torabi M., Mousavi G.S.M., Younesian D. A novel method for laser peak detection with subpixel accuracy for the rail corrugation measurement. *J. Sens.*, 2021, vol. 2021, no. 1, art. 6695674. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6695674>
- [15] Wang C., Zeng J. Combination-chord measurement of rail corrugation using triple-line structured-light vision: rectification and optimization. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2020, vol. 22, no. 11, pp. 7256–7265.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3004918>

- [16] Wang C., Liu H., Ma Z., et al. Dynamic inspection of rail wear via a three-step method: auxiliary plane establishment, self-calibration, and projecting. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 36143–36154. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2851572>
- [17] 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. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-33-48>
- [18] Егоров А.О., Маренов Н.Е. Устройство контроля профиля поверхности протяженных объектов. Патент РФ № 2822859. Заявл. 25.12.2023, опубл. 15.07.2024.
- [19] Колючкин В.Я., Маренов Н.Е. Оценка погрешности оптико-электронной системы оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов. *Контейнент*, 2024, т. 23, № 1, с. 30–39. EDN: EVOKFF
- [20] Zhan P., Lee D. J., Beard R. Solving correspondence problems with 1D signal matching. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5608, pp. 207–217. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.572475>

Колючкин Василий Яковлевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Маренов Никита Евгеньевич — ассистент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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. EDN: SQZLWO

**TWO-CHANNEL OPTOELECTRONIC SYSTEM
FOR MONITORING THE RAILWAY RAILS**

V.Ya. Kolyuchkin
N.E. Marenov

vkoluch@bmstu.ru
marenov@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

Increase in the freight traffic volume and train speed requires creation of means for monitoring the railway track condition for timely detection of the defects. The paper describes operation principles of the high-speed precision equipment for operational monitoring straightness of the rolling surface with the railway rails, and provides an experimental assessment of the

Keywords

Railway rails, optoelectronic system, structured illumination, control, measurement, error

equipment error based on these principles. High performance of the monitoring procedure is ensured by registering the images of structured illumination in the rail cross-sections by the main channel linear camera. At the track-measuring car speed of 180 km/h, omissions of the short surface defects, including those in the form of the rail joints steps, are practically eliminated. The paper proposes a method for compensating for errors arising from the track-measuring car oscillations. The method is based on obtaining information on the car vertical oscillations in the additional channel that registers the rail head image displacement relative to the registering equipment installation base and using the monitoring system calibration. The paper describes a calibration technique for the two-channel optoelectronic system. Results of full-scale testing the prototype of an optoelectronic system for monitoring the railway rails straightness confirmed correctness of the technical solutions underlying it

Received 09.12.2024

Accepted 15.01.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Yanovskiy A.S. At the 139th Rail Commission in Tula. *Put i putevoe khozyaystvo* [Railway Track and Facilities], 2023, no. 11, pp. 5–7 (in Russ.). EDN: PTPSTS
- [2] Khvostik M.Yu., Khromov I.V., Bykova O.A., et al. Performance analysis of the working surface of the rails from test batches on the Test Loop of JSC “VNIIZhT”. *Vestnik VNIIZhT* [Russian Railway Science Journal], 2018, vol. 77, no. 3, pp. 141–148 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-141-148>
- [3] Falamarzi A., Moridpour S., Nazem M. A review on existing sensors and devices for inspecting railway infrastructure. *Jurnal Kejuruteraan*, 2019, vol. 31, no. 1, pp. 1–10. DOI: [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(1\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(1)-01)
- [4] Liu S., Wang Q., Luo Y. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry. *Transp. Saf. Environ.*, 2019, vol. 1, no. 3, pp. 185–204. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdz007>
- [5] Glazunov D.V. Diagnostic and technological methods for track reliability increase. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2019, no. 1, pp. 32–40 (in Russ.). EDN: PPGLYD
- [6] Nazarov D.G., Gura D.A. About systems automated traffic measurement control. *Nauchnye trudy KUBGTU* [Scientific Works of KUBSTU], 2019, no. 1, pp. 135–146 (in Russ.). EDN: POFXEN
- [7] Du C., Dutta S., Kurup P., et al. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sens. Actuat. A: Phys.*, 2020, vol. 303, art. 111728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111728>

- [8] Bondarev E.S. Forecasting the technical condition of rails based on statistical data. *Vestnik SGUPS*, 2021, no. 4, pp. 55–61 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_59_55
- [9] Kossov V.S., Krasnov O.G., Akashev M.G. The impact of deformation in the zone of welded joints on the force action of the rolling stock on the track. *Vestnik VNIIZhT* [Russian Railway Science Journal], 2020, vol. 79, no. 1, pp. 9–16 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-9-16>
- [10] Oostermeijer K.H. Review on short pitch rail corrugation studies. *Wear*, 2008, vol. 265, no. 9–10, pp. 1231–1237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.037>
- [11] Grassie S.L., Kalousek J. Rail corrugation: characteristics, causes and treatments. *Proc. Inst. Mech. Eng. F*, 1993, vol. 207, no. 1, pp. 57–68. DOI: https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1993_207_227_02
- [12] Wang Q.A., Huang X.Y., Wang J.F., et al. Concise historic overview of rail corrugation studies: from formation mechanisms to detection methods. *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 4, art. 968. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14040968>
- [13] Gazafrudi S.M.M., Younesian D., Torabi M. A high accuracy and high speed imaging and measurement system for rail corrugation inspection. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2021, vol. 68, no. 9, pp. 8894–8903. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3013748>
- [14] Torabi M., Mousavi G.S.M., Younesian D. A novel method for laser peak detection with subpixel accuracy for the rail corrugation measurement. *J. Sens.*, 2021, vol. 2021, no. 1, art. 6695674. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6695674>
- [15] Wang C., Zeng J. Combination-chord measurement of rail corrugation using triple-line structured-light vision: rectification and optimization. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2020, vol. 22, no. 11, pp. 7256–7265. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3004918>
- [16] Wang C., Liu H., Ma Z., et al. Dynamic inspection of rail wear via a three-step method: auxiliary plane establishment, self-calibration, and projecting. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 36143–36154. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2851572>
- [17] Kolyuchkin V.Ya., Marenov N.E., Egorov A.O. Optical electronic system for operational control of the railway rails straightness. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 3 (144), pp. 33–48 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-33-48>
- [18] Egorov A.O., Marenov N.E. Ustroystvo kontrolya profilya poverkhnosti protyazhennykh ob'ektov [Device for monitoring surface profile of extended objects]. Patent RU no. 2822859. Appl. 25.12.2023, publ. 15.07.2024 (in Russ.).
- [19] Kolyuchkin V.Ya., Marenov N.E. Estimation of error for the system for high-speed corrugation monitoring of rails. *Kontenant*, 2024, vol. 23, no. 1, pp. 30–39 (in Russ.). EDN: EVOKFF
- [20] Zhan P., Lee D.J., Beard R. Solving correspondence problems with 1D signal matching. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5608, pp. 207–217. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.572475>

Kolyuchkin V.Ya. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Marenov N.E. — Assistant, Department of Laser and Optoelectronic Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kolyuchkin V.Ya., Marenov N.E. Two-channel optoelectronic system for monitoring the railway rails. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 2 (151), pp. 19–34 (in Russ.). EDN: SQZLWO