

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.488.2

doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-38-44

ОБРАТНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО 3D-СКАНИРОВАНИЯ

Евгений Игоревич Елисейкин^{1✉}, Максим Викторович Худорожко², Рафик Хайдарович Рафиков³

^{1,3} Инновационный инжиниринговый центр, Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Москва, Россия

¹ evg843529335@mail.ru

² khudorozhko.maksim@vniizht.ru

³ rafis-89@mail.ru

Аннотация

Выполнена работа, позволяющая оптимизировать трудозатраты на реверс-инжиниринг изделий для новых или ремонтируемых существующих серий подвижного состава железных дорог: прототипов, дефицитных полимерных или металлических запасных частей, нестандартных приспособлений, модельной и технологической оснастки, в условиях сервисных и локомотиворемонтных предприятий.

Целью работы является разработка обучающего материала с описанием пошагового 3D-сканирования запасных частей на оптических 3D-сканерах *RangeVision* с применением поворотного стола и без, обработки в периферийных программах полученного «скана» в файл промежуточного формата перед разработкой твердотельной 3D-

модели. Методы исследования: Для разработки методики использованы цифровые базы данных .stl-файлов запасных частей подвижного состава, материалы по 3D-сканированию, разработанные авторами в период 2019-2025гг. в процессе внедрения реверс-инжиниринга в сервисном и локомотиворемонтном производстве.

Новизна работы: Методика реверс-инжиниринга запасных частей подвижного состава, изготавливаемых 3D-печатью в условиях ограниченного времени, включает в себя комплексный подход «от оригинала изделия до напечатанной запчасти».

Ключевые слова: цифровая подготовка, 3D-сканер, полигональность, структурированный подцвет, mesh-сетка, технология, ремонт.

Ссылка для цитирования:

Елисейкин Е.И. Обратный инжиниринг запасных частей подвижного состава с применением оптического 3D-сканирования / Е.И. Елисейкин, М.В. Худорожко, Р.Х. Рафиков // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 6. – С. 38-44. doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-38-44.

Original article

Open Access Article

REVERSE ENGINEERING OF ROLLING STOCK SPARE PARTS USING OPTICAL 3D SCANNING

Evgeny Igorevich Eliseikin^{1✉}, Maksim Viktorovich Khudorozhko², Rafik Haidarovich Rafikov³

^{1,3} Innovative Engineering Center, Moscow, Russia

² Railway Research Institute of JSC Russian Railways, Moscow, Russia

¹ evg843529335@mail.ru

² khudorozhko.maksim@vniizht.ru

³ rafis-89@mail.ru

Abstract

The study is done to optimize labor costs for reverse engineering of products for new or existing series

of railway rolling stock under repair: prototypes, scarce polymer or metal spare parts, non-standard devices,

model and technological equipment, in the conditions of service and locomotive repair enterprises.

The study objective is to develop training material describing step-by-step 3D scanning of spare parts by *RangeVision* optical 3D scanners with and without a rotary table, processing the resulting "scan" into an intermediate format file in peripheral programs before developing a solid-state 3D model. Research methods: Digital databases of .stl-files of rolling stock spare parts and 3D scanning materials developed by the authors during 2019-2025 were used to develop the

Reference for citing:

Eliseikin EI, Khudorozhko MV, Rafikov RH. Reverse engineering of rolling stock spare parts using optical 3D scanning. Transport Engineering. 2025;6:38-44. doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-38-44.

Введение

В современном транспортном машиностроении процесс 3D-печати запасных частей тягового подвижного состава по технологии *FDM/FFF*, заключается в нескольких этапах, основным из которых является получение 3D-модели изделия и файла на печать [1, 2].

В случае отсутствия конструкторской документации для разработки 3D-модели, в машиностроении активно используется реверс-инжиниринг: 3D-сканирование и получение заготовки – «скана» с последующей обработкой в 3D-модель и получением .stl/.obj/.3MF-файла. На этапе подготовки файла необходимо применение специальных модулей с инструментами для «ремонта» *mesh*-сетки и повышения количества полигонов. Следовательно, 3D-

Материалы и методы

Подготовка.

Старт работы начинается с выбора камер для сканирования объектов с габаритными размерами от 50 до 1000 мм: *S*, *M*, *L* (табл. 1). При выборе камер следует ориентироваться на схему, представленную на рис. 1 и данные, приведенные в табл. 2. Если сканирование будет выполняться в темном помещении или на солнечном свете, то поверх камер установим светофильтры от производителя.

Объект предварительно очищается с продувкой сжатым воздухом от пыли и грязи. Особенное внимание следует уделить отсутствию на поверхностях питтинга, сквозной ржавчины и отслоений лакокрасочного покрытия/ шпатлевки. При

methodology while implementing reverse engineering in service and locomotive repair production.

The novelty of the work: The technique of reverse engineering of rolling stock spare parts produced by 3D printing in a limited time includes an integrated approach "from the original product to the printed spare part".

Keywords: digital preparation, 3D scanner, polygonality, structured illumination, mesh grid, technology, repair.

печать запчастей требует комплекса средств: от 3D-сканеров и 3D-редакторов (САПР) до слайсеров для «нарезания» *stl/.obj/.3MF*-файла [3, 4].

Для безбарьерной работы с данными средствами потребовалась методика, содержащая:

- сканирование на оптических 3D-сканерах *RangeVision* с поворотным столом и без [5];
- повышение качества 3D-печати путем настройки полигональной сетки;
- устранение незамкнутостей поверхностей .stl-файла;
- настройку параметров печати в одном из наиболее доступных слайсеров.

наличии указанных дефектов сканируемый объект следует подвергнуть пескоструйной или иной очистке. Полированные или черные поверхности покрываются матирующим слоем спрея *Helling 3D*, который после сканирования смывается водой или ветошью, смоченной растворителем *Нефрас*. На изделия с габаритными размерами более 1 м или со сложной геометрией поверхностей (например, стеклопластиковая облицовочная панель) необходимо нанести самоклеящиеся маркеры, выдерживая между ними расстояние.

На малогабаритные объекты наклеиваются маркеры диаметром 3 мм с расстоянием 10...30 мм, а на крупногабаритные – диаметром 6...9 мм и на расстоянии от

50 мм. Расположение маркеров на расстоянии более 150 мм не рекомендуется ввиду риска появления бликов света и выхода за зону сканирования [5]. На этом этап под-

готовки завершён, а в дальнейшей работе нам потребуется использование *ScanCenter (SC)*, руководства и инструкции, записанных на *USB*-носителе [6, 7, 8].

Таблица 1

Спецификация для 3D-сканирования

Table 1

Technical requirements for 3D scanning

3D-сканер	Проекторный блок <i>RangeVision PRO/ PRO2M/ Spectrum</i>
	Штатив для закрепления 3D-сканера
	Поворотный стол
	Цифровые камеры и объективы <i>S, M, L</i>
	Светофильтры
	Объединенные калибровочные поля <i>M</i> и <i>L</i> с ложементами, поле для оценки оси
Программное обеспечение к 3D-сканеру и САПР	<i>RangeVision ScanCenter</i>
	<i>Ultimaker Cura 15.4.6</i> или <i>15.4.6 RU</i>
	<i>Geomagic Design X</i>
	<i>Autodesk Netfabb</i>
	<i>ModuleWorks STL View</i> или <i>Microsoft 3DTools Repair</i>
Материалы	Матирующий аэрозольный спрей

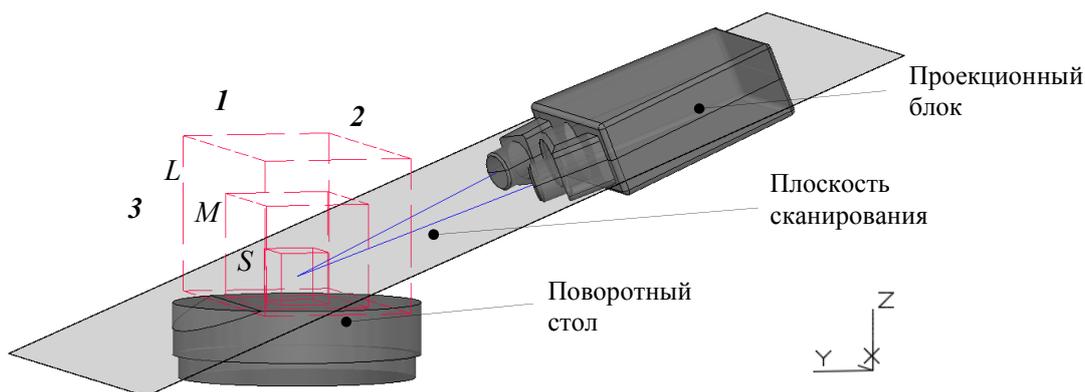


Рис. 1. Зоны сканирования [5]
Fig. 1. 3D-scanner's working zones [5]

Таблица 2

Общие настройки положения и углов наклона камер 3D-сканера [5]

Table 2

General settings for the position and tilt angles of the 3D scanner cameras [5]

Зона 3D-сканирования	<i>L</i> , мм	<i>M</i> , мм	<i>S</i> , мм
1	550	320	140
2	340	210	90
3	360	200	80
β , град (для камер)	108,4		
α , град (для камер)	36,8		
α_1 , град (для камер)	22		
<i>D</i> , мм (для камер)	900	<i>D</i> , мм	900
<i>l</i> , мм (для камер)	300	<i>l</i> , мм	300

Предварительная настройка.

Начало работы с *SC* заключается в настройке подключенного 3*D*-сканера на новую зону сканирования и выборе габариты зоны, ориентируясь на значения, ранее приведенные в табл. 2.

В центре стола на подставке размещается одно из калибровочных полей, соответствующих разрешению камер. Далее указывается расстояние от блока до поля. В системе указные действия обеспечиваются перемещением штатива с блоком относительно стола с полем. Перемещение осуществляется до достижения метками по периметру и центру поля внутри четырех ячеек сетки. Далее выполняется настройка яркости каждой камеры кольцами на объективе. Фокус проектора напротив, настраивается вращением колец на корпусе камеры – изображение поля на экране должно иметь четкие линии. Отметим, что подсвет черным цветом установлен в *SC* автоматически и не требует изменения на другой цвет. Выдержка настраивается до появления всех белых меток на поле [5].

Калибровка.

Осуществляется сканированием основного количества полевых меток. На поворотном столе устанавливается оценочное поле в соответствии с табл. 1. Выдержка настраивается до устранения пересвета. После чего возможно начало сканирования. В случае получения неудовлетворительного результата требуется переместить поле дальше или ближе к блоку с повтором оценки оси. Отметим, что для калибровочного поля стандартно размещение в центральной зоне стола, а результаты калибровки при расположении поля на краю стола некорректны.

Сканирование на поворотном столе.

При сканировании формируется новый проект, при этом указывается текстура, тип фильтра. Указывается есть ли необходимость удалять фон при сканировании, скорость поворота стола, задержка сканирования, яркость линий в проекторе, количество полос.

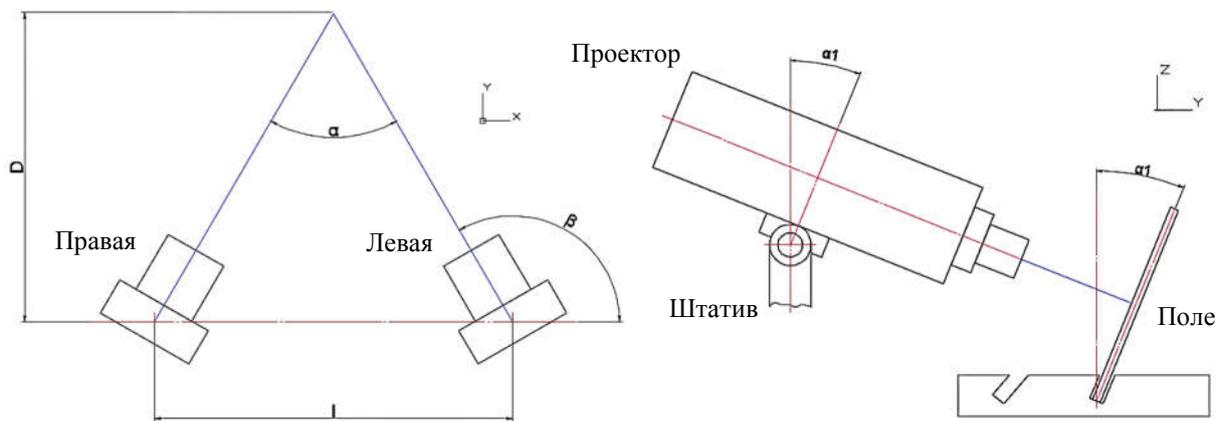


Рис. 2. Настройка положения камер блока проектора 3*D*-сканера [5]

Fig. 2. Calibration of camera's direction [5]

Сканирование с маркерами.

Подобный метод целесообразен для сканирования крупных объектов, что характерно для железнодорожной техники, и основан на использовании референтных меток для точного совмещения отдельных сканов в единую 3*D*-модель.

К преимуществам маркерного сканирования можно отнести: возможность сканирования крупных объектов, возможность автоматического совмещение сканов без ручного выравнивания, высокая точность (до 0,01 мм), устойчивость к частичному закрытию объекта. При этом к минусам можно отнести временные затраты на

наклейку маркеров, сложности в работе с бликующими поверхностями, не возможность работы с гибкими и деформируемыми поверхностями.

Традиционно используются одноразовые клейкие маркеры на бумажной или пленочной основе, магнитные для крепления на металлических поверхностях, стикеры с QR-кодом, позволяющие идентифицировать метки с привязкой их к положению в пространстве. При сканировании на объектах с наибольшим размером до метра целесообразно размещать 20...30 маркеров при наибольшем размере до 5 метров – 50...70 маркеров. Маркеры располагаются в шахматном порядке, на разных плоскостях объекта. Для сканирования объектов, подвергающихся в процессе сканирования вибрационным нагрузкам целесообразно применять магнитные маркеры. Процесс сканирования повторяется до получения *mesh*-сеток, образующих равномерную видимую поверхность объекта, без крупных разрывов. При получении разрывов следует повторить калибровку, описанную в предыдущем пункте, и проверить равномерность слоя.

Автоматическая и ручная обработка *mesh*-сетки.

Основные этапы обработки *mesh*-сетки включают ее предварительную очистку, удаление артефактов и шумов, обрезку лишних фрагментов, оптимизацию топологии за счет упрощения полигонов и восстановление нормалей. Далее выполняется «ремонт геометрии» путем устранения неоднородностей и пропусков сетки, коррекция искажений. На финальном этапе подготовки выполняется проверка и экспорт, полученной сетки в нужный формат.

Обработка может выполняться в автоматическом режиме, что позволяет сократить трудозатраты и получать стандартизированный результат. При этом возможно "заглаживание" важных элементов детали, возникновение ошибок в сложных зонах. По итогу требуются дополнительные трудозатраты на контроль качества полученной сетки.

Ручная обработка сетки применяется для критически важных деталей, при

сложной геометрии (мелкие отверстия, резьбы). К типовым операциям ручной обработки можно отнести точечное удаление шумов, ручное исправление несплошностей, локальная ретопология, восстановление важных граней.

Для обратного инжиниринга конструкций подвижного состава оптимален гибридный подход, включающий 80 % автоматической проверки и 20 % ручной доводки. Для уникальных деталей подвижного состава часто требуется углубленная ручная обработка критических зон (посадочные места, ответственные сопряжения).

Использование программы *Geomagic Design X* для обработки *mesh*-сетки.

Geomagic Design X специализированная программное обеспечение для обратного инжиниринга, сочетающее мощные инструменты обработки полигональных сеток с возможностью преобразования в параметрические *CAD*-модели. Обработка сетки, полученной при сканировании предусматривает следующие этапы:

- импорт скана (в виде *.stl/.obj/.3MF*-файла);
- применение процедуры "*Mesh Doctor*" для автоматической обработки сетки;
- ручная коррекция сложных зон (резьбы, тонкие ребра)
- упрощение сетки ("*Decimate*") с сохранением ключевых деталей;
- проверка целостности ("*Manifold Check*");
- автоматическое создание поверхностей ("*Auto Surface*");
- ручное построение кривых для критических зон;
- генерация параметрической модели (например, в программный комплекс *Компас 3D*);
- проверка допусков ("*3D Compare*").

В качестве примера на рис. 3 представлены этапы разработка твердотельной *3D*-модели зубчатого колеса с использованием *3D*-сканирования на сканере *RangeVision PRO* и обработки «скана» в программном комплексе *Geomagic Design X*.

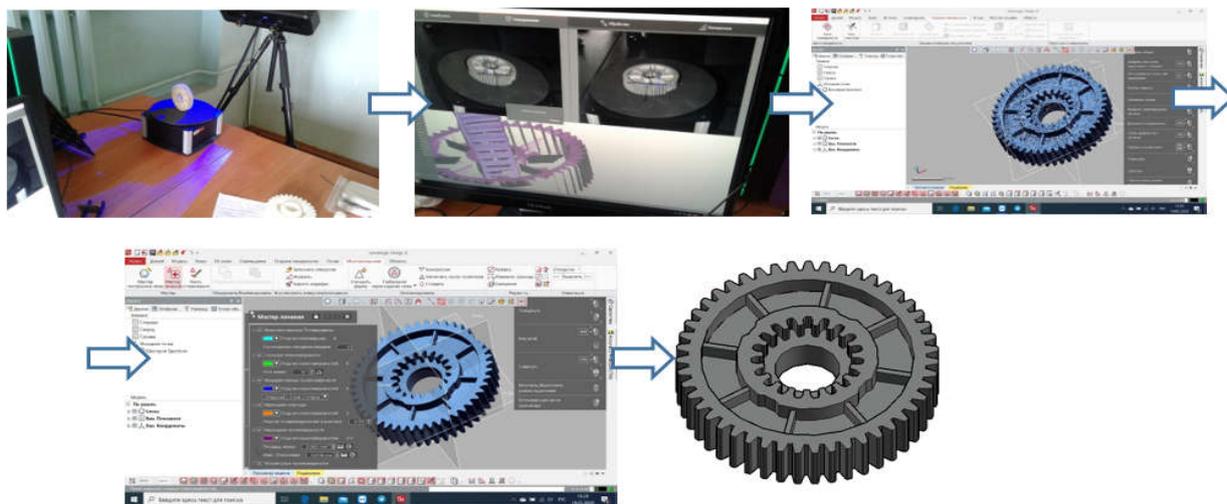


Рис. 3. Разработка твердотельной 3D-модели: от 3D-сканирования запасной части на 3D-сканере RangeVision PRO до обработки «скана» в Geomagic Design X
 Fig. 3. 3D model's development process: from spare part scanning on RangeVision PRO 3D-scanner to scan processing in Geomagic Design X software

Выводы

Описанная в работе методика позволяет выполнить реверс-инжиниринг дефицитных запасных частей на 3D-печать без непроизводительных затрат на самостоятельный поиск решений по настройке и калибровке оборудования, освоения работы с программами. В перспективе технологии 3D-сканирования деталей подвижного состава железных дорог позволит обеспечить переход к цифровым двойникам изделий (создание полных 3D-архивов

устаревших деталей, возможность виртуальных тестов модернизированных узлов), развитие решений для сканирования и обработкой на основе технологий искусственного интеллекта с автоматическим распознаванием дефектов, интеграцию с технологиями Industry 4.0 (связь с системами управление техническим обслуживанием CMMS, автоматическое обновление спецификаций в ERP-системах).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Application Spotlight: 3D Printing in the Rail Industry [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry/>.
2. Wohlers Associates, powered by ASTM International, and America Makers to Offer Design for Additive Manufacturing Course [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://newsroom.astm.org/wohlers-associates-powered-astm-international-and-america-makes-offer-design-additive-manufacturing>.
3. Елисейкин Е.И., Рафиков Р.Х., Куликов М.Ю., Разинков М.В. 3D-печать в технологии ремонта подвижного состава за рубежом / Е.И. Елисейкин и др. // Вестник проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2024. №3(67). С. 61-70.
4. Елисейкин Е.И., Изотов В.А., Рафиков Р.Х. Используя технологию 3D-печати / Е.И. Елисейкин и др. // Железнодорожный транспорт. 2022. №8. С. 51-55.
5. Рафиков Р.Х. Разработка методологии повышения эффективности технологической подготовки производства при ремонте тягового подвижного состава : докторская диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 2.9.3 / Рафиков Рафик Хайдарович; [Место защиты: Российский университет транспорта (МИИТ)]. – Москва, 2025. – 407 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.mii.ru/content/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A0%D0%B0%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%A0.%20%D0%A5.%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%82%20%D0%A0%D0%A3%D0%A2%20\(%D0%9C%D0%98%D0%98%D0%A2\).pdf?id_wm=1017078](https://www.mii.ru/content/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A0%D0%B0%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%A0.%20%D0%A5.%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%82%20%D0%A0%D0%A3%D0%A2%20(%D0%9C%D0%98%D0%98%D0%A2).pdf?id_wm=1017078).
6. RANGEVISION. Настройка и калибровка PRO. Электронное руководство, 2020 г.

7. ScanCenter NG. Сканирование и обработка 2020.2. Электронное руководство, 2020 г.

8. Руководство по эксплуатации. Сканеры оптические трехмерные RangeVision PRO. ScanCenter NG 2020.2, 2020 г.

REFERENCES

1. Application Spotlight: 3D Printing in the Rail Industry [Internet]. Available from: <https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry/>.
2. Wohlers Associates, powered by ASTM International, and America Makers to Offer Design for Additive Manufacturing Course [Internet]. Available from: <https://newsroom.astm.org/wohlers-associates-powered-astm-international-and-america-makes-offer-design-additive-manufacturing>.
3. Eliseikin EI, Rafikov RH, Kulikov MYu, Razinkov MV. 3D printing in the technology of repair of rolling stock abroad. *Tekhnika Zheleznih Dorog*. 2024;3(67):61-70.
4. Eliseikin EI, Izotov VA, Rafikov RH. Using 3D printing technology. *Railway Transport*. 2022;8:51-55.
5. Rafikov RH. Development of a methodology for improving the efficiency of technological preparation of

production during the repair of traction rolling stock [dissertation on the Internet]. [Moscow (RF)]: Russian University of Transport (MIIT); 2025. Available from: [https://www.mii.ru/content/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A0%D0%B0%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%A0.%20%D0%A5.%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%82%20%D0%A0%D0%A3%D0%A2%20\(%D0%9C%D0%98%D0%98%D0%A2\).pdf?id_wm=1017078](https://www.mii.ru/content/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A0%D0%B0%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%A0.%20%D0%A5.%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%82%20%D0%A0%D0%A3%D0%A2%20(%D0%9C%D0%98%D0%98%D0%A2).pdf?id_wm=1017078).

6. RANGEVISION. Setting up and calibrating of PRO: electronic guidance; 2020.
7. ScanCenter NG. Scanning and treatment 2020.2: electronic guidance; 2020.
8. User Manual. Optical three-dimensional scanners RangeVision PRO. ScanCenter NG 2020.2, 2020.

Информация об авторах:

Елисейкин Евгений Игоревич – аспирант Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, тел. (915) 973-76-44.

Худорошко Максим Викторович – кандидат технических наук, руководитель проектов отдела управления проектами научного центра «Тяговый подвижной

состав» Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, тел. (926) 279-39-92.

Рафиков Рафик Хайдарович – кандидат технических наук, докторант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», тел. (920) 127-65-42.

Eliseikin Evgeny Igorevich – Postgraduate Student of Railway Research Institute of JSC Russian Railways, phone: (915) 973-76-44.

Khudorozhko Maksim Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Project Manager of the Project Management Department at the Traction Mobile Plant Scien-

tific Center of Railway Research Institute of JSC Russian Railways, phone: (926) 279-39-92.

Rafikov Rafik Haidarovich – Candidate of Technical Sciences, Doctoral student of the Department of Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock, phone: (920) 127-65-42.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025; одобрена после рецензирования 20.05.2025; принята к публикации 26.05.2025. Рецензент – Петров Г.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта

The article was submitted to the editorial office on 05.05.2025; approved after review on 20.05.2025; accepted for publication on 26.05.2025. The reviewer is Petrov G.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Cars and Car Facilities at the Russian University of Transport.