

Научная статья

УДК 621.271

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-50-56

Великанов Владимир Семенович<sup>1,2,3\*</sup>, Дремин Александр Владимирович<sup>3</sup>,  
Лукашук Ольга Анатольевна<sup>2</sup>, Чернухин Станислав Алексеевич<sup>1</sup>,  
Лукашук Михаил Дмитриевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный горный университет<sup>2</sup>Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина<sup>3</sup>ООО «ДАВТЕХ»

\*E-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

## ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ТЕРОТЕХНОЛОГИЯ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

### Аннотация.

В настоящее время наблюдается быстрый рост применения цифровых технологий во многих областях человеческой деятельности. В 2018 г. в РФ утверждена национальная программа «Цифровая экономика РФ», цель программы – общесистемное развитие и внедрение цифровых технологий во все области жизни. Термин «Индустрия 4.0» в общем понимании применяется для характеристики новых, передовых и потенциально прорывных технологий, включая полную цифровизацию и искусственный интеллект, а также создание нового поколения оборудования, объединенного в одну цифровую экосистему. Цифровая трансформация в горном деле направлена прежде всего на повышение производительности, ставится задача пятикратного роста производительности труда и повышения не менее чем в 2–3 раза основных показателей уровня промышленной и экологической безопасности. Развитие горных работ осуществляется в основном открытым способом, который обеспечивает конкурентные экономические показатели горнодобывающей отрасли. Открытая разработка месторождений полезных ископаемых характеризуется увеличением объемов перерабатываемой горной массы и коэффициентов вскрыши, совершенствуются производственные процессы за счет передовых технологий, что влечет за собой использование горного оборудования большой единичной мощности, поэтому эффективность работы такого оборудования обеспечивается его правильной эксплуатацией, минимизацией затрат на его содержание и ремонт. В статье решены вопросы создания цифрового двойника кабины карьерного гусеничного экскаватора и компьютерного моделирования испытаний на соответствие техническим требованиям, разработана оптимальная конечно-элементная модель кабины машиниста экскаватора. Рассмотрена структура эргономического реинжиниринга кабин карьерных экскаваторов – одного из наиболее эффективных и экономически выгодных способов оптимизации объектов, формализована модель управления эргономическим реинжинирингом. В САПР Autodesk Inventor разработан параметрический 3D-прототип кабины карьерного экскаватора, за основу принята типовая модульная кабина экскаватора типа ЭКГ.



### Информация о статье

Поступила:

01 февраля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 февраля 2024 г.

Принята к печати:

01 марта 2024 г.

Опубликована:

04 апреля 2024 г.

### Ключевые слова:

цифровые технологии, индустрия 4.0, робот; геотехнология; моделирование, управление.

**Для цитирования:** Великанов В.С., Дремин А.В., Лукашук О.А., Чернухин С.А., Лукашук М.Д. Цифровая трансформация горнодобывающих предприятий и теротехнология наземных транспортных средств // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 1 (171). С. 50-56. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-50-56, EDN: LMAZJC

## Введение

В Указе «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» цифровая трансформация рассматривается в качестве приоритетной цели развития страны, без которой невозможно успешное развитие национальной экономики. Эволюция развития промышленной индустрии насчитывает несколько этапов. В настоящий момент развивается «Industry 4.0», которая базируется на цифровых технологиях, киберфизических производственных системах, нацеленных на соединение физического и цифрового производства. Она включает в себя оцифровку и интеграцию цепочек создания стоимости продуктов и услуг. В 2021 году мировой рынок решений для «Industry 4.0» составил 80 миллиардов долларов и растет примерно на 15–20% в год (Рис. 1).

Сохранение горными предприятиями своих конкурентных позиций в условиях глобальной цифровизации и в информационном типе экономики РФ возможно только путем постоянного планомерного внедрения инновационных технических решений.

В 2021 г. в РФ утверждены стандарты в области цифровых двойников. Соответствующий документ, одобренный Росстандартом и вводимый в действие 1 января 2022 года, получил название «Численное моделирование» – ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые



Рис. 1. Реализация цифровых технологий на промышленных предприятиях (данные актуальны на 2019–2022 гг.)

Fig. 1. Implementation of digital technologies in industrial enterprises (data relevant for 2019–2022)

двойники изделий. Общие положения». Национальный стандарт в области цифровых двойников изделий будет распространяться на изделия машиностроения, но при необходимости на его основе в дальнейшем могут разрабатываться стандарты, устанавливающие требования к цифровым двойникам изделий различных отраслей промышленности.

В самом общем понимании цифровой двойник – это виртуальная копия (модель) изделия или процесса, нацеленная на снижение временных и денежных затрат на различных этапах жизненного цикла. Цель достигается в основном за счет высокоточного компьютерного моделирования и применения современных цифровых технологий. Цифровой двойник изделия представляет собой не просто статическую модель, такую, например, как план

здания или трехмерную модель какого-то оборудования (карьерного экскаватора, дробилки и др.). Множество цифровых двойников можно разделить на три группы: прототип – виртуальный аналог реального физического объекта. Он содержит все данные по этому объекту, включая информацию со стадий проектирования и производства, например, требования к изделию, трехмерную модель объекта, описание технологических процессов, условия утилизации и т. д.; экземпляр – данные, описывающие физический объект, например, аннотированную трехмерную модель, сведения о материалах и компонентах изделия, информацию о рабочих про-

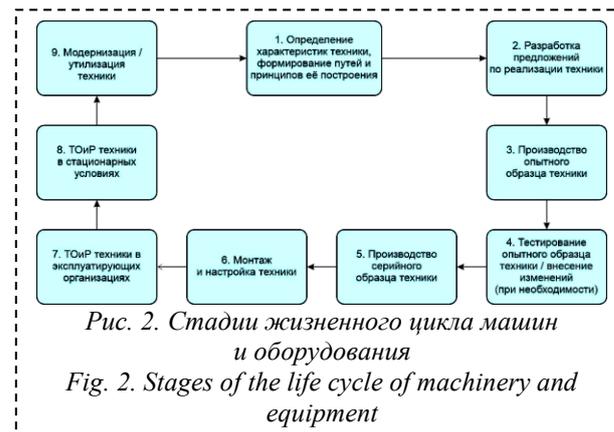


Рис. 2. Стадии жизненного цикла машин и оборудования

Fig. 2. Stages of the life cycle of machinery and equipment

цессах, итоги тестов, записи о проведенных ремонтах, операционные данные от датчиков, параметры мониторинга и пр.; агрегированный двойник – система, которая объединяет все цифровые двойники и их реальные прототипы, позволяя собирать данные и обмениваться ими в реальном времени [1].

В 2020 году происходит активное развитие данной технологии силами различных компаний из различных областей промышленности. Работы ведутся разработчиками программного обеспечения (Siemens PLM Software, Dassault Systemes, ANSYS, PTC и др.), промышленными компаниями (Siemens, General Electric, Boeing, Airbus), а также предприятиями, специализирующимися на IT-технологиях [1].

Современный вектор инновационного развития горных машин, оборудования и технологических систем проявляется в увеличении сложности конструкции и многофункциональности техники. По оценкам различных экспертов [2, 3], в среднем парк отечественного горного оборудования нуждается в обновлении на 40–60%.

Анализ публикаций и патентный поиск по заявленной проблематике показал, что в основном исследуются либо узкие области поддержки эксплуатации горных машин, либо процессы управления жизненным циклом машин в целом. Жизненный цикл техники представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов последовательного изменения состояния техники от определения характеристик, формирования путей и принципов, от разработки до модернизации или утилизации. Стадии жизненного цикла представляют собой часть жизненного цикла изделия, характеризующихся определенным состоянием техники (Рис. 2).

Сложилась проблемная ситуация, суть которой заключается в том, что разработанный научно-методический инструментарий не учитывает особенности процессов на всех этапах жизненного цикла машин и оборудования и не позволяет оперативно прогнозировать весь диапазон возможных

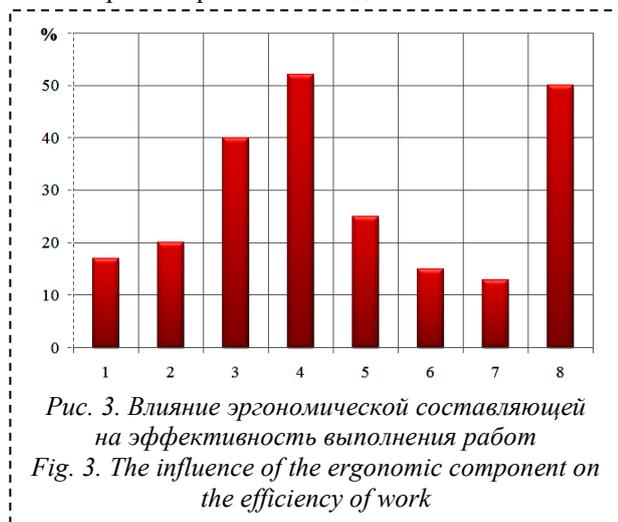


Рис. 3. Влияние эргономической составляющей на эффективность выполнения работ

Fig. 3. The influence of the ergonomic component on the efficiency of work

сценариев в течение всего срока эксплуатации техники.

Теротехнология – технология обеспечения эффективного функционирования оборудования в течение всего срока службы. Она увязывает это обеспечение с качеством проектирования, монтажа и эксплуатации оборудования. Теротехнологический подход позволяет удерживать заданную производительность отдельных машин и их комплексов при оптимизации затрат в период эксплуатации с учетом действующих технических, технологических и организационных факторов как эргатической системы. Это предоставляет дополнительные возможности для улучшения конструкции и производства эксплуатируемого оборудования, создавая и используя обратные связи при широком применении диагностических процедур в его регламентном техническом обслуживании.

Для подтверждения актуальности заявленного подхода в данной публикации представлен частный случай эргономического реинжиниринга, сразу конкретизируем область исследований – представлено создание цифрового двойника не всего карьерного экскаватора, а отдельной его части – кабины. Значительная часть технических средств, используемых в горнодобывающей промышленности, требует присутствия человека (оператора), поэтому совершенствование конструкций рабочего места для обеспечения максимальной безопасности условий труда, несомненно, актуальная задача. Эффективность труда напрямую зависит от эргономичности и удобства рабочего места. Для наглядного представления о повышении эффективности работы в целом при использовании эргономичных рабочих мест имеется следующая статистика (Рис. 3) [4].

На диаграмме (Рис. 3) приведены следующие данные: 1 – повышение общей эффективности работы; 2 – повышение производительности труда; 3

– повышение работоспособности; 4 – повышение точности и безошибочности работы; 5 – сокращение времени выполнения рабочих функций; 6 – сокращение трудозатрат на разработку средств взаимодействия оператора с рабочим местом; 7 – сокращение уровня заболеваемости; 8 – сокращение числа аварий и катастроф.

#### Методика проведения исследования

Важное требование при создании любой технологической машины, управляемой человеком – обеспечение безопасности ее конструкции в целом и безопасности рабочего места машиниста. В соответствии с требованиями металлоконструкции кабины горных технологических машин должны иметь достаточную прочность и несущую способность по прилагаемым знакопеременным динамическим нагрузкам. Конструктивное исполнение таких требований должно обеспечивать эффективное поглощение энергии удара с сохранением остаточного пространства внутри кабины для безопасности машиниста [5].

На основе обработки большого объема научно-технической литературы на этапе анализа кабин карьерных экскаваторов рассмотрено следующее:

- современные тенденции в дизайне кабин технологических машин;
- кабины зарубежных аналогов ЭКГ и их дизайнерские решения;
- компоновка приборов управления в соответствии с эргономическими требованиями и возможностью применения современных систем управления основными электроприводами;
- остекление кабины;
- применение системы отопления, вентиляции и кондиционирования;
- снижение вибрации;
- внутренняя облицовка;
- качество осветительных приборов.

Практика создания кабин наземных транспортно-технологических машин заключается в нахождении оптимального соотношения между требуемыми техническими показателями и экономической целесообразностью реализации тех или иных проектных решений. В общем случае необходим определенный компромисс, который обеспечивается минимизацией экономических затрат при сохранении нормируемых технических показателей конструктивной защиты кабины. Необходимо отметить, что вопросы обеспечения безопасности кабин и моделирование их испытаний, реализованные в виде расчетных программных комплексов, достаточно подробно представлены в многочисленных научных публикациях.

Функции по управлению наземными погрузочными, транспортными средствами осуществляются с его определенной части, а именно из кабины. В мировой практике имеется следующая классификация кабин [16]: Falling Object Protective Structures (FOPs) – структура кабины защищает от падающих объектов; Rock Slide Protective Structures (RSPs) – структура кабины защищает от ударов с энергией, по крайней мере 60 кДж; Roll Over Protective Structures (ROPSs) – проходные защит-

ные конструкции (ROPS), защищают при опрокидывания машины; Tip Over Protective Structures (TOPSs) – имеют структуру, эквивалентную ROPS и выделенную к меньшим, так называемым компактным экскаваторам.

В работах [5-9] предприняты попытки использования цифровых технологий, а именно метода виртуального прототипирования при создании и модернизации кабин горнотранспортных машин, которые производятся малыми сериями или в виде отдельных экземпляров. Метод позволяет, с одной стороны, оценить технические разработки до их воплощения в действующие конструкции, а с другой – проводить модернизацию и оценку кабин-прототипов на основе антропотехнических критериев с использованием аппаратных и программных возможностей, причем критериями оценки виртуального прототипа служат две основные группы: технические и антропотехнические.

### Результаты и их обсуждение

В САПР Autodesk Inventor нами создан параметрический цифровой двойник кабины карьерного экскаватора.

Autodesk Inventor – система трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования, предназначенная для создания цифровых прототипов любых промышленных изделий. Autodesk Inventor обеспечивает полный цикл проектирования и создания конструкторской документации:

- моделирование (2D-/3D) с возможностью визуализации проектов;
- разработка различного рода изделий из листового материала с возможностью создания разверток;
- проектирование электрических систем;

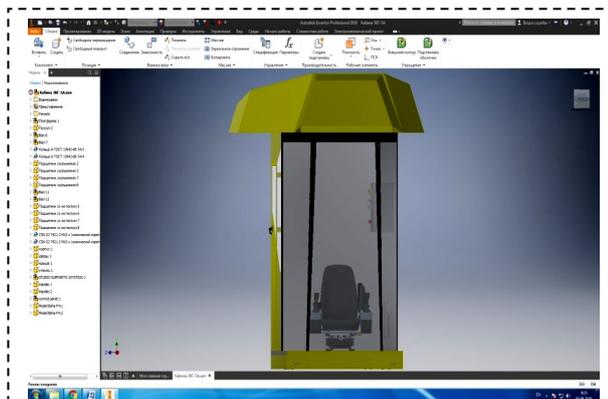


Рис. 4. Цифровой двойник кабины карьерного экскаватора в соответствии RSPSs

Fig. 4. The digital twin of the cabin of the quarry excavator in accordance with the RSPSs

- проекты для литья пластика;
- динамическое моделирование;
- параметрический расчет напряженно-деформированного состояния деталей и сборок;
- актуальное обновление конструкторской документации.

Нами проанализирован процесс выполнения задач по экскавации горной массы, рабочие операции, выполняемые оператором, и его взаимодей-

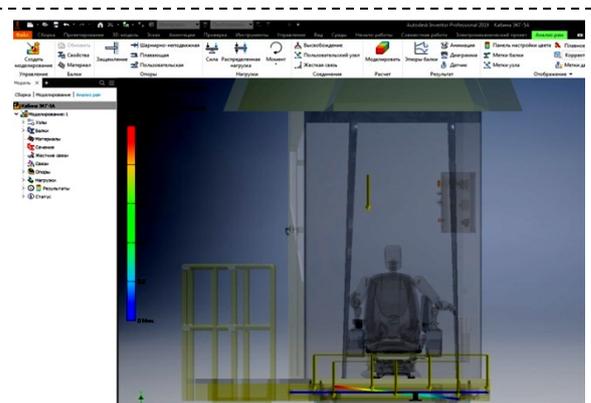


Рис. 5. Визуализация данных испытаний кабины карьерного экскаватора

Fig. 5. Visualization of the test data of a quarry excavator cabin

ствие с органами управления и средствами визуализации, использован опыт и знания мировых и отечественных разработчиков горной техники, а также учтена дополнительная информация: жесткое соединение сиденья с кабиной, толщина листов обшивки каркаса, площадь остекления.

В силу специфики компоновки карьерного экскаватора и габаритных размеров кабины необходимо, чтобы цифровой двойник кабины соответствовал не только всем заданным геометрическим размерам, но и был оптимальным по пространственным характеристикам и максимально удобным и безопасным по эксплуатационным качествам.

Реализованный цифровой двойник (ЦД) кабины карьерного экскаватора позволяет оценивать обзорность с РМ оператора, оценку визуальной информативности производственной зоны и рабочего пространства оператора. ЦД кабины была дополнена виртуальной моделью оператора. Антропометрические характеристики оператора экскаватора определяют соответствие размеров кабины к форме тела человека, к распределению массы его тела, при этом учитываются не только собственно анатомические особенности, но и возможность движений с учетом рабочего положения во время активного использования оборудования кабины экскаватора (Рис. 4, 5) [4, 10-15].

### Выводы

На современном этапе развития мировой горнодобывающей промышленности определяющими факторами в достижении высоких технико-экономических показателей является комплексное решение теоретических и прикладных проблем горной отрасли в контексте реализации основных подходов Индустрии 4.0. Современный вектор развития открытых горных работ предполагает значительное увеличение объемов перерабатываемой горной массы и добычи полезных ископаемых на глубоких горизонтах карьеров. Это предполагает использование современных высокопроизводительных горных машин и оборудования, реализацию передовых технологий и совершенствование технологии добычи. Высокая эффективность использования современных технологических машин достигается не только их правильной эксплуатаци-

ей, минимизацией затрат на техническое обслуживание и ремонт, но и улучшением эргономических показателей кабин горных машин.

Таким образом, увязывая воедино теротехнологический подход и виртуальный аналог реального физического объекта (цифровой), возможно достигнуть при разработке нового изделия эксплуатационного взаимодействия с высокоточными виртуальными моделями и оставлять комментарии для оптимизации машины. Для существующих объектов цифровой двойник может фиксировать и анализировать поведение машины в режиме реального времени, более раннее прогнозирование отказов и обнаружение дефектов, улучшение конструкции и технологии изготовления; повышение производительности производственного оборудования; повышение общего качества.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинов В. Л., Богданец С. В. Цифровые двойники турбомашин: учебное пособие: М-во науки и высш. образования РФ. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. 2022. 162 с.
2. Мельник В. Ю., Камаев В. А., Кизим А. В. Применение неметрического метода Парето для задачи планирования технического обслуживания и ремонта // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. №11(84). ВолгГТУ. Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ. 2011. Вып. №12. С. 103–106.
3. Velikanov V. S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logic model // Journal of Mining Institute. 2020. Vol. 241. P. 29–36.
4. Великанов В. С. Возможности виртуального прототипирования в эргономическом реинжиниринге рабочих мест горных и строительных машин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 5–2. С. 211–216.
5. Aramaa S, Vaananen K. Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design // Applied ergonomics. 2016. Vol. 56. P. 11–18.
6. Chakraborty P. R., Bise C. J. A virtual-reality-based model for task-training of equipment operators in the mining industry // Mineral resources engineering. 2000. Vol. 9. Ed. 4. P. 437–449.
7. Du Y., Dorneich M. C., Steward B. Virtual operator modeling method for excavator trenching // Automation in construction. 2016. Vol. 70. P. 14–25.
8. Tokarczyk J. Method for virtual prototyping of cabins of mining machines operators // Archives of mining sciences. 2015. Vol. 60. Ed. 1. P. 329–340.
9. Kushwaha D. K., Kane P. V. Ergonomic assessment and workstation design of shipping crane cabin in steel industry // International journal of industrial ergonomics. 2015. Vol. 52. P. 29–39.
10. Высоцкий М. С., Багаев Е. А., Баулин С. С. [и др.] Виртуальные испытания – инструмент оценки безопасности конструкций АТС // Автомобильная промышленность. 2011. № 2. С. 38–40.
11. Вьюшина М. Н., Жура В. П., Кривенко А. Е. Математическая модель человека в системе «Оператор – горная машина» // Горн. информ.-аналит. бюл. 1996. № 4. С. 91–93.
12. Журавлев А. В. Разработка математической модели несущей системы кабины с использованием современных систем инженерного анализа // Международный научный журнал. 2012. № 1. С. 89–91.
13. Журавлев А. В., Козловская М. А. Результаты экспериментальных исследований несущего каркаса кабины опытного образца малогабаритного транспортного средства // Международный. техн.-экон. журнал. 2011. № 2. С. 128–133.
14. Красюков Н. Ф., Протопопов А. Л., Шашкова Е. В. Численное моделирование эксплуатационной нагруженности экипажных частей // Вестн. науч.-исслед. и конструктор.-технолог. ин-та подвижного состава. 2012. № 4. С. 104–113.
15. Махутов Н. А., Гапанович В. А., Косов В. С. [и др.] Методы определения ресурса и циклической прочности конструкций экипажной части локомотивов // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 10. С. 3–12.

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Великанов Владимир Семенович**, доктор техн. наук, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), ООО «ДАВТЕХ», (620073, Россия, г. Екатеринбург, ул. Родонитовая, 186), v.s.velikanov@urfu.ru

**Дремин Александр Владимирович**, генеральный директор ООО «ДАВТЕХ», (620073, Россия, г. Екатеринбург, ул. Родонитовая, 186)

**Лукашук Ольга Анатольевна**, кандидат техн. наук, заведующий кафедрой подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Чернухин Станислав Алексеевич**, кандидат техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Лукашук Михаил Дмитриевич, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19).

*Заявленный вклад авторов:*

Великанов Владимир Семенович – постановка исследовательской задачи, создание цифрового двойника, обработка результатов моделирования, написание текста.

Дремин Александр Владимирович – научный менеджмент, концептуализация исследований.

Лукашук Ольга Анатольевна – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследований, выводы; написание текста.

Чернухин Станислав Алексеевич – сбор и анализ данных, создание цифрового двойника, обработка результатов моделирования.

Лукашук Михаил Дмитриевич – сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-50-56

Vladimir S. Velikanov <sup>1,2,3\*</sup>, Aleksandr V. Dremin <sup>3</sup>, Olga A. Lukashuk <sup>2</sup>, Stanislav A. Chernuhin <sup>1</sup>, Mihail D. Lukashuk <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural State Mining University

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

<sup>3</sup>DAVTECH LLC

\*E-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

## DIGITAL TRANSFORMATION MINING ENTERPRISES AND TEROTECHNOLOGY GROUND VEHICLES

### *Abstract.*

*Currently, there is a rapid increase in the use of digital technologies in many areas of human activity. In 2018, the national program “Digital Economy of the Russian Federation” was approved; the goal of the program is the system-wide development and implementation of digital technologies in all areas of life. The term “Industry 4.0” is used in a general sense to characterize new, advanced and potentially breakthrough technologies, including full digitalization and artificial intelligence, as well as the creation of a new generation of equipment, combined into one digital ecosystem. Digital transformation in mining is aimed primarily at increasing productivity; the goal is to increase labor productivity fivefold and increase key indicators of the level of industrial and environmental safety by at least 2–3 times. The development of mining operations is carried out mainly by open-pit mining, which ensures competitive economic indicators of the mining industry. Open-pit mining of mineral deposits is characterized by an increase in the volume of processed rock mass and stripping ratios, production processes are being improved due to advanced technologies, which entails the use of mining equipment of large unit capacity, therefore the efficiency of operation of such equipment is ensured by its proper usage, minimization of expenses for its maintenance and repair. The article solves the problems of creating a digital twin of the cabin of an open-pit crawler excavator and computer simulation of tests for compliance with technical requirements, and an optimal finite element model of the excavator driver’s cabin is developed. The structure of ergonomic reengineering of mining excavator cabins is considered - one of the most effective and cost-effective ways to optimize objects; a model for managing ergonomic reengineering is formalized. A parametric 3D prototype of a mining excavator cabin has been developed in the Autodesk Inventor CAD system, based on a standard modular cabin of an ECG type excavator.*



### *Article info*

*Received:*

*01 February 2024*

*Accepted for publication:*

*15 February 2024*

*Accepted:*

*01 March 2024*

*Published:*

*04 April 2024*

**Keywords:** *digital technologies, industry 4.0, robot; geotechnology; modeling, control*

#### REFERENCES

1. Blinov V.L., Bogdanets S.V. Digital twin turbomachines: M-in science and higher education. education of the Russian Federation. Yekaterinburg: Ural Publishing House. univ.; 2022. 162 p.
2. Melnik V.Yu., Kamaev V.A., Kizim A.V. Application of the non-metric Pareto method for the task of planning maintenance and repair. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: mezhvuz. sb. scientific. st.*, Volgograd: IUNL VolgSTU; 2011, 12:103.
3. Velikanov V. S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logic model. *Journal of Mining Institute*. 2020; 241:29.
4. Velikanov V. S. The possibilities of virtual prototyping in the ergonomic reengineering of mining and construction machinery workplaces. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017; 5-2:211.
5. Aromaa S., Vaananen K. Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design. *Applied ergonomics*. 2016; 56:11.
6. Chakraborty P.R., Bise C.J. A virtual-reality-based model for task-training of equipment operators in the mining industry. *Mineral resources engineering*. 2000; 9(4):437.
7. Du Y., Dorneich M.C., Steward B. Virtual operator modeling method for excavator trenching. *Automation in construction*. 2016; 70:14.

8. Tokarczyk J. Method for virtual prototyping of cabins of mining machines operators. *Archives of mining sciences*. 2015; 60(1):329.
9. Kushwaha D.K., Kane P.V. Ergonomic assessment and workstation design of shipping crane cabin in steel industry. *International journal of industrial ergonomics*. 2015; 52:29.
10. Vysotsky M.S., Bagaev E.A., Baulin S.S., etc. Virtual tests – a tool for assessing the safety of PBX structures. *Automotive industry*. 2011; 2:38.
11. Vyushina M.N., Zhura V.P., Krivenko A.E. Mathematical model of a person in the system "Operator – mining machine". *Gorn. inform.-analit. byul.* 1996; 4:91.
12. Zhuravlev A.V. Development of a mathematical model of the cabin carrier system using modern engineering analysis systems. *International Scientific Journal*. 2012; 1:89.
13. Zhuravlev A.V., Kozlovskaya M.A. Results of experimental studies of the supporting frame of the cockpit of a prototype small-sized vehicle. *International. tech.- econ. Journal*. 2011; 2:128.
14. Krasnyukov N.F., Protopopov A.L., Shashkova E.V. Numerical modeling of operational loading of crew units. *Vestn. scientific research and the designer.-technologist. in-ta rolling stock*. 2012; 4:104.
15. Makhutov N.A., Gapanovich V.A., Kossov V.S. [et al.] Methods for determining the resource and cyclic strength of structures of the crew part of locomotives. *Transport: science, technology, management*. 2016; 10:3.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declares no conflict of interest.

About the author:

**Vladimir S. Velikanov**, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Ural Federal University (19 Mira str., Yekaterinburg, 620002, Russia), Ural State Mining University (30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, 620144, Russia), DAVTECH LLC, (620073, Russia, Ekaterinburg, Rodonitovaya Street, 18b), e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

**Aleksandr V. Dremin**, general manager, DAVTECH LLC, (620073, Russia, Ekaterinburg, Rodonitovaya Street, 18b)

**Olga A. Lukashuk**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Ural Federal University (19 Mira str., Yekaterinburg, 620002, Russia)

**Stanislav A. Chernuhin**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Ural State Mining University (30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, 620144, Russia)

**Mihail D. Lukashuk**, graduate student, Ural Federal University (19 Mira str., Yekaterinburg, 620002, Russia)

Contribution of the authors:

Vladimir S. Velikanov – setting a research task, creating a digital double, processing modeling results, writing text.

Aleksandr V. Dremin – scientific management, conceptualization of research.

Olga A. Lukashuk – formulation of a research task, conceptualization of research, conclusions; writing a text.

Stanislav A. Chernuhin – data collection and analysis, creation of a digital double, processing of simulation results.

Mihail D. Lukashuk – data collection and analysis; review of relevant literature.

Author have read and approved the final manuscript.

