

На правах рукописи

Щербаков Владимир Васильевич



Разработка и исследование комплекса технологических решений
автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта
железнодорожных путей

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Карпик Александр Петрович.

Официальные оппоненты:

Брынь Михаил Ярославович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Столбов Юрий Викторович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», профессор кафедры проектирования дорог;

Никитин Андрей Вячеславович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог».

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (г. Екатеринбург).

Защита состоится 22 декабря 2020 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»:

<https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/shcherbakov-vladimir-vasilevich/>

Автореферат разослан 1 октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Евгений Ильич Аврунев

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 18.09.20. Формат 60 × 84 1/16.
Печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 110.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В эпоху цифровой трансформации Российской Федерации рядом директивных государственных документов (Стратегия экономической безопасности Российской Федерации до 2030 г., Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», Стратегия национальной безопасности Российской Федерации, Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 г. и др.) и выступлениями Президента России ставятся задачи разработки и реализации отечественных прорывных технологий и технологий опережающего развития, в том числе принципиально новых, природоподобных и когнитивных. Цифровые технологии – одно из ключевых направлений трансформации ОАО «РЖД» и железнодорожных компаний. Цифровые проекты в отрасли направлены на оптимизацию всех основных направлений работы – инфраструктуры, перевозок, работу с подвижным составом. При этом самое важное место отводится обеспечению безопасности пассажирских и грузовых перевозок. Поэтому своевременные работы по реконструкции и ремонту железнодорожных путей являются важным этапом жизненного цикла железнодорожной отрасли, в которых все большую роль играет геодезическое информационное обеспечение на всех уровнях.

Новые технические и технологические возможности современной геодезии базируются на инновационных методах и средствах сбора и компьютерной обработки пространственных данных в связи с применением спутниковых технологий, электронных тахеометров, лазерного сканирования и дистанционного зондирования с использованием цифровых методов. Моделирование окружающего пространства стало осуществляться в цифровой форме с соблюдением требований компьютерного восприятия, пространственно-временной четырехмерности, совместимости и согласованности моделей разного масштаба и тематического назначения. В силу приведенных причин, требований и условий развивается новое комплексное направление, связанное с применением современных геоин-

формационных методов с целью получения и использования геопространственной информации об инфраструктуре железнодорожной отрасли всех иерархических уровней для решения задач в рамках программы «Цифровая железная дорога». Поэтому разработка и исследование комплекса технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей являются актуальной и своевременной задачей цифровизации железнодорожной отрасли в рамках программы «Цифровая железная дорога».

Ключевую роль при этом играет автоматизация геодезического обеспечения, что позволит повысить производительность и качество работ за счет автоматизации и управления строительными процессами, например, балластировкой пути при реконструкции и ремонте железнодорожного пути. Такой подход к геодезическому обеспечению строительных процессов достигается за счет автоматизации систем управления строительными дорожными машинами (бульдозером, автогрейдером), а также железнодорожными строительными и специальными машинами: электробалластером (ЭЛБ), выправочно-подбивочно-рихтовочной машиной (ВПО), щебнеочистительной машиной (ЩОМ), которые позволяют сократить затраты на выполнение комплекса работ, включая создание опорной геодезической сети, разбивочные работы, операционный контроль, исполнительные съемки и другие процессы.

Разработка систем автоматизированного управления (САУ) строительной дорожной и железнодорожной техникой с использованием геодезических средств и методов является актуальной задачей. Создание программных комплексов для обеспечения работы САУ, включая цифровые проекты, преобразование систем координат проекта в системы координат, структуру и форматы данных САУ, взаимодействие с другими машинами, оборудованными штатными системами управления, традиционно применяющимися на железной дороге, – также одна из важнейших и актуальных задач.

Кроме того, в настоящее время отсутствует нормативная база применения систем автоматизированного управления, а также САУ по двум и трем координатам (параметрам), соответственно САУ-2D, САУ-3D, включая регламенты, СП, ГОСТ.

Отсутствуют систематизация и классификация САУ по функциональным возможностям, принципу работы, характеристикам и параметрам, связанным с точностью, типом цифровых проектов, включающих проектные цифровые поверхности, ось железнодорожного пути, проектные сечения в плане и профиле. Структуры и форматы данных для САУ не унифицированы и различаются практически у всех разработчиков САУ, что вносит ограничения на создание и реализацию цифровых проектов.

Степень разработанности темы. Автоматизация – одно из приоритетных направлений в геодезии, особенно в последнее время с учетом новых возможностей развития измерительной и вычислительной техники. Средства и методы геодезического обеспечения автоматизации технологических процессов разрабатывались и ранее, внимание уделялось автоматизации отдельных видов измерений при мониторинге, контроле состояния инженерных объектов, измерении деформаций зданий и сооружений, мониторинге устойчивости отдельных конструкций и инженерных сооружений. Значительный вклад в развитие теории и методов внесли Уставич Г. А., Хорошилов В. С., Столбов Ю. В., Брынь М. Я., Коугия В. А., Никитин А. В., Васютинский И. Ю., Лютц А. Ф., Матвеев С. И., Ямбаев Х. К., Gross P., Blewitt G., Langley R., Leick A., Teunissen P.

Развитие геоинформационного обеспечения, методов создания цифровых проектов, моделей пространственных объектов, создание систем координат, структуры и форматов данных для САУ и их преобразование рассмотрены в научных трудах Карпика А. П., Бойкова В. Н., Величко Г. В., Скворцова А. В., Пospelова В. И., Круглова В. М., Левина К. М., Оккермана Г. Л., Ермакова В. М.

При этом исследования и разработки в области автоматизации геодезического обеспечения ремонта и реконструкции железных дорог с использованием ГНСС-технологий, лазерной, гироскопической и вычислительной техники обеспечили новые возможности, включая разработку новых систем автоматизированного управления строительной техникой на базе геодезических методов, создание цифровых проектов для САУ. Исследования по данной теме позволят автоматизи-

зировать геодезические измерения и отдельные строительные процессы при проведении ремонта и реконструкции железнодорожных путей. В основе реализации поставленных задач лежит разработка САУ для железнодорожных строительных машин, использование ГИС, ГНСС для создания цифровых проектов (ЦП) вместо традиционных проектов на участок ремонта и реконструкции железнодорожного пути. Автоматизация строительных процессов на железной дороге на этапе вырезки балласта, балластировки, постановки пути в проектное положение и других работ позволит минимизировать разбивочные работы и сократить объем работ при создании опорной геодезической сети, операционного контроля и исключить инструментальный (с использованием нивелира и теодолита) контроль строительно-монтажных работ, например, при уплотнении и вырезке балласта, постановке пути в проектное положение. Поэтому приоритетным направлением при разработке технических решений по автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей является автоматизация строительных процессов (управления строительной техникой), так как это более высокий уровень автоматизации геодезического обеспечения и ремонта в целом по отношению к автоматизации геодезических измерений в процессе геодезического сопровождения на различных этапах строительства.

Цели и задачи исследования. Целью работы являются разработка и исследование комплекса технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- выполнить анализ современного состояния геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей;
- разработать теоретическое обоснование, методику и средства измерений для создания цифровых проектов реконструкции и ремонта железнодорожных путей в соответствии с технологическим процессом на реконструкцию и ремонт;
- разработать технологические и технические решения по автоматизации геодезического обеспечения ремонта и реконструкции железнодорожных путей, включая способ, принципиальную схему и устройство системы автоматизиро-

ванного управления для комплекса железнодорожных строительных машин, обеспечивающих технологический процесс ремонта и реконструкции железнодорожных путей;

– разработать теоретически обоснованные нормативные требования для геодезического автоматизированного обеспечения ремонта и реконструкции железнодорожных путей с использованием ГНСС и измерительных средств на их базе;

– внедрить комплекс технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей на сети железных дорог ОАО «РЖД».

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является геодезическое обеспечение ремонта и реконструкции железнодорожных путей.

Предмет исследования – разработка и исследование комплекса технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработан комплекс технических и технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей, включая средства измерений для создания цифрового проекта и реализации проектных решений реконструкции и ремонта железнодорожных путей с использованием САУ на базе геодезических методов, отличающихся тем, что геометрические параметры жестко связаны с пространственными данными и рассчитываются по текущим координатам рельсовой колеи, а проектные сдвиги и подъемки (рихтовки) используются как величины редукции пространственного положения оси пути и геометрических параметров в цифровом проекте;

– предложены технологические и технические решения по автоматизации геодезического обеспечения ремонта и реконструкции железнодорожных путей, включая способ, принципиальную схему и устройство системы автоматизированного управления для комплекса железнодорожных строительных машин, отличающиеся тем, что они позволяют полностью автоматизировать управление технологическим процессом реконструкции и ремонта железнодорожных путей

без участия человека при постановке пути в проектное положение, контролировать вырезку и уплотнение балласта, передавать данные в диспетчерский центр и создавать базу данных для оценки качества ремонта.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании оптимальных технических и технологических решений автоматизации геодезического обеспечения, включающих способ и методику создания цифровых проектов для обеспечения работы САУ, разработку способа, принципиальной схемы и устройства САУ для комплекса железнодорожных строительных машин и нормативно-методическую базу для регламентирования работы САУ на железных дорогах.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный в диссертации комплекс технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей доведен до практической реализации на сети железных дорог ОАО «РЖД» и «КТЖ» Республики Казахстан. Это позволило автоматизировать многие процессы при ремонте и реконструкции железнодорожного пути, сократить время выполнения работ, значительно повысить безопасность выполнения работ за счет цифровизации основных производственных этапов, повысить надежность полученных результатов и увеличить производительность труда в 4–5 раз.

Методология и методы исследования основаны на системном анализе, моделировании теории математической обработки результатов измерений. Решение поставленных задач базировалось на использовании математического моделирования, системного анализа и синтеза, сравнения, обобщений и оценок с привлечением методов интегрального исчисления, численных методов и теории интерпретации полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

– требования к созданию цифровой модели пути как основы цифровых проектов и автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта с использованием систем автоматизированного управления строительной техникой;

– технологические решения создания цифровых проектов для автоматизированного управления строительной железнодорожной техникой в соответствии с технологическими процессами при ремонте и реконструкции железнодорожного пути;

– технические и методические решения по разработке схем и устройств систем автоматизированного управления строительной железнодорожной техникой для расширения функциональных возможностей САУ по вырезке балласта, выправке пути и решения других задач по геодезическим данным;

– решения по формированию нормативных требований для геодезического автоматизированного обеспечения работы на объектах ремонта и реконструкции железнодорожного пути с использованием САУ, ГНСС и разработанных систем.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует областям исследований: 4 – Разработка новых принципов, методов, технических средств и технологий геодезических измерений для определения геометрических и физических параметров Земли, ее поверхности, объектов, явлений и процессов на ней, в том числе для производства наземных топографических съемок; 5 – Методы, технические средства и технологии геодезического обеспечения строительно-монтажных, кадастровых, землеустроительных, проектно-изыскательских, маркшейдерских, геолого-разведочных и лесоустроительных работ; освоения шельфа; монтажа, юстировки и эксплуатации технологического оборудования; 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов исследований. Основные результаты исследований, концептуально-теоретические положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: на II Международной научно-практической конференции «Спутниковые техноло-

гии на службе железнодорожного транспорта» (24 июля 2008 г., г. Москва); на Международной научно-практической конференции (13 октября 2010 г., г. Санкт-Петербург); на VIII Международной научно-практической конференции «Телекоммуникационные, информационные и логистические технологии на транспорте» (19–21 апреля 2011 г., г. Ростов-на-Дону; на Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию СГУПС «Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе» (28–29 ноября 2012 г., г. Новосибирск); на Международной научно-практической конференции «Роль путевого хозяйства в инфраструктуре железнодорожного транспорта» (2012 г., г. Москва); на VIII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012» (17–19 апреля 2012 г., г. Новосибирск); на IX Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013» (24–26 апреля 2013 г., г. Новосибирск); на XI Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015» (13–25 апреля 2015 г., г. Новосибирск); на XIII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017» (23–27 апреля 2017 г., г. Новосибирск); на XIV Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018» (25–27 апреля 2018 г., г. Новосибирск); на XV Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019» (24–26 апреля 2019 г., г. Новосибирск); на Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика» (19–20 октября 2017 г., г. Новосибирск); на XLI Международной научно-практической конференции Казахской академии транспорта им. М. Тынышпаева «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» (3–4 апреля 2017 г., Республика Казахстан, г. Алма-Ата). Результаты исследований по разработке методов создания цифровых проектов, систем автоматизированного управления строительной техникой и инструментальной проверке станционных путей внедрены на сети железных дорог ОАО «РЖД» в рамках реализации инвестиционных проектов и хозяйственных договоров НИЛ: «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» на Октябрьской железной дороге, № 20-10/1828/ДС 2 от 11.01.2010; на Западно-Сибирской железной дороге (ЗСЖД), № Д-210/ЦДРП от 29.08.2014; на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД), № 1636074 от 06.10.2015; на Забайкальской железной дороге (ЗабЖД), № 2112299 от 25.10.2016; в Республике Казах-

стан (КТЖ), в инжиниринговом центре «Ямал», обслуживающем железную дорогу Лобьтнанги – Бованенково, и на других предприятиях промышленного железнодорожного транспорта (ППЖТ).

Результаты исследований внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» для специальности «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей».

За заслуги в области транспорта и многолетнюю добросовестную работу Указом Президента Российской Федерации от 30.03.2020 автору присвоено почетное звание «Заслуженный работник транспорта Российской Федерации».

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 26 научных публикациях, из них 11 – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 9 – патентов РФ на изобретения и 3 статьи – в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 211 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 179 наименований, содержит 20 таблиц и 98 рисунков, четыре приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, показана степень проработанности проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации и адаптации результатов работы, ее структура и научные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе выполнен анализ современного состояния и практического опыта геодезического обеспечения ремонта, реконструкции железнодорожных путей, применения на железных дорогах систем управления строительной техникой, включая системы, в основе которых лежат геодезические методы, способы автоматизации геодезического обеспечения, а также специфика автоматизации геодезического обеспечения при ремонте и реконструкции железных дорог.

Анализ результатов исследований показал, что при большом объеме теоретических материалов, включая отечественные исследования по автоматизации геодезического обеспечения в целом, недостаточно проработаны вопросы разработки и использования САУ, в том числе для управления строительной техникой на железных дорогах. Существующие отечественные разработки систем автоматизированного геодезического обеспечения для железных дорог не позволяют применять САУ при выполнении трудоемких строительных процессов. При этом постановка пути в проектное положение выполняется традиционными методами с использованием разбивочных геодезических работ и «ручного управления» строительными машинами. На автомобильных дорогах в качестве автоматизированной системы широко применяются копировальные струны. Как показали результаты исследований, на железных дорогах Российской Федерации (РФ) копировальные струны не используются из-за большого объема геодезических разбивочных работ и трудоемкости при подготовке к постановке пути в проектное положение в условиях ограниченного времени «окна» и регламента технологического процесса на ремонт, в то же время в Германии этот метод применяется и является эффективным.

Автоматизация геодезических работ с использованием ГНСС, электронных тахеометров и лазерного сканирования позволяет повысить производительность только геодезических работ, что не обеспечивает автоматизацию строительных процессов на каждом технологическом этапе. Для получения максимального эффекта предложено использовать геодезические методы для автоматизации технологических процессов, включая планировочные работы, вырезку и очистку щебня, балластировку, постановку пути в проектное положение. Для этого необ-

ходимо создать единую координатную среду для всех строительных машин, разработать средства измерений для автоматизации получения исходных данных и управления строительными процессами, а также методику создания цифровых проектов на ремонт с использованием САУ.

Во втором разделе приведены результаты теоретического обоснования, исследований технических и методических решений по созданию цифровых проектов для автоматизации технологических процессов при реконструкции и ремонте железнодорожных путей.

Автоматизация технологических процессов – это комплексная задача и одним из основных направлений при автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта является создание цифровых моделей пути (ЦМП) и на их основе – цифровых проектов. Автором разработаны теоретические основы создания цифровой модели пути и цифровых проектов, включающие требования к цифровым моделям пути и цифровым проектам.

Цифровая модель пути должна обеспечивать:

- цифровое представление пространственного положения объектов инфраструктуры железнодорожного пути;
- жесткую связь пространственного положения пути в глобальных координатах, например, WGS-84, с локальными (местными) системами координат, включая линейные системы координат (Км + ПК + м);
- создание единой координатной среды для всех потребителей информации на железной дороге;
- обеспечение единства измерений для различных средств и методов измерений;
- создание баз данных (БД) с широкими функциональными возможностями по трансформации данных, их преобразованию и формированию заданий (проектов), контролю за их исполнением, включая режим реального времени в удобной для работы системе координат.

Для создания ЦМП с учетом приведенных требований необходимо иметь пространственные данные инфраструктуры и геометрические параметры железных дорог.

Создание и исследования средств и методов для автоматизации получения исходной информации о пространственных данных и геометрических параметрах железной дороги и элементов верхнего строения пути. Для определения пространственных данных железнодорожного пути и геометрических параметров рельсовой колеи предложен инерциальный метод, основанный на измерении ускорений по трем осям, ориентированным в пространстве. Метод широко применяется в комплексных системах навигации, беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), системах лазерного сканирования, системах автоматизированного управления и системах геодезического спутникового оборудования для фильтрации и расширения функциональных возможностей. Расчет координат выполняется по формуле

$$\begin{cases} x = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t w_x d^2t + v_{x_0} (t - t_0) + x_0, \\ y = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t w_y d^2t + v_{y_0} (t - t_0) + y_0, \\ z = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t w_z d^2t + v_{z_0} (t - t_0) + z_0, \end{cases} \quad (1)$$

где w_x, w_y, w_z – ускорения точки вдоль осей X, Y, Z; $v_{x_0}, v_{y_0}, v_{z_0}$ – начальная скорость движения носителя на момент времени t_0 соответственно по осям X, Y, Z; x_0, y_0, z_0 – начальные значения перемещений носителя вдоль каждой оси координат на момент времени t_0 .

Создание опытного образца и его исследования показали, что инерциальные системы, соответствующие требованиям определения геометрии рельсовой колеи, – дорогостоящие и требуют сложных настроек и калибровки, а более дешевые не соответствуют требованиям к точности определения геометрии рельсовой колеи для мобильных портативных средств измерения. Инерциальные системы для определения пространственных данных и геометрии рельсовой колеи: TachyRail фирмы «GEO-METRIKAG» (Германия); Swisstrolleys фирмы «Terra Vermessungenag» (Швейцария); GRPSystemFX фирмы «Amberg Technologies» (Швейцария) – широко применяются в путеизмерительных комплексах, включающих также спутниковое

оборудование или тахеометры с автоматизированной следящей системой. Ограниченное применение данных измерительных средств в России обусловлено несоответствием отчетных форматов стандартам и методике расчетов геометрии рельсовой колеи в ОАО «РЖД».

В результате исследований автором разработан, запатентован и внесен в Реестр средств измерения РФ эффективный способ и измерительная система определения геометрии рельсовой колеи на базе гироскопической техники. В основе способа лежит интегрирование приращения курсового угла и угла наклона подвижного объекта по расстоянию, что обеспечивает определение текущих координат подвижного объекта по одной из рельсовых нитей по формулам

$$\begin{cases} X_{i(\text{изм})} = X_0 + \sum_1^n \cos \alpha \cdot l, \\ Y_{i(\text{изм})} = Y_0 + \sum_1^n \sin \alpha \cdot l, \\ H_{i(\text{изм})} = H_0 + \sum_1^n \sin \varphi \cdot l, \end{cases} \quad (2)$$

где X_0, Y_0, H_0 – начальные (исходные) координаты; α – курсовой угол; φ – продольный уклон; l – шаг измерений; 1 – номер точки.

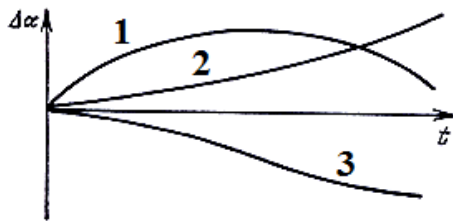
Координаты второй рельсовой нити $X'_{i(\text{изм})}, Y'_{i(\text{изм})}, H'_{i(\text{изм})}$ определяются по координатам первой рельсовой нити, курсовому углу, поперечному наклону (превышению между рельсовыми нитями) и ширине колеи в соответствии с формулами

$$\begin{cases} X'_{i(\text{изм})} = X_{i(\text{изм})} + \sum_1^n \cos(\alpha + 90) \cdot l_{\text{ш}}, \\ Y'_{i(\text{изм})} = Y_{i(\text{изм})} + \sum_1^n \sin(\alpha + 90) \cdot l_{\text{ш}}, \\ H'_{i(\text{изм})} = H_{i(\text{изм})} + \sum_1^n \sin \gamma \cdot l_{\text{ш}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $X_{i(\text{изм})}, Y_{i(\text{изм})}, H_{i(\text{изм})}$ – текущие координаты первой рельсовой нити; $l_{\text{ш}}$ – ширина колеи; 1 – номер точки.

Точность определения координат в данном способе зависит от «ухода» оси гироскопа значительно меньше по сравнению с инерциальными методами с двойным интегрированием (см. формулы (1)), при этом уход оси гироскопа так же, как и для инерциальных систем, является одним из основных факторов, влияющих на точность определения координат. Этот фактор необходимо учитывать для определения геометрии рельсовой колеи и контролировать стабильность скорости ухода оси гироскопа.

На рисунке 1 показаны графики ухода оси гироскопа, из которых видно, что уход оси гироскопа, полученный из нескольких циклов измерений, значительно изменяется с течением времени, при этом на коротких временных интервалах ($t_i = 5$ мин), как показывают исследования (для оптоволоконных гироскопов), изменения являются минимальными, не влияющими на точность определения геометрических параметров, для других типов гироскопов интервалы отличаются, например, для лазерных гироскопов интервалы t_i могут составлять 0,5 часа, при этом их стоимость в 12–15 раз выше.



1, 2, 3 – график ухода оси гироскопа из трех циклов измерений

Рисунок 1 – График ухода оси гироскопа

Уход оси гироскопа определяется по формуле

$$\Delta\alpha_{(t)} = Et, \quad (4)$$

где E – скорость ухода оси гироскопа; t – время.

Зная (допустимую) скорость ухода E оси гироскопа, можно определить интервал времени между калибровками гироскопов для обеспечения расчетной точности определения геометрических параметров. Погрешность, обусловленная уходом оси гироскопа, рассчитывается по формуле

$$m_{s(i)} = \frac{\Delta\alpha}{2} \cdot S_i, \quad (5)$$

где $m_{s(i)}$ – погрешность определения координат, обусловленная уходом оси гироскопа; S_i – отрезок пути при равномерном движении.

Из рисунка 1 видно, что скорость ухода изменяется, в разных циклах измерения величина и амплитуда ухода также значительно отличаются. Учесть такие изменения можно путем комплексирования с другими средствами измерения. Для повышения точности определения координат в предлагаемом техническом решении разработана система комплексирования гиросистемы (ГС) с приемниками позиционирования ГНСС. Для инерциальных систем существует несколько технических решений, основанных на применении фильтра Калмана. Сущность предлагаемых технических решений заключается в фильтрации низкочастотных (ГС) и высокочастотных (приемник ГНСС) составляющих погрешности. На рисунке 2 показана структурная схема фильтрации. Погрешность определения координат спутниковым приемником складывается из двух составляющих: статической и динамической, при этом каждая из составляющих погрешностей зависит от десятков различных внешних и внутренних факторов, характерных для ГНСС, например, связанных с геометрическим фактором или с качеством дифференциальных поправок

$$\Delta p_{(t)} = d + m \sin(nt), \quad (6)$$

где $\Delta p_{(t)}$ – погрешность определения текущих координат подвижного объекта; d – систематическая составляющая погрешности; $m \sin(nt)$ – высокочастотная динамическая составляющая погрешности; m – амплитуда; n – частота колебаний.

Погрешность измерения координат гироскопической системой, построенной по схеме счисления пути, зависит в основном от ухода оси гироскопа, кото-

рый определяется по формуле (4) и внешних факторов, например, траектории движения, и внутренних факторов, например (для оптоволоконных гироскопов), от изменения температуры.

Фильтрация выполняется с учетом составляющих погрешностей измерительных средств, приведенных в формулах (4) и (6), в соответствии с формулой

$$y = (w_1 + w_2)x + w_1\Delta\alpha + w_2\Delta p, \quad (7)$$

где w_1 и w_2 – функции фильтров; x – полезный сигнал; y – значения на выходе фильтра.

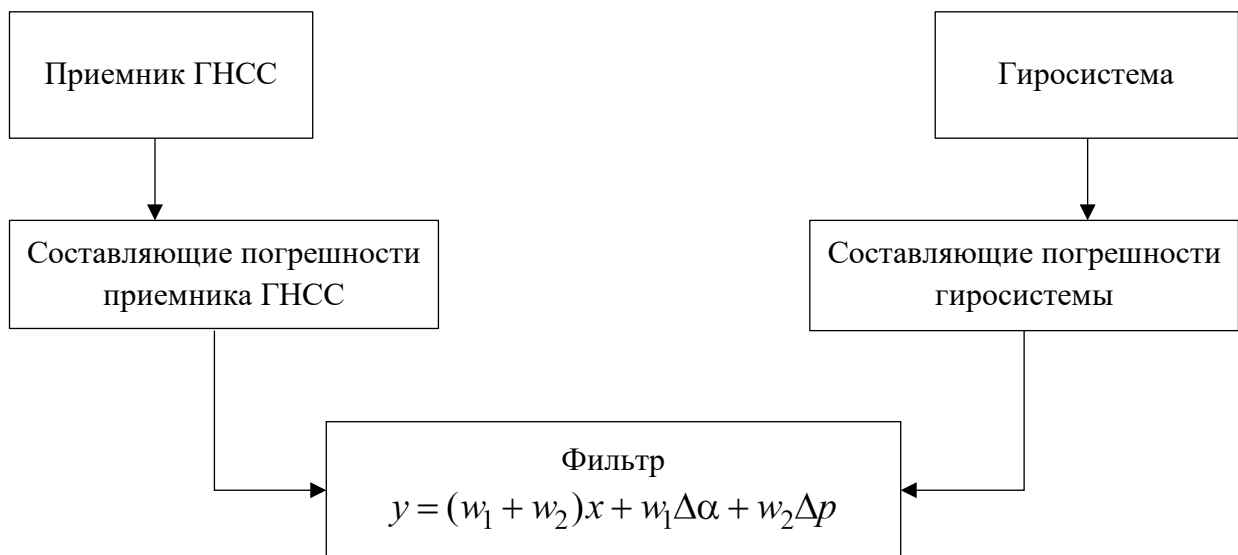


Рисунок 2 – Структурная схема фильтрации в комплексированной системе определения координат

Для сглаживания данных использован сглаживающий фильтр Хэппинга скользящего среднего по трем точкам ряда, при этом интервал между i точками определяется с учетом специфики железных дорог (кривизна пути в плане и профиле)

$$\bar{X}_i = (0,25_{X_{i-1}} + 0,5_{X_i} + 0,25_{X_{i+1}}). \quad (8)$$

С учетом практической реализации использовался фильтр с общим множителем

$$\bar{X}_i = \frac{1}{4}(X_{i-1} + 2X_i + X_{i+1}), \quad (9)$$

где i – порядковый номер; \bar{X}_i – значение скользящего среднего для порядкового номера i ; X_i – фактическое значение в интервале сглаживания.

В результате фильтрации и сглаживания погрешность уменьшается в 8 раз, полностью исключаются грубые погрешности, а взаимное положение смежных точек в треке обеспечивает определение геометрических параметров рельсовой колеи с приемлемой (нормативной) точностью на хордах, ограниченных стандартной длиной до 20 м и более. Таким образом, в основе автоматизации геодезического обеспечения лежит комплексирование гироскопической системы и ГНСС, при этом инерциальные системы заменены на более дешевые гироскопические системы собственной разработки, созданные на базе оптоволоконных датчиков вращения путем реализации схемы счисления пути. Для обработки данных применяются методы фильтрации и сглаживания.

Общий вид автоматизированной системы для создания ЦМП показан на рисунке 3, а структурная схема приведена на рисунке 4.

Геометрические параметры рельсовой колеи (ширина колеи, возвышение рельса, рихтовка, просадка) с использованием координатных методов определяются по соответствующим алгоритмам.



Рисунок 3 – АПК «Профиль»

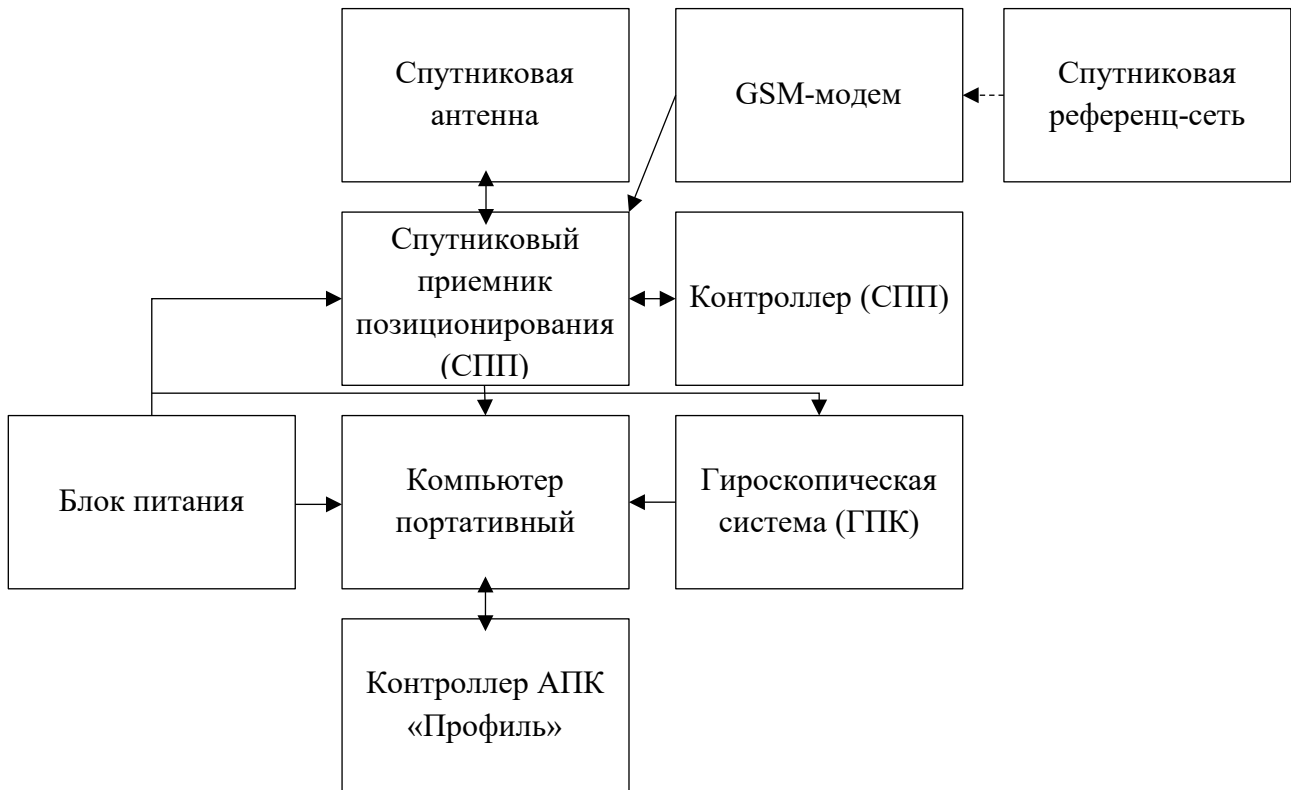


Рисунок 4 – Структурная схема АПК «Профиль»

При расчете геометрических параметров учитываются десятки нормативных требований, например, ширина колеи (рисунок 5) определяется в сечении ниже на 13 мм поверхности катания головки рельса, по следующим формулам (что обеспечивается за счет конструкции ходовой тележки):

$$\begin{cases} \Delta X = X_2 - X_1, \\ \Delta Y = Y_2 - Y_1, \\ \Delta H = H_2 - H_1, \end{cases} \quad (10)$$

$$l = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta H^2}, \quad (11)$$

где l – ширина колеи; $X_1, Y_1, H_1, X_2, Y_2, H_2$ – координаты первой и второй рельсовых нитей.

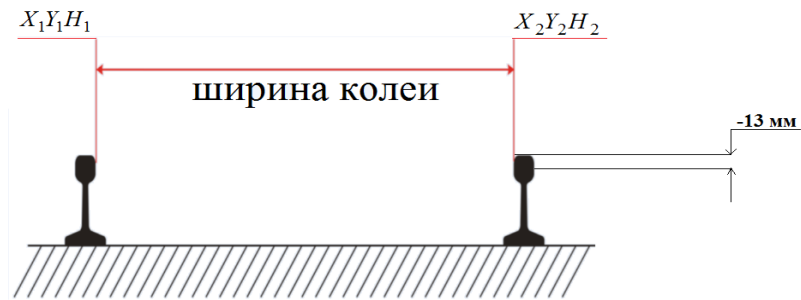


Рисунок 5 – Схема измерения ширины колеи

Возвышение рельса (уровень) ΔH определяется по формуле относительно поверхности катания головки рельса

$$\Delta H = H_2 - H_1. \quad (12)$$

Схема определения приведена на рисунке 6.

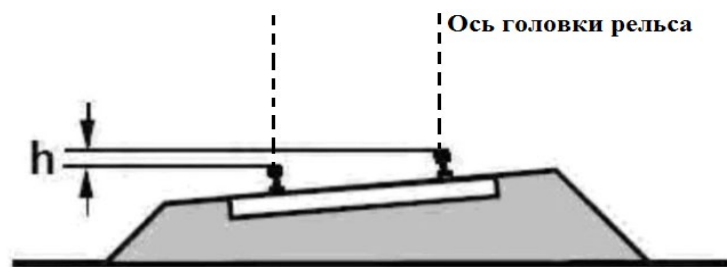


Рисунок 6 – Схема определения возвышения рельса

Положение рельсовых нитей в вертикальной плоскости (просадка) определяется по формулам

$$H_B = \frac{H_{i-1} + H_{i+1}}{2}, \quad (13)$$

$$\Delta H' = H_B - H_i, \quad (14)$$

где $\Delta H'$ – амплитуда рельсовой нити (просадка) в вертикальной плоскости на длине хорды $(i - 1) - (i + 1)$; H_i , H_{i-1} , H_{i+1} – высотные отметки в i -х точках пути; H_B – средняя высотная отметка на хорде $(i - 1) - (i + 1)$.

Схема определения приведена на рисунке 7.

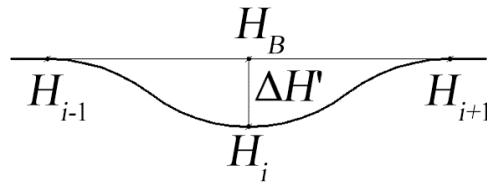


Рисунок 7 – Схема расчета неровностей рельсовой колеи в вертикальной плоскости (просадки в стандарте ЦП 515)

Положение рельсовых нитей в горизонтальной плоскости (рихтовка) определяется по формулам

$$\begin{cases} X_B = \frac{X_{i-1} + X_{i+1}}{2}, \\ Y_B = \frac{Y_{i-1} + Y_{i+1}}{2}, \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Delta X' = X_i - X_B, \\ \Delta Y' = Y_i - Y_B, \end{cases} \quad (16)$$

$$\delta = \sqrt{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2}, \quad (17)$$

где δ – амплитуда рельсовой нити в плане (рихтовка) в i -й точке на хорде $(i - 1) - (i + 1)$.

Схема определения рихтовки приведена на рисунке 8.

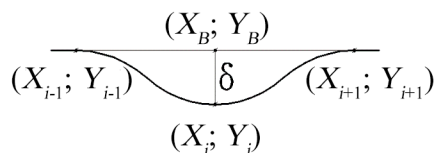
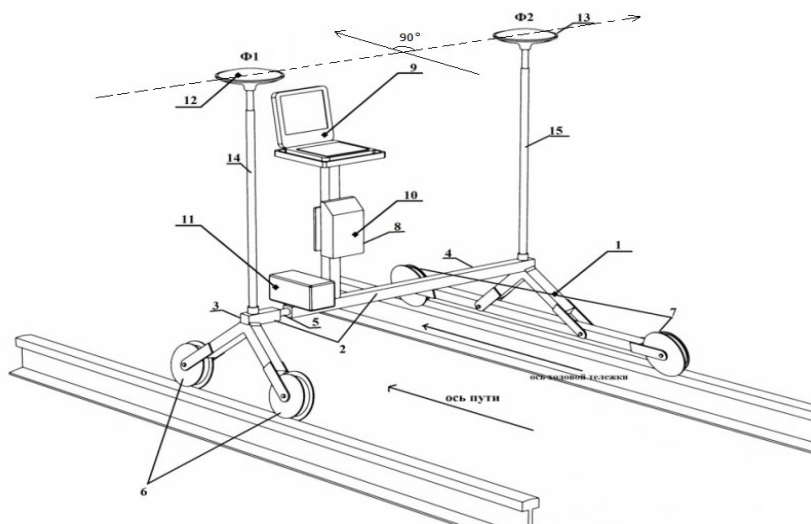


Рисунок 8 – Схема расчета неровностей рельсовой колеи в горизонтальной плоскости (рихтовка в стандарте ЦП 515)

Для обеспечения специфики (определение пространственных данных и геометрических параметров в САУ в реальном времени) при реконструкции и капитальном ремонте железнодорожных путей разработана система, в основе которой лежат только пространственные данные, полученные приемниками ГНСС специальной конструкции – аппаратно-программного комплекса (АПК) «Профиль-М» (рисунок 9).



- 1 – ходовая тележка; 2 – рама; 3 – подвижная направляющая;
 4 – неподвижная направляющая рамы; 5 – возвратно-пружинный механизм;
 6 – колеса специальной конструкции на подвижной направляющей;
 7 – колеса специальной конструкции на неподвижной части рамы; 8 – штанга;
 9 – полевой компьютер; 10 – спутниковый приемник; 11 – блок питания;
 12 – спутниковая антенна 1; 13 – спутниковая антенна 2;
 14 – штанга спутниковой антенны 1; 15 – штанга спутниковой антенны 2

Рисунок 9 – Кинематическая схема аппаратно-программного комплекса АПК «Профиль-М»

Основные блоки устройства АПК «Профиль-М» включают ходовую тележку 1 специальной конструкции; спутниковый приемник ГНСС 10 с двумя антеннами 12 и 13; позволяющими синхронно измерять координаты и приращения координат между антеннами с высокой точностью; компьютер 9, блок питания и устройство стабилизации 11. Сущность работы АПК «Профиль-М» заключается в измерении координат по двум антеннам и приращений координат между ними с высокой точ-

ностью в 15 раз выше по отношению к пространственным координатам относительно спутниковой референц-сети, что обеспечивает высокую точность взаимного положения фазовых центров антенн и определения геометрии рельсовой колеи. Для определения геометрии рельсовой колеи кинематическая схема ходовой тележки обеспечивает при движении параллельность вектора движения тележки и оси железнодорожного пути, а ось, проходящая через фазовые центры антенн, должна быть перпендикулярна оси железнодорожного пути. При нулевых угловых рассогласованиях осей от заданных угловых величин обеспечивается определение геометрических параметров рельсовой колеи в соответствии с нормативными требованиями. На рисунке 10 показана структурная схема обработки данных АПК «Профиль», включающая комплект программных продуктов и методического обеспечения.

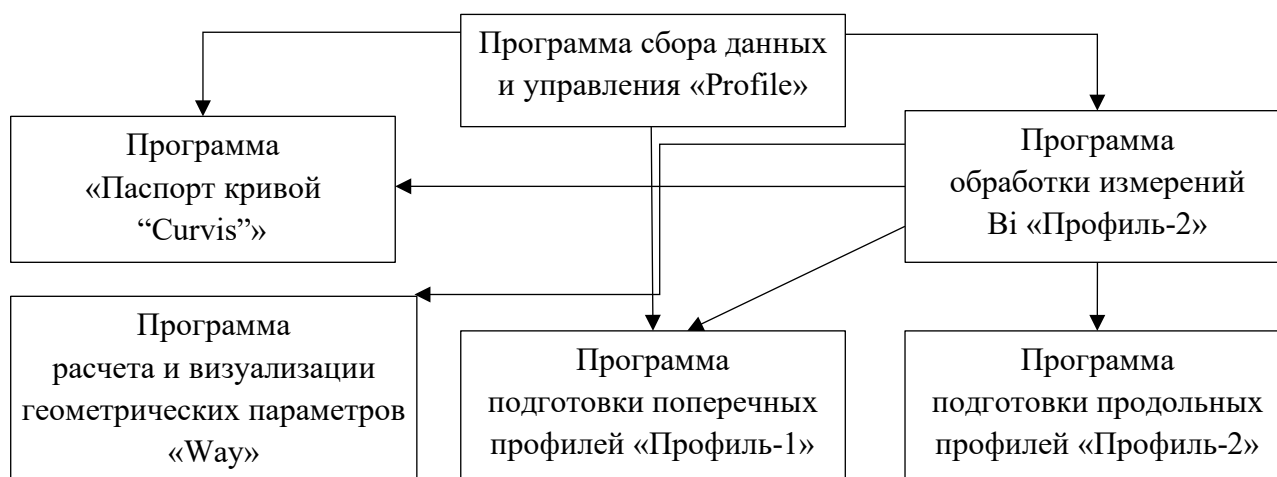
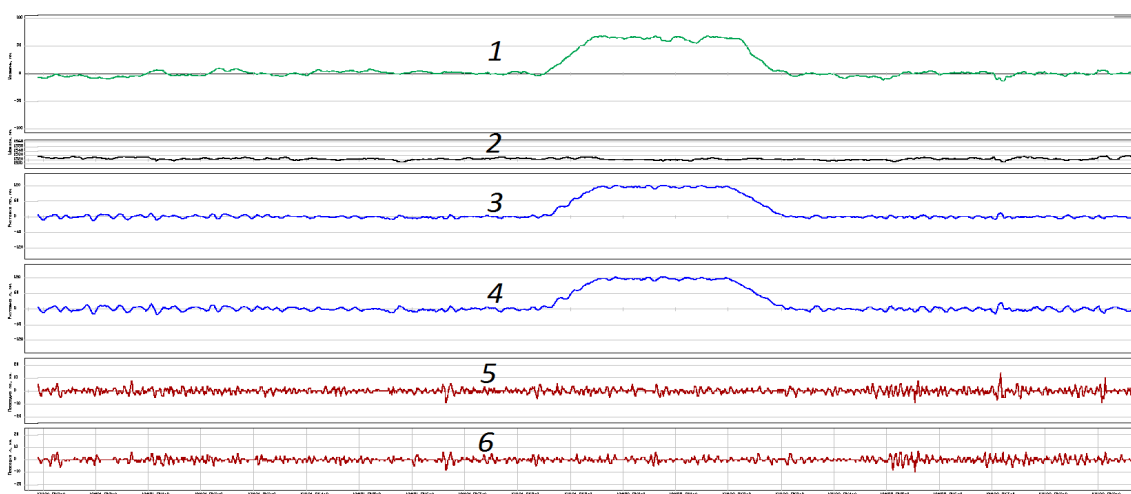


Рисунок 10 – Структурная схема программного обеспечения
АПК «Профиль»

Программное обеспечение (ПО) «Profile» предназначено для управления работой и сбором информации АПК «Профиль»; ПО «Curvis» – предназначено для расчета по пространственным данным параметров кривой и их визуализации в формате ФП-5; ПО Vi «Профиль-2» – для подготовки данных с целью построения продольного профиля с использованием ПО «Профиль-2»; ПО «Way» – для расчета и визуализации геометрических параметров в соответствии с требованиями ин-

струкции ЦП-515; ПО «Профиль-1» – для подготовки данных с целью построения поперечных профилей. Комплекс ПО полностью обеспечивает пространственными данными и геометрическими параметрами создание цифровых проектов с требуемой точностью согласно стандартам ОАО «РЖД». Геометрические параметры и пространственные данные жестко связаны и являются исходными данными для создания цифровых проектов САУ-3D. Пример определения геометрических параметров с использованием программного обеспечения АПК «Профиль» по формулам (9)–(16) показан на рисунке 11.



- 1 – возвышение рельса (уровень); 2 – ширина колеи (шаблон);
 3, 4 – положение правой и левой рельсовых нитей в плане (рихтовка);
 5, 6 – положение правой и левой рельсовых нитей в вертикальной плоскости (просадка)

Рисунок 11 – Графики геометрических параметров рельсовой колеи в стандарте ЦП-515, полученных АПК «Профиль»

Пример расчета и визуализации данных АПК «Профиль» для железнодорожной кривой показан на рисунке 12.

Разработанный алгоритм для расчетов позволяет определять около 20 параметров кривой в стандартах ОАО «РЖД» (радиус минимальный и максимальный, средний радиус, длину переходных и круговой кривой, непогашенное ускорение и др.). В основе способа лежит расчет стрел изгиба по пространственным данным, обеспечивающий высокую точность и детализацию параметров, включая нормированную

величину смежных стрел изгиба, являющуюся одной из нормативных характеристик (инструкция ЦП 515) при оценке геометрических параметров рельсовой колеи.

В таблице 1 приведены технические характеристики АПК «Профиль».

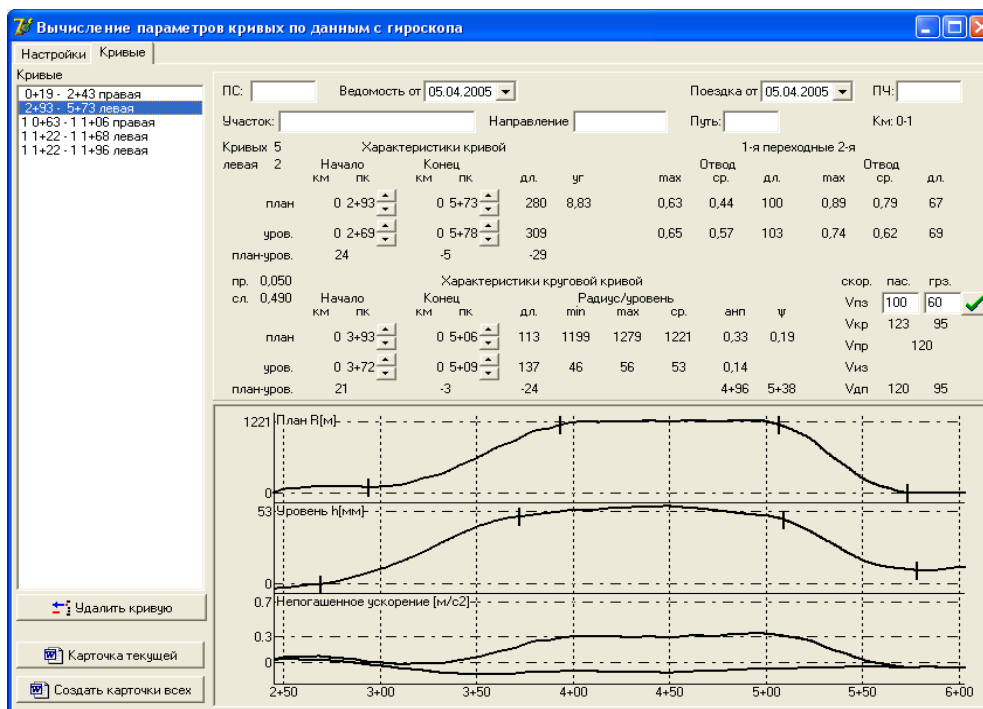


Рисунок 12 – Структура данных карточки кривой формы ФП-5, созданной ПК «Curvis»

Таблица 1 – Технические характеристики АПК «Профиль»

Наименование параметра	Параметры	
	диапазон измерения	погрешность измерения
Координаты	25 кмD*	10 мм + 1 ммD
Расстояние	25 кмD*	± 0,01 %
Высота	25 кмD*	20 мм+1 ммD
Ширина колеи	1 505–1 560 мм	± 1 мм
Уровень	0–300 мм	± 1 мм
Рихтовка	± 160 мм	± 1 мм
Просадка	± 50 мм	± 1 мм

D* – расстояние до базовой станции

Методика и программа испытаний для исследований и метрологической аттестации АПК «Профиль» разработаны с участием СНИИМ (г. Новосибирск). Всего в процессе метрологической аттестации для оценки точности и определения других характеристик выполнено около 50 км измерений на эталонном участке пути Ново-

сибирск – Пашино. В таблице 1 приведены технические характеристики, полученные при аттестации АПК «Профиль». Для настроек и калибровки АПК «Профиль» разработан стенд-имитатор рельсовой колеи СИРК (Госреестр средств измерения № 29465-05). Технические характеристики обеспечивают нормативные требования ОАО «РЖД» по геометрическим параметрам, а также пространственным данным, жестко связанным с геометрическими параметрами, что принципиально изменило функциональные возможности по определению длинных неровностей на длинах хорд более 20 м. Методически это обеспечивается за счет изменения длины измерительной базы, которая выбирается с заданным шагом. Традиционные методы (не геодезические) на железных дорогах таких функциональных возможностей не имеют. Принципиально важной особенностью методов геодезического обеспечения и автоматизации реконструкции (капитального ремонта) и эксплуатации железных дорог являются значительные отличия в требованиях к точности определения геометрических параметров, например, рельсовой колеи и пространственных данных. В соответствии с нормативными требованиями (инструкция ЦП 515) геометрические параметры рельсовой колеи необходимо определять с точностью 1 мм, а пространственные данные – с точностью 30 мм. Высокие требования к определению геометрических параметров с точностью 1–2 мм ограничивали применение геодезических методов, поэтому использовались и до настоящего времени в основном используются относительные хордовые методы измерений на базе длины вагона по трем точкам путем измерения положения средней точки относительно двух смежных датчиками линейных перемещений. Для создания цифровых проектов (ЦП) и выполнения исполнительных съемок участков железнодорожного пути после ремонтных работ разработан мобильный лазерный сканер МЛС «Сканпуть», который запатентован и сертифицирован как средство измерений. Разработана методика распознавания рельсовых нитей и выделения их из облака точек, что позволило автоматизировать процесс оцифровки рельсовой колеи и создания цифровых проектов.

Специфика при создании цифрового проекта для САУ железнодорожных строительных машин основана на обеспечении строительных процессов и конкретных функций строительных машин на каждом этапе реконструкции (капитального ремонта). Общим для цифрового проекта является привязка всех проек-

ных параметров к оси ремонтируемого пути. Поэтому для обеспечения САУ разработан цифровой проект, включающий определение пространственных данных оси пути и геометрических параметров, жестко привязанных к оси пути. К таким параметрам относятся поперечные уклоны и превышения относительно проектной головки рельса, глубина и уклоны вырезки (очистки) балласта, габариты приближения строений. Структура и форматы данных цифрового проекта жестко регламентированы и совместимы с форматами и структурой данных САУ.

Строка заголовков полей ЦП:

x; y; h; alfa; pk; shift_pk; dS; dH

Описание:

x, y, h – координаты текущего положения по данным ГНСС в местной системе координат МСК; *alfa* – угол отклонения, градусы (доля градусов); *pk* – пикетаж, м; *shift_pk* – расстояние относительно пикета, м; *dS* – рихтовка; *dH* – просадка, м.

Принципиальным отличием предлагаемой методики создания цифровых проектов на ремонт железных дорог является пространственная привязка проектных данных (габариты приближения строений, глубина вырезки балласта, междупутье, высота контактной сети и другие данные) к оси ремонтируемого пути. Вторым существенным отличием является необходимость преобразования системы координат проекта на участок ремонта в систему координат, в которой выполняется реализация цифрового проекта с использованием САУ на базе ГНСС (ITRF-2014). Исследования показали, что аффинные преобразования с использованием общих (для двух систем координат) опорных точек через 2 км, созданных при проведении изыскательских работ, не обеспечивают требуемой точности, особенно для преобразования высотных отметок МСК (проект) в ЦП (ITRF-2014). Одним из важных факторов для выбора методики оцифровки и преобразования координат являются требования ЦП по оцифровке через 1 м. Сущность создания ЦП заключается в съемке АПК «Профиль» за 1–2 недели до начала ремонта существующего (ремонтного пути) в системе координат ITRF-2014 (WGS-84), корректировка координат на величину рихтовки в плане и профиле и получение нового пространственного положения оси ремонтного пути. Форматирование проектных данных, с уче-

том нового положения оси, обеспечивает создание цифрового проекта. Для этого применяется ПК «Проект», разработанный для создания ЦП с использованием данных АПК «Профиль».

В третьем разделе приведены результаты разработки систем автоматизированного управления для строительных железнодорожных машин. Разработка САУ – один из важнейших этапов автоматизации геодезического обеспечения строительных процессов. САУ обеспечивают (по геодезическим данным) расчет пространственного положения рабочих органов строительной техники, включая координаты, пространственную ориентацию, геометрические параметры.

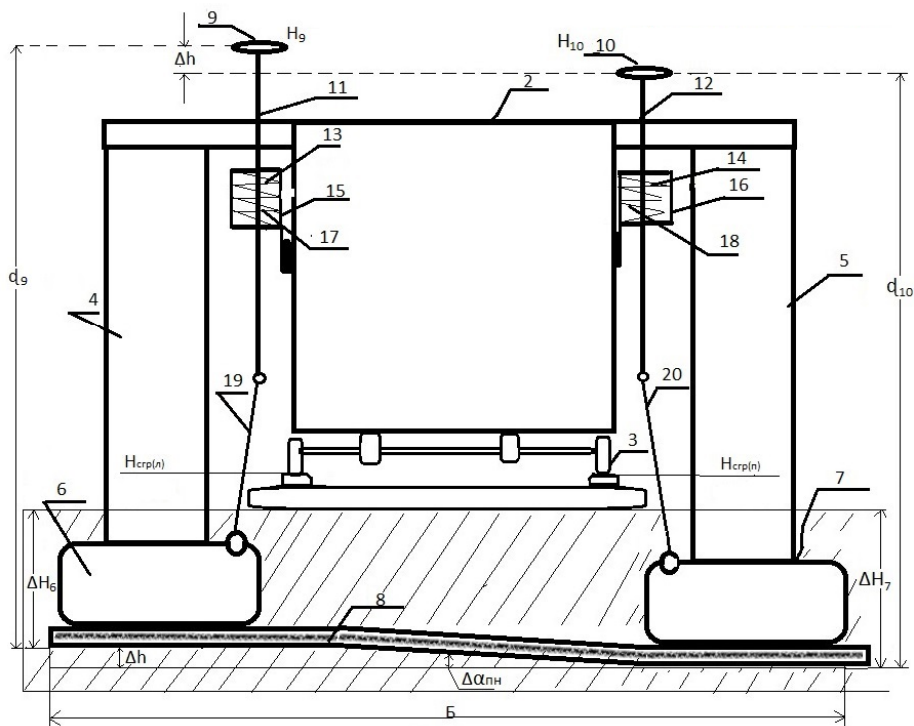
Полученные данные используются для управления рабочими органами (лопата, ковш) строительных машин. Строительно-дорожные машины оборудуются системами управления, которые классифицируются в зависимости от функционала на системы индикаторного типа и автоматизированные. Системы индикаторного типа обеспечивают машиниста информацией об отклонении рабочих органов от проектных значений по одному или нескольким параметрам. Автоматизированные системы не только информируют машиниста об отклонениях от проекта, но и управляют рабочими органами в автоматизированном режиме, обеспечивая проектное положение для конструкций и соответствие цифровых моделей поверхностей проектным значениям по земле, балласту, дорожным одеждам. Автогрейдерная техника, бульдозеры, экскаваторы, уплотнители оборудуются импортными системами управления и широко применяются крупными строительными организациями. Основными разработчиками САУ являются Leica, Trimble, Topcon. Теоретические исследования и практические решения, предложенные автором для САУ строительной железнодорожной техникой заключается в реализации цифровых проектов на участок строительства (ремонта) путем сравнения фактических и проектных координат в САУ-3D и высотных отметок или других параметров в системах управления индикаторного типа. Основным отличием САУ железнодорожных путевых и строительных машин являются конструктивные особенности, функционал рабочих органов, значительные разности в точности взаимного и пространственного положения элементов пути, жесткие требования к регламенту по безопасности движения. Так, например, баровая

цепь (рабочий орган щебнеочистительной машины) находится под слоем балласта, подъемно-рихтовочное устройство электробалластера находится под рамой машины, что полностью закрывает прямую оптическую и радиовидимость для спутниковых приемников, поэтому для железнодорожной техники решения, аналогичные тем, которые применяются для автотракторной техники, нельзя реализовать практически. Особенности и специфика САУ железнодорожных строительных машин, предлагаемых автором диссертационной работы, лежат в основе теоретических построений принципиальной и кинематических схем реализации САУ на базе ГНСС. Рассмотрим технические и методические решения для основных этапов ремонта.

Для определения геометрических параметров работы щебнеочистительной машины разработана система контроля вырезки балласта (СКВБ), которая приведена на рисунке 13.

Контроль вырезки балласта заключается в измерении глубины вырезки балласта по правому и левому краю основной площадки и ее поперечного уклона.

Сущность СКВБ заключается в измерении высотных отметок с использованием двухантенной спутниковой системы позиционирования, каждая из антенн связана кинематически с баровой цепью (рабочие органы ЩОМ, находящиеся под слоем щебня на глубине 70 см ниже головки рельса) тросохордовым устройством с возвратно-пружинным механизмом, который обеспечивает при заглублении баровой цепи перемещение антенн в вертикальной плоскости на величину заглубления (см. рисунок 13), что позволяет без каких-либо дополнительных систем и устройств определять глубину вырезки балласта и уклоны, непосредственно используя пространственное положение спутниковых антенн. Учитывая специфику ЩОМ (деформации рамы, поперечные и продольные уклоны машины, независимые перемещения конвейеров относительно рамы машины), данное решение позволило максимально эффективно решить задачу контроля параметров вырезки балласта.



1 – щебнеочистительная машина; 2 – рама; 3 – рельсо-шпальная решетка;
 4, 5 – конвейеры; 6, 7 – плуг; 8 – баровая цепь; 9, 10 – спутниковые антенны ГНСС;
 11, 12 – направляющие; 13, 14 – устройство демпфирования (УД);
 15, 16 – корпус УД, жестко связанный с рамой; 17, 18 – пружины; 19, 20 – тросы

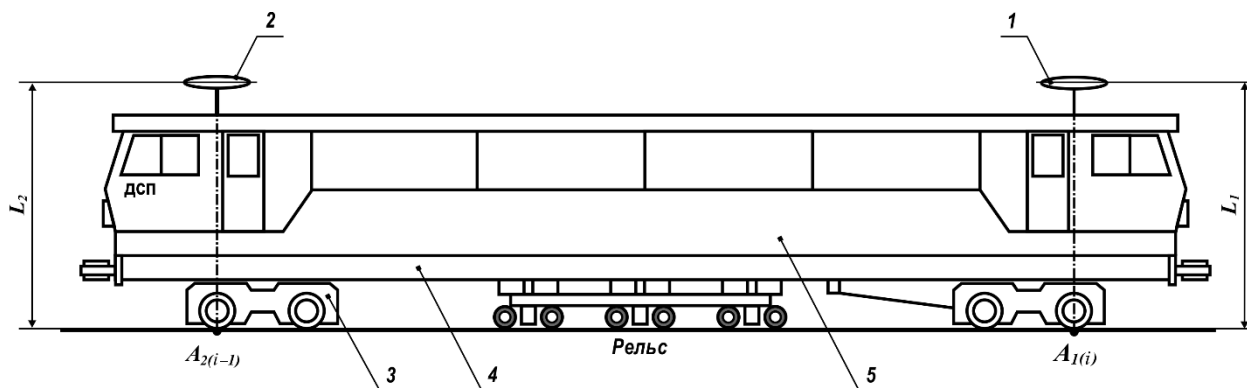
Рисунок 13 – Принципиальная схема контроля геометрических параметров
 вырезки балласта ЩОМ

Автоматизация геодезического обеспечения на этапе контроля уплотнения балласта. На этом этапе с использованием динамического стабилизатора пути (ДСП) выполняется уплотнение рыхлого балласта. Контроль уплотнения необходим для оценки качества уплотнения с использованием коэффициента уплотнения, который определяется по осадке балласта после уплотнения и толщине слоя балласта по формуле

$$E_y = \frac{p}{d}, \quad (18)$$

где p – осадка балласта (разность высотных отметок до и после уплотнения);
 d – толщина слоя балласта.

На рисунке 14 показан общий вид динамического стабилизатора пути (ДСП), оснащенного системой контроля уплотнения балласта (СКУБ).



1, 2 – спутниковые антенны ГНСС; 3 – ходовые колеса; 4 – несущая рама; 5 – ДСП;

L_1 и L_2 – высота указанных антенн 1 и 2 относительно головки рельса

Рисунок 14 – Общий вид динамического стабилизатора пути

На рисунке 15 приведена принципиальная схема определения коэффициента уплотнения балласта

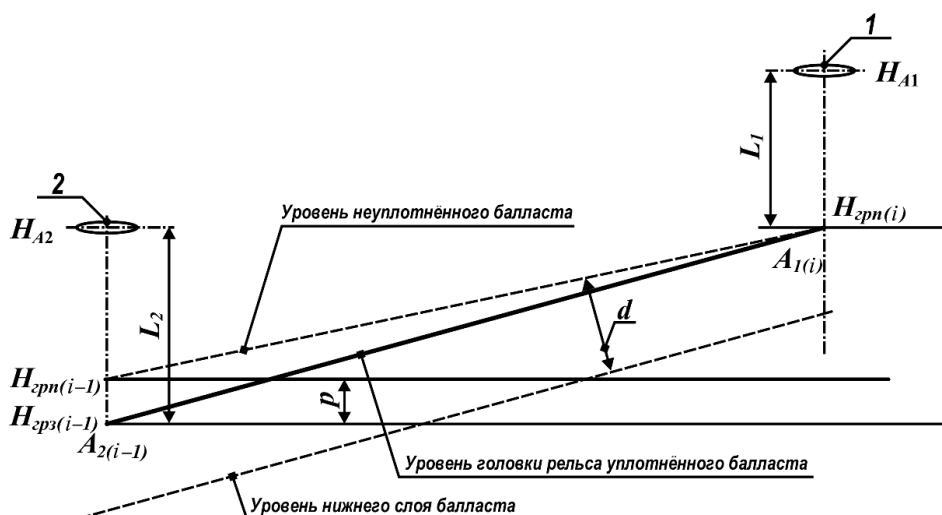


Рисунок 15 – Принципиальная схема системы контроля уплотнения балласта

Структурная схема СКУБ приведена на рисунке 16.



Рисунок 16 – Структурная схема СКУБ

Принцип работы СКУБ основан на измерении высотных отметок на рыхлом (неуплотненном) и уплотненном балласте с использованием спутникового приемника с двумя антеннами, одна из которых (4) находится в передней части ДСП, а вторая (5) – в хвостовой (задней) части ДСП (см. рисунки 14, 15), вычислении высотных отметок головки рельса A_4 и A_5 по известной высоте спутниковых антенн L_4, L_5 относительно головки рельса, превышений по высотным отметкам H_{a4} и H_{a5} в i и $i-1$ точках между фазовыми центрами антенн на текущий момент времени и для этой же измерительной базы – превышение для передней антенны в этих же i и $i-1$ точках, расчет осадки p и толщины слоя балласта d в соответствии с разработанным алгоритмом. Коэффициент уплотнения E_y в СКУБ рассчитывается по формуле

$$E_y = \frac{\sum_1^n p/n}{d}, \quad (19)$$

где d – толщина слоя балласта; p – величина просадки (3); n – количество измеренных i точек на участке пути определения коэффициента уплотнения E_y . В 2019 г. СКУБ прошел успешные испытания на ЗСЖД и рекомендован для широкого применения на сети ОАО «РЖД».

Для постановки пути в проектное положение автором разработано два принципиально отличающихся варианта САУ.

Первый вариант основан на сравнении высокоточных фактических и проектных координат оси пути при наличии разности перемещения

с использованием рабочих механизмов, подъемно-рихтовочных устройств (ПРУ) рельсошпальной решетки в проектное положение. Пояснение принципа работы САУ, приведено на рисунке 17. Из приведенной схемы видно, что измеряется фактическое положение оси пути и сравнивается с проектным, определяется разность координат, которая в дальнейшем используется для расчетов рихтовки в плане и подъёмки по высоте.

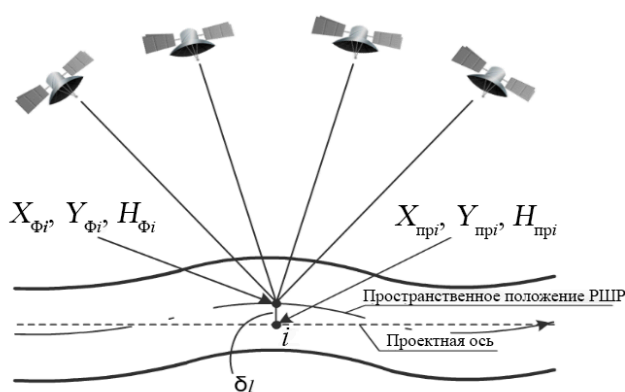


Рисунок 17 – Принципиальная схема постановки пути в проектное положение по первому варианту

Принципиальные и кинематические схемы при реализации приведенного технического решения имеют специфику, связанную с конструкцией рабочих органов машины, например, подъемно-рихтовочное устройство находится в нижней части машины, что ограничивает радиовидимость с навигационных спутников ГНСС, поэтому для железнодорожных строительных машин (в отличие от автотракторной техники – бульдозера, автогрейдера) применена трехуровневая структура получения исходных данных для расчетов фактических координат рабочих органов машины (ПРУ), включающая спутниковые измерения координат по двум спутниковым антеннам, расположенным в верхней части машины, редуцирование координат с антенн на ось пути и определение положения рабочих органов (ПРУ) строительных машин относительно условного фазового центра (УФЦ) спутниковых антенн.

Структурная схема расчета сдвижек и подъемок САУ (ГНСС) для обеспечения постановки железнодорожного пути в проектное положение и формирования управляющих сигналов приведена на рисунке 18.



Рисунок 18 – Структурная схема расчета сдвижек, подъемок и формирования управляющих сигналов в САУ-3D для постановки пути в проектное положение

На рисунке 19 показано редуцирование координат спутниковых антенн на ось пути. Расчет величины редукиции выполняется по формуле

$$dS = \frac{\Delta h}{P} \cdot \lambda, \quad (20)$$

где Δh – превышение между спутниковыми антеннами; λ – расстояние спутниковых антенн от фазовых центров до головки рельса; P – расстояние между фазовыми центрами спутниковых антенн. Для расчета редукиции по данным инклинометров и акселерометров вследствие большого объема

исследований отказались, так как они имеют инерционные задержки, что не компенсировало пространственного смещения спутниковой антенны.

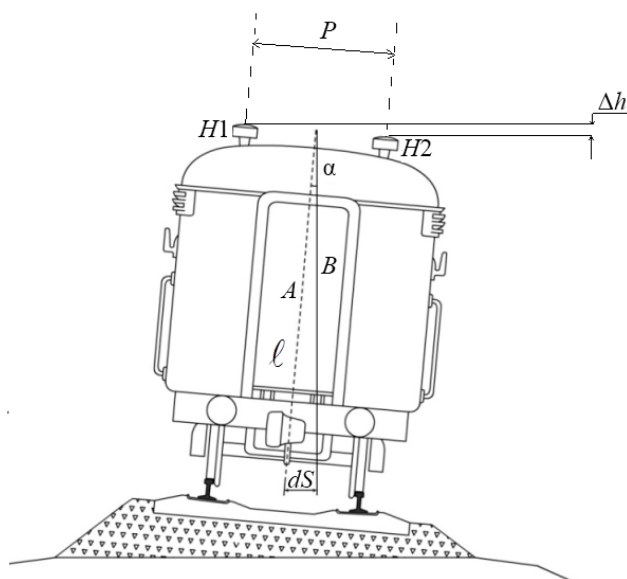


Рисунок 19 – Редуцирование условного фазового центра на ось пути

Положение оси ПРУ относительно условного фазового центра (среднего значения координат между фазовыми центрами) рассчитывается в соответствии со схемой (рисунок 20).

Расчет в плане и профиле положения оси ПРУ относительно условного фазового центра выполняется по формулам

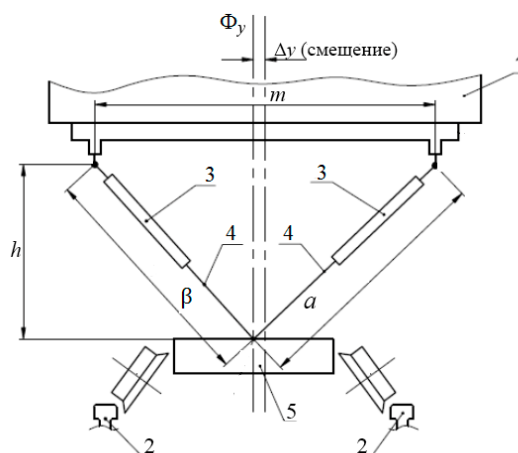
$$h = \sqrt{a^2 + R^2 - \left(\frac{m^2 + a^2 - b^2}{2m} \right)^2}, \quad (21)$$

$$y = \frac{m^2 + a^2 - b^2}{2m}, \quad (22)$$

где a , b – расстояния от фиксированных точек измерительной базы m на раме машины до оси ПРУ; R – радиус вращения оси крепления тросо-хордовой системы.

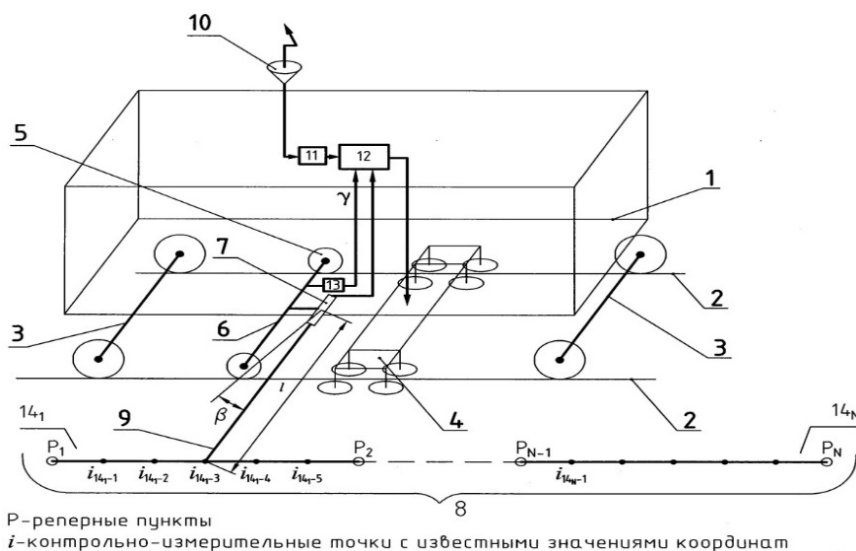
Второй вариант системы автоматизированного управления основан на автоматизации способа бокового нивелирования и предназначен для двух путных участков железной дороги. Принципиальная схема системы автоматизиро-

ванного управления по технологии бокового нивелирования – САУ (ТБН) приведена на рисунке 21.



1 – рама машины; 2 – рельсы; 3 – энкодеры; 4 – тросо-хордовые устройства; 5 – ось ПРУ;
 Φ_y – ось условного фазового центра

Рисунок 20 – Принципиальная схема определения положения оси ПРУ относительно условного фазового центра спутниковых антенн



1 – рама путевой машины; 2 – железнодорожные рельсы; 3 – ходовые тележки;
 4 – ПРУ; 5 – измерительная тележка; 6 – подвижное основание;
 7 – датчик пространственного положения измерительной тележки;
 8 – опорная плоскость (измерительная база); 9 – направляющий элемент (лазерный сканер);
 10 – спутниковая антенна; 11 – спутниковый приемник; 12 – бортовой компьютер

Рисунок 21 – Принципиальная схема и устройство САУ-3D на базе способа бокового нивелирования

Сущность работы САУ (ТБН) заключается в сравнении расстояний между осями ремонтируемого и соседнего пути и полученных значений с соответствующим проектным расстоянием. Структурная схема реализации способа бокового нивелирования с использованием САУ (ТБН) приведена на рисунке 22.

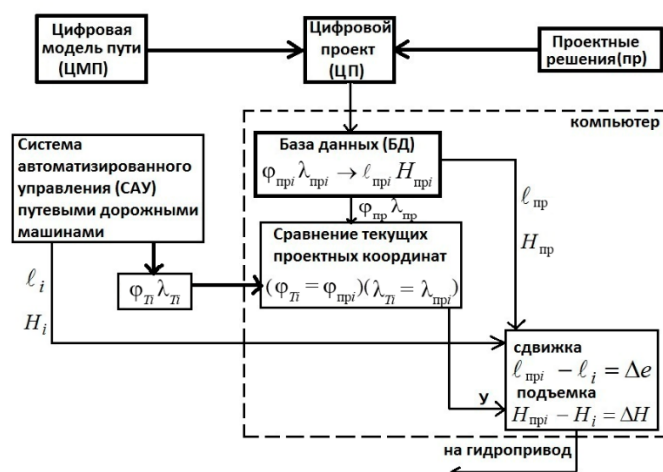


Рисунок 22 – Структурная схема реализации способа бокового нивелирования

Реализация технологии бокового нивелирования с использованием САУ (ТБН) заключается в пространственной привязке проектных значений геометрических параметров (междупутье, габариты приближения строений, высотные отметки), создании по полученным пространственным данным и проектным решениям на участок реконструкции (ремонта) цифрового проекта и выправке пути по данным фактических (полученных измерительной системой) и проектных (из БД) геометрических параметров путем их сравнения и формирования управляющего сигнала на гидропривод для перемещения РШР в проектное положение (см. рисунок 22). Исследования и сравнительные испытания САУ показали достоинства и преимущества разработанного автором теоретического обоснования и практической реализации САУ (ТБН):

1 Технология бокового нивелирования автоматизирует процесс постановки железнодорожного пути в проектное положение, исключает геодезические разбивочные работы и создание опорной геодезической сети.

2 Системы автоматизированного управления САУ-3D, созданные на базе бокового нивелирования, не зависят от наличия спутниковой референц-сети постоянно действующих базовых станций и GSM-связи, не требуется создания временных спутниковых базовых станций и обеспечения радио- или GSM-связи, так как измерения с использованием ГНСС выполняются автономно без использования дифференциальных поправок.

3 САУ-3D на базе бокового нивелирования обеспечивает точность измерений фактических параметров постановки пути в проектное положение относительно опорного рельса 2 мм.

4 При применении технологии ТБН преобразование систем координат проекта на ремонт в систему координат САУ-3D обеспечивает сохранение проектных решений и их реализацию с высокой (2 см) точностью.

5 Стоимость создания цифрового проекта для ТБН в 8–10 раз дешевле проекта с использованием дифференциальных поправок при сравнениях фактических и проектных координат.

На рисунке 23 показан общий вид машины (электробалластер) для постановки пути в проектное положение с двухсистемным оборудованием САУ ГНСС и САУ (ТБН), разработанным для ОПМС-19 (г. Обь) ЗСЖД.



Рисунок 23 – Общий вид электробалластера ЭЛБ-4С ОПМС-19 ЗСДРП, оборудованного двумя САУ-3D

На однопутных участках используется САУ (ГНСС), на двухпутных – САУ (ТБН), что обеспечивает максимально высокую эффективность за счет оптимизации создания цифровых проектов. По результатам исследований предложена классификация систем контроля и управления для автоматизированного геодезического обеспечения железных дорог.

По принципу работы:

- системы, основанные на сравнении высокоточных проектных и фактических координат;
- системы, основанные на сравнении проектных и фактических геометрических параметров;
- гибридные системы.

По уровню управления:

- системы индикаторного типа;
- системы автоматизированного управления (САУ, САУ-2D, САУ-3D).

По функциональному назначению:

- системы постановки пути в проектное положение;
- системы для планировки земляного полотна и балласта;
- системы контроля геометрических параметров в технологических процессах.

Предложена система контроля качества работ с использованием электронных карт и ГИС-технологий, позволяющая дистанционно выполнять операционный контроль из диспетчерских пунктов.

В четвертом разделе приведены результаты внедрения комплекса технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожного пути на объектах ОАО «РЖД». Для реализации разработанных технических и технологических решений (приборов, контрольно-измерительных систем, САУ) в процессе диссертационного исследования создана инструкция «Геодезическое обеспечение ремонта (модернизации) железнодорожного пути с применением ГНСС и систем автоматизированного управления на их базе», которая была утверждена и введена в дей-

ствие распоряжением ОАО «РЖД» от 31.12.2015 № 3214р. Нормативный документ регламентирует требования к структуре и форматам данных для цифровых моделей пути на железных дорогах, качеству работ и точности измерений, методике создания цифровых проектов на ремонт для САУ, к устройству и функциональным возможностям САУ на базе ГНСС. Нормативные требования разработаны для сети железных дорог ОАО «РЖД» РФ. Технологическая схема производства ремонта (реконструкции) железнодорожных путей с автоматизированным геодезическим обеспечением приведена на рисунке 24.

При проведении реконструкции (капитального ремонта) железнодорожных путей с использованием цифровых технологий, включающих цифровые проекты, САУ-3D, ГИС-технологии, ГНСС, лазерные сканеры и другие современные цифровые средства и методы геодезического обеспечения, технологическая карта и технологический процесс не изменяется. Применение АПК «Профиль» полностью автоматизирует создание цифровых проектов, что исключает создание опорной и съемочной геодезической сети, применение САУ, позволяет исключить процесс разбивочных работ и операционный инструментальный контроль, так как постановка пути в проектное положение выполняется без участия человека, а фактические параметры выправки пути фиксируются САУ и хранятся в БД, что обеспечивает оперативный контроль качества до 100 %, операционный инструментальный контроль снижается до уровня 10 %.

Вырезка и очистка балласта также обеспечиваются автоматизированной системой управления, что исключает инструментальный контроль глубины вырезки и других параметров. Для реализации цифровых технологий требуется внести изменения в каждый этап работ по реконструкции железных дорог, необходимые корректировки на исключение геодезических работ, их замену на новые методы и средства с использованием ЦП и обеспечение взаимосвязи и интеграции с существующей технологией.

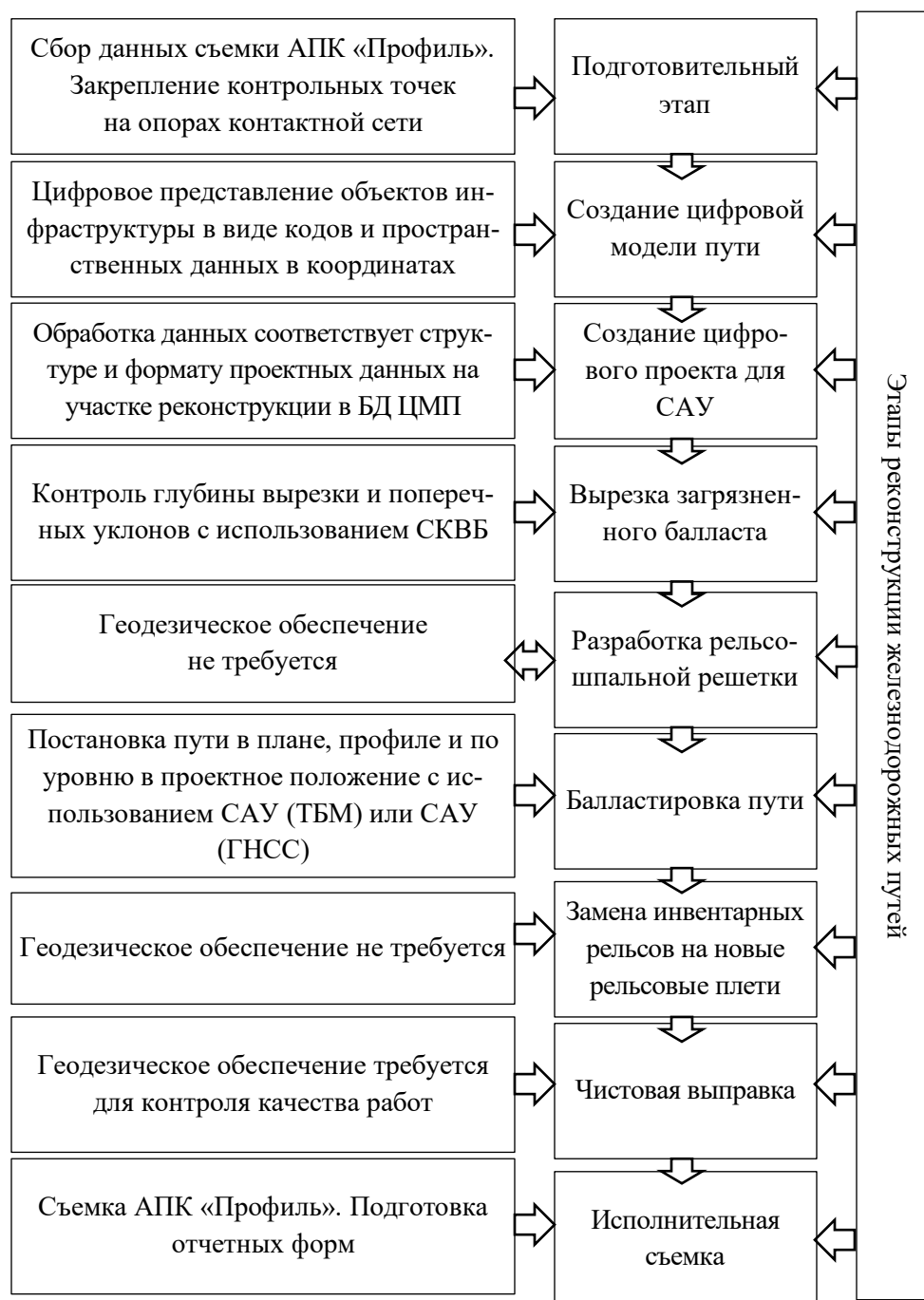


Рисунок 24 – Схема этапов геодезического обеспечения при реконструкции железнодорожных путей

Геодезические методы определения геометрических параметров и управления технологическими процессами внедрены для определения коротких неровностей и волнообразного износа рельсов ПТ «Волна» (ЗСЖД), системы технологического контроля СТК-РП (РСР-29, ЗСЖД и РСР-11 КТЖ, Республика Казах-

стан), лазерные мобильные сканеры «Сканпуть» ИЦ «Ямал» – в ОАО «Газпром», на КТЖ «Дистанция пути № 11», г. Нур-Султан, Республика Казахстан, АПК «Профиль» – на ЗСЖД, МУТ (МИИТ), Октябрьская ЖД, Ур ГУПС, ВСЖД, Забайкальская ЖД и др., САУ – на ЗСЖД, ВСЖД, Октябрьская ЖД, КТЖ Республика Казахстан. Ежегодно объем реконструкции и ремонта только на ЗСЖД с использованием САУ составляет около 700 км, такой же объем выполняется при создании цифровых проектов АПК «Профиль». Объем геодезических съемок по железнодорожным станциям с использованием АПК «Профиль» составляет 600 км. Все разработки, включая способы и средства измерений, защищены патентами на изобретение (около 30 патентов), а приборы сертифицированы и внесены в Реестр средств измерения. По теме исследования реализовано около 20 контрактов. Ежегодный экономический эффект автоматизации геодезического обеспечения реконструкции, ремонта и эксплуатации железных дорог от внедрения АПК «Профиль», СТК-РП, САУ и других приборов составляет более 250 млн рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования реализовано новое комплексное направление, связанное с применением современных геоинформационных методов получения и использования геопространственной информации об инфраструктуре железнодорожной отрасли всех иерархических уровней для решения задач в рамках программы «Цифровая железная дорога». Поставленная цель – разработка и исследование комплекса технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожного пути – достигнута. Основные научные и практические результаты, полученные в ходе исследования, заключаются в следующем.

1 Выполнен анализ методов и средств автоматизации геодезического обеспечения при реконструкции и ремонте железнодорожного пути, что позволило

систематизировать и определить уровень отечественных и зарубежных средств автоматизированного управления железнодорожной строительной техникой и сформулировать задачи диссертационного исследования.

2 Разработаны теоретическое обоснование, методика и средства измерений на базе ГИС-технологий, гироскопической техники и ГНСС для создания цифровых проектов автоматизированного управления строительной железнодорожной техникой, что позволило исключить недостатки геодезических (высокая трудоемкость) и относительных (отсутствие координат) методов, при определении геометрических параметров рельсовой колеи и объектов инфраструктуры.

3 Разработаны принципиальная схема и устройство системы автоматизированного управления для строительной железнодорожной техники, отличающиеся от существующих тем, что измерительный комплекс учитывает специфику железных дорог и содержит три составляющих измерительной системы, включающие спутниковые измерения, редукцию координат на ось пути и измерение положения рабочих органов относительно виртуального фазового центра спутниковых антенн, что обеспечивает функциональные возможности САУ по вырезке балласта, выправке пути и решение других задач.

4 Разработана теоретически обоснованная нормативно-правовая база для обеспечения работы САУ, включающая временный регламент, «Техническое обслуживание систем управления (САУ) на базе ГНСС и АПК “Профиль” при подготовке к работе и в процессе эксплуатации» и «Инструкцию по геодезическому обеспечению реконструкции и ремонта железных дорог с применением ГНСС и систем управления на их базе» (Распоряжение ОАО «РЖД» от 31.12.2015 № 3214).

5 Результаты исследований внедрены в технологические процессы при реконструкции и ремонте железнодорожных путей, что позволило автоматизировать геодезическое обеспечение строительными процессами в ходе реконструкции и ремонта железнодорожных путей, сократить сроки выполнения работ, обеспечить высокую надежность и безопасность, а также возможность оперативной визуализации данных на основе цифровых технологий.

Таким образом, поставленные цели и задачи решены. В результате исследований получены новые технологические и технические решения по автоматиза-

ции геодезического обеспечения ремонта и реконструкции железнодорожных путей, получены новые научно обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых внесло значительный вклад в развитие страны.

Перспективы дальнейших исследований направлены на расширение функциональных возможностей оборудования для оснащения строительных и железнодорожных машин.

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию при новом строительстве железных дорог скоростного и высокоскоростного движения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Щербаков, В. В. Координатный способ определения геометрических параметров железных дорог [Текст] / В. В. Щербаков, О. В. Ковалева // Геодезия и картография. – 2007. – № 9. – С. 22–25.

2 Щербаков, В. В. Диагностика автомобильных дорог по геометрическим параметрам с использованием ГНСС [Текст] / В. В. Щербаков, М. Н. Барсук // Геодезия и картография. – 2008. – № 6. – С. 55–57.

3 Щербаков, В. В. Специальная реперная железнодорожная система [Текст] / В. В. Щербаков, В. М. Жидов, М. В. Макушинская // Геодезия и картография. – 2010. – № 12. – С. 12–14.

4 Щербаков, В. В. Цифровые модели пути – основа геодезического обеспечения проектирования, строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог [Текст] / В. В. Щербаков, О. В. Ковалева, И. В. Щербаков // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 12–16.

5 Щербаков, В. В. Цифровые технологии при строительстве и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры [Текст] / Земерова А. А., Комягин С. А. // Транспортное строительство. – 2019. – № 2. – С. 9–12.

6 Щербаков, В. В. Методика применения лазерных сканеров для геодезического обеспечения проектно-изыскательских работ на железной дороге [Текст] /

В. В. Щербаков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка – 2020. – Т. 64, № 3. – С. 289–297.

7 Щербаков, В. В. Совершенствование методики определения длины рельсовых плетей [Текст] / В. В. Щербаков // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 109–120.

8 Щербаков, В. В. Исследование мобильного лазерного сканера «Скан-путь» при определении пространственного положения железнодорожного пути [Текст] / В. В. Щербаков // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 98–108.

9 Геодезические технологии контроля параметров уплотнения балласта при строительстве и капитальном ремонте железных дорог с использованием глобальных навигационных спутниковых систем [Текст] / В. В. Щербаков, А. П. Карпик, И. В. Щербаков, М. Н. Барсук, И. А. Бунцев // Геодезия и картография. – 2020. – № 7. – С. 8–13. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-8-13.

10 Технология бокового нивелирования при постановке железнодорожного пути в проектное положение [Текст] / В. В. Щербаков, А. П. Карпик, И. В. Щербаков, М. Н. Барсук // Геодезия и картография. – 2020 – № 8. – С. 18–23. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-962-8-18-23.

11 Щербаков, В. В. Методика создания цифровых проектов для автоматизированных систем управления строительной железнодорожной техники [Текст] / В. В. Щербаков / Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С.127–139.

12 Пат. 116862 Российская Федерация, МПК 51 Е 01 В 35/00 В61К 9/08. Устройство для определения пространственных параметров инфраструктуры железной дороги [Текст] / В. В. Щербаков, В. Д. Верескун, В. А. Герасимов, А. Н. Модестов, А. С. Тараканов ; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2011150328/11 ; заявл. 14.06.2011 ; опубл. 10.06.2012.

13 Пат. 2454498 Российская Федерация, МПК 51 Е 01 В 29/04 E01B31/02. Система для управления выправкой железнодорожного пути [Текст] / В. В. Щербаков, С. В. Духин, А. Н. Модестов, А. В. Нуйкин ; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2011104400/11 ; заявл. 08.02.2011 ; опубл. 27.06.2012.

14 Пат. 126011 Российская Федерация, МПК 51 E01B 27/10. Щебнеочистительная машина [Текст] / В. В. Щербаков, А. Н. Модестов ; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2012124581 ; заявл. 14.06.2011 ; опубл. 10.06.2012.

15 Пат. 136048 Российская Федерация, RUU 1МПК Е 01 В 29/04. Устройство для выправки железнодорожного пути и способ выправки железнодорожного пути [Текст] / В. В. Щербаков, И. В. Щербаков, А. Н. Модестов, И. А. Бунцев, В. П. Славкин ; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2013134278 ; заявл. 22.07.2013 ; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. – 10 с.

16 Пат. 147033 Российская Федерация, RUU 1МПК Е 01 В 29/04. Система для управления выправкой железнодорожного пути [Текст] / В. В. Щербаков, А. И. Пименов, А. Н. Модестов, И. В. Щербаков, И. А. Бунцев, В. П. Славкин ; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2014120965 ; заявл. 23.05.2014 ; опубл. 24.09.2014, Бюл. № 30. – 8 с.

17 Пат. 151873 Российская Федерация, RUU 1МПК G 01 С 21/00. Устройство для спутниковой навигации подвижного объекта железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Щербаков, И. А. Бунцев, И. В. Щербаков ; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2014134543 ; заявл. 22.08.2014 ; опубл. 26.03.2015, Бюл. № 11. – 7 с.

18 Пат. 2628541 Российская Федерация, RUC 1МПКВ61 К9/08Е 01В 35/00. Способ определения пространственных координат и геометрических параметров рельсового пути и устройство для его осуществления [Текст] / В. В. Щербаков, И. В. Щербаков, И. А. Бунцев ; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2016106560 ; заявл. 24.02.2016 ; опубл. 18.08.2017, Бюл. № 23. – 7 с.

19 Пат. 2703819 Российская Федерация, МПК 51 Е01В 27/02. Способ автоматического контроля качества уплотнения балластного слоя рельсового пути и устройство для его осуществления [Текст] / И. В. Щербаков, А. Л. Манаков, А. В. Воробьевский, А. И. Пименов, К. В. Голубкин, В. В. Щербаков ; заявитель и патентообладатель СГУПС, ООО «Сибдорпроект» ; заявл 18.12.2018 ; опубликован 22.10.2019, Бюл. № 30.

20 Пат. 187173 Российская Федерация, RU 1МПК Е01В 27|10. Щебнеочистительная машина [Текст] / В. В. Щербаков, А. И. Пименов, И. А. Бунцев, И. В. Щербаков ; заявитель и патентообладатель ОАО «Сибдорпроект» 2018128963/11 ; заявл. 06.08.2018 ; опубл. 22.02.2019 ; Бюл. № 6.

21 Metrological testing of road curvimeters and path – measuring devices [Text] / V. V. Kopytov, V. V. Shcherbakov, A. N. Nosov, S. A. Zagarskikh, T. V. Naboka // Measurement Techniques. – 2009. – № 11. – P. 1153–1158.

22 Shcherbakov, Vladimir. Development of a control system for a ballast cleaning machine using GNSS [Text] / Vladimir Shcherbakov, Ivan Buntsev and Olga Kovaleva // E3S Web of Conferences, Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019). – 2019. – Volume 135 (2019). – 02003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913502003>.

23 Shcherbakov, Vladimir. Automation of Railroad Construction Technology Using Surveying Methods [Text] / Vladimir Shcherbakov, Alexander Karpik, Marina Barsuk // Advances in Intelligent Systems and Computing, VIII International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2019, Volume 2. – 2019. – Volume 1116 (2020). DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3.

24 Щербаков, В. В. Автоматизация геодезического обеспечения строительства и ремонта железных и автомобильных дорог: современное состояние и перспективы развития [Текст] // В. В. Щербаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.) . – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 42–46.

25 Щербаков, В. В. Прибор дорожного мастера (ПДМ) для контроля геометрии рельсовой колеи [Текст] / В. В. Щербаков, И. В. Щербаков, В. Д. Астраханцев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 71–76.

26 Щербаков, В. В. Обзор разработок НИЛ «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения [Текст] / В. В. Щербаков, А. В. Конкин, А. А. Земерова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 144–154.