

Современные аспекты создания горнотранспортных машин в условиях цифровой трансформации горных предприятий

В.С. Великанов^{1, 2}✉, И.А. Гришин³, З.С. Акманова³, О.А. Лукашук¹, А.Д. Лукашук¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация
✉ v.s.velikanov@urfu.ru

Резюме: Актуальность работы. Эффективная добыча и переработка полезных ископаемых определяется правильно-стью стратегии выбора техники и технологии при производстве работ. Современные тенденции развития машин, обо-рудования и технологических систем проявляются в увеличении сложности конструкции и многофункциональности горнодобывающей техники. По этой причине акцент при создании новых образцов смещается на более подробное исследование характеристик изделия на этапах разработки до натуральных испытаний, что позволяет главным образом снизить временные и денежные затраты на разработку изделия и повысить вероятность выхода машины на рынок. Это предоставляет дополнительные возможности для улучшения конструкции и производства горного оборудова-ния, создавая и используя обратные связи при широком применении испытательных и диагностических процедур. **Методы.** При решении поставленных задач использовался комплексный подход, включающий: системный науч-ный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований. **Результаты.** Проведено моделирование и расчет ка-бины карьерного экскаватора в приложении программы «Компас 3Д» АРМ FEM. «Расчетным ядром системы АРМ FEM для КОМПАС-3Д является программное средство «Конечно-элементная программная система АРМ Structure3D». **Практическая значимость.** Данный подход может быть реализован в разработке перспективных конструкций кабин горнотранспортных машин.

Ключевые слова: цифровизация, цифровой двойник, теротехнология, горные машины, конечно-элементная про-граммная система

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (про-ект № FRZU-2023-0008).

Для цитирования: Великанов В.С., Гришин И.А., Акманова З.С., Лукашук О.А., Лукашук А.Д. Современные аспекты соз-дания горнотранспортных машин в условиях цифровой трансформации горных предприятий. *Горная промышленность*. 2024;(5S):28–32. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-28-32>

Contemporary aspects of designing mining transport machines in the context of digital transformation of mining operations

V.S. Velikanov^{1, 2}✉, I.A. Grishin³, Z.S. Akmanova³, O.A. Lukashuk¹, A.D. Lukashuk¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

³ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

✉ v.s.velikanov@urfu.ru

Abstract: Relevance of research. The efficiency of mining and mineral processing is determined by the correct selection strategy for equipment and technology in the production process. Modern trends in the development of machinery, equipment and technological systems are manifested in the increasing complexity of the mechanical design and multifunctionality of mining equipment. For this reason, the focus of new designs is shifting to a more detailed study of the product performance during the development stages prior to full-scale testing, primarily to reduce the time and cost of product development and increase the chances for the machine to reach the market. This provides additional opportunities to improve the design and manufacturing of mining equipment by creating and utilising feedback while extensively applying testing and diagnostic procedures.

Methods. A complex approach that included a system scientific analysis and generalization of previously published studies was used in addressing the tasks set. **Results.** Modelling and calculation of the operator's cabin for a mining excavator has been performed in the COMPAS-3D software application of the APM FEM System. The calculation core of the APM FEM System for the COMPAS-3D is the "Finite Element Software System APM Structure3D" software tool. **Practical value.** This approach can be implemented in the development of promising designs of operator cabins for mining transport machines.

Keywords: digitalisation, digital twin, life cycle costing, mining machines, finite element software system

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FRZU-2023-0008).

For citation: Velikanov V.S., Grishin I.A., Akmanova Z.S., Lukashuk O.A., Lukashuk A.D. Contemporary aspects of designing mining transport machines in the context of digital transformation of mining operations. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S): 28–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-28-32>

Введение

Указ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» рассматривает цифровую трансформацию в качестве приоритетной цели развития страны, без которой невозможно успешное функционирование национальной экономики. Сохранение предприятиями своих конкурентных позиций в условиях глобальной цифровизации и в информационном типе экономики возможно только путем постоянного внедрения инноваций. Как показывают исследования, 90% руководителей промышленных компаний считают, что цифровизация предлагает больше возможностей, чем рисков, 98% респондентов считают, что повышение эффективности является основной причиной инвестирования в цифровую трансформацию¹ [1–3].

Технология цифровых двойников предусматривает создание виртуальных представителей физических активов или систем, т.е. промышленной машины, производственной линии или даже завода в целом для моделирования их состояния и производительности. Цифровые двойники представляют собой непрерывно обучающиеся на основе алгоритмов машинного обучения системы, что делает их адаптируемыми к изменениям в состоянии и конфигурации физических двойников [4]. Цифровой двойник (ЦД) изделия представляет собой систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. Цифровой двойник изделия представляет собой не просто статическую модель, такую, например, как план здания или трехмерную модель какого-то оборудования. Он отражает текущее состояние сущности, опираясь на телеметрию реального времени, поступающую от различных датчиков и сенсоров, установленных в изделии.

Теротехнология – это технология обеспечения эффективного функционирования горной машины в течение всего срока службы с учетом технологических, технических и организационных факторов и связей между ними, основанная на непрерывном выявлении и устранении причин, снижающих эффективность функционирования ресурс определяющих элементов. 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 испытательных и диагностических процедур [3].

Современные тенденции развития машин, оборудования и технологических систем проявляются в увеличении сложности конструкции и многофункциональности техники. По этой причине акцент при разработке смещается на более подробное исследование характеристик изделия на этапах разработки до натуральных испытаний, что позволяет главным образом снизить временные и денежные затраты на разработку изделия и повысить вероятность выхода машины на рынок. При разработке горнотранспортных машин (ГТМ) эксплуатационный персонал может взаимодействовать с высокоточными виртуальными моделями и оставлять комментарии для оптимизации изделия. Для существующих объектов ЦД может записывать и анализировать поведение продукта в режиме реального времени, что в некоторой степени может отражать привычки пользователей. Основываясь на этих данных, можно улучшить изделие таким образом, чтобы оно еще более точно отвечало на запросы эксплуатационного персонала.

Результаты и их осуждение

Нами в работе решается задача создания цифрового двойника кабины горнотранспортной техники. При создании кабин техники для нужд добычной промышленности, дорожных и строительных работ необходимо провести ряд тестов с целью определения прочности конструкции при различных аварийных ситуациях, наличия опасности для жизни человека. В настоящее время физические испытания проводят после многочисленного моделирования аварии на компьютере. Нами проанализированы процессы выполнения операторских функций, взаимодействие оператора с органами управления и средствами визуализации, изучены опыт и знания мировых и отечественных разработчиков данной техники, а также учтена дополнительная специфичная информация: жесткое соединение сиденья с кабиной, толщина листов обшивки каркаса, площадь остекления и др. (рис. 1).

Компоновочные решения предполагают использование в конструкции модульных кабин. Стандарты ROPS и FOPS регламентируют проектирование и производство кабин операторов с использованием конструктивных элементов безопасности и являются обязательным условием для

¹ Цифровой завод. MES система завода. Интегратор. 2050. Режим доступа: <https://2050-integrator.com/digital-factory/?ysclid=m2dbj85bs3956997220> (дата обращения: 11.08.2024).

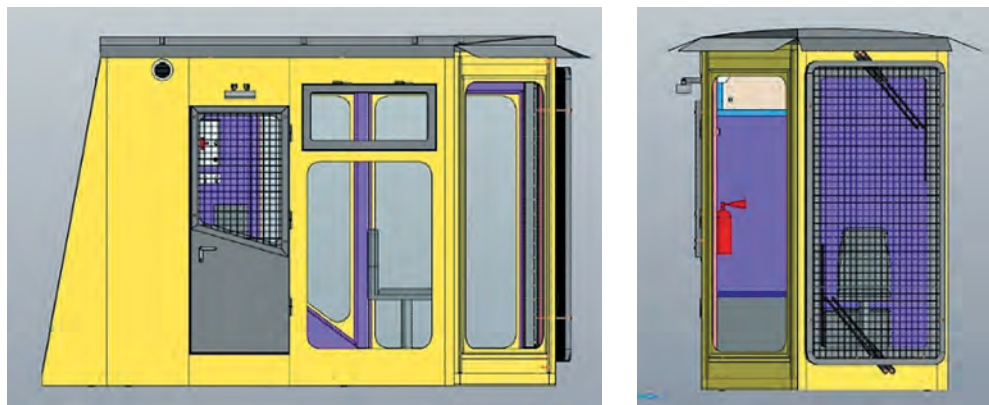


Рис. 1
Цифровой двойник кабины

Fig. 1
A digital twin of the operator cabin

сертификации. Практика создания кабин горных 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 конструкционной 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. В табл. 1 с учетом опыта ранее выполненных

работ представлены результаты краткого обзора по моделированию испытаний кабин различных машин [5–15].

Расчеты на прочность кабины ГТМ нужны для проверки прочности каркаса кабины на ударные нагрузки. Для расчетов на прочность каркаса обратимся к ГОСТ Р ИСО 3449–2009 «Машины землеройные. Устройства защиты от падающих предметов. Лабораторные испытания и технические требования» Согласно ГОСТ Р ИСО 10262–2016 принимают два уровня защиты от проникновения: первый уровень I принимается для защиты от мелких предметов, таких как мелкие камни, строительный мусор; второй уровень II принимается для защиты от крупных объектов, таких как крупные камни кусковой породы, дерева. Кабина для разрабатываемой ГТМ подвержена испытанию второго уровня. Данные испытания – это испытания образца FOPS (рис. 2).

Таблица 1
Результаты моделирования кабин горнотранспортных машин

Table 1
Results of modelling operator cabins for mining transport machines

| Машина | Цифровой двойник | Результаты нагружения кабины |
|-----------|------------------|------------------------------|
| Локомотив | | |
| Самосвал | | |
| Бульдозер | | |

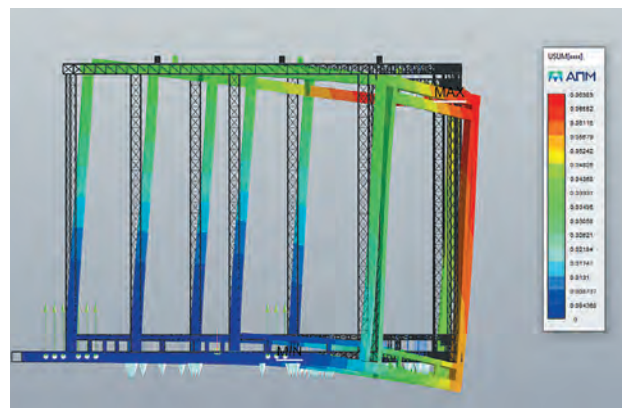


Рис. 2
Суммарное перемещение каркаса кабины

Fig. 2
Total displacement of the cabin frame

В качестве программы для расчетов было выбрано приложение программы «Компас 3Д» АРМ FEM. «Расчетным ядром системы АРМ FEM для КОМПАС-3D является программное средство «Конечно-элементная программная система АРМ Structure3D», имеющее Аттестационный паспорт №330 от 18.04.2013 г., выданный Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), ФБУ «НТЦ ЯРБ» – информация про приложение программы «Компас 3Д» АРМ FEM. Для расчета модели был принят материал каркаса кабины – сталь 09Г2С по ГОСТ 19281–2014. Предел текучести данного материа-

ла составляет $\sigma_{02} = 345$ МПа; временное сопротивление $\sigma_{02} = 490$ МПа; допускаемые напряжения примем $\sigma_{доп} = 150$ МПа. Масса каркаса кабины составила 1277 кг. Конструкция сварная. Модель разбита на сетку из 4-узловых тетраэдров с минимальной длиной стороны элемента 100 мм. Количество конечных элементов равняется 91 276, а количество узлов равно 31 849.

После обработки данных программой были получены данные по суммарному линейному перемещению карка-

са кабины при воздействии нагрузок, данные по эквивалентным напряжениям по Мизесу, коэффициент запаса текучести в результате воздействия нагрузок на кабину. Суммарное линейное перемещение каркаса кабины в результате нагрузок приведено на рис. 2. Серым показано недеформированное состояние каркаса, красным – максимальное значение перемещения кабины, равное 0.070 мм, что в 40 429 раз меньше высоты кабины.

Список литературы / References

1. Княгин В.Н. *Цифровая трансформация: бизнес-модели и рыночные игроки*. М.: Сколково; 2019.
2. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Korotkova A.N., Dyorina K.S. The challenges of Industry 4.0 and the need for new answers in the mining industry. *News of the Ural State Mining University*. 2021;(2):154–166. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-154-166>
3. 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):50–56. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-1-50-56>
Velikanov V.S., Dremmin A.V., Lukashuk O.A., Chernuhin S.A., Lukashuk M.D. Digital transformation mining enterprises and terotechnology ground vehicles. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024;(1):50–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-1-50-56>
4. Блинов В.Л., Богданец С.В. *Цифровые двойники турбомашин*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2022. 162 с. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/117116> (дата обращения: 11.08.2024).
5. Великанов В.С., Ильина Е.А., Кочержинская Ю.В. Визуализация и анализ информации на основе компьютерного моделирования испытаний кабины карьерного гусеничного экскаватора на соответствие требованиям безопасности. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2022;(3):196–206. Режим доступа: <https://ojs.ircgups.ru/index.php/stsam/article/view/804> (дата обращения: 11.08.2024).
Velikanov V.S., Il'ina E.A., Kocherzhinskaya Yu.V. Visualization and analysis of information based on computer simulation of the quarry tracked excavator cabin tests for the compliance with safety requirements. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2022;(3):196–206. (In Russ.) Available at: <https://ojs.ircgups.ru/index.php/stsam/article/view/804> (accessed: 11.08.2024).
6. Журавлев А.В. Разработка математической модели несущей системы кабины с использованием современных систем инженерного анализа. *Международный научный журнал*. 2012;(1):100–103.
Zhuravlev A.V. Developing mathematical model of cab supporting system applying modern systems of engineering analysis. *International Scientific Journal*. 2012;(1):100–103. (In Russ.)
7. Журавлёв А.В., Козловская М.А. Результаты экспериментальных исследований несущего каркаса кабины опытного образца малогабаритного транспортного средства. *Международный технико-экономический журнал*. 2011;(2):128–133.
Zhuravlev A.V., Kozlovskaya M.A. Results of experimental research of load-bearing cabin frame of motor vehicle pre-production model. *International Technical and Economic Journal*. 2011;(2):128–133. (In Russ.)
8. Зузов В.Н., Шабан Б. Совершенствование кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для удовлетворения требованиям пассивной безопасности (при ударе спереди). *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013;(12):33. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-12-1130>
Zuzov V.N., Shaban B. Improving of construction cabs truck at the designing stage to satisfy passive safety requirements at frontal impact. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013;(12):33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-12-1130>
9. Красюков Н.Ф., Оганьян Э.С., Ноздрачева В.А. Моделирование нагруженности конструкции кабины машиниста при столкновении локомотива с препятствием. *Тяжелое машиностроение*. 2006;(8):34–35.
Krasnyukov N.F., Ogan'yan E.S., Nozdracheva V.A. Modelling of the stresses in the operator cab structure in case of the hauling engine's collision with an obstacle. *Tyazheloje Mashinostroyeniye*. 2006;(8):34–35. (In Russ.)
10. Махутов Н.А., Гапанович В.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С., Красюков Н.Ф., Волохов Г.М. Методы определения ресурса и циклической прочности конструкций экипажной части локомотивов. *Транспорт: наука, техника, управление*. 2016;(10):3–12.
Makhutov N.A., Gapanovich V.A., Kossov V.S., Oganyan E.S., Krasnyukov N.F., Volokhov G.M. Methods of determination of life and cyclic strength of locomotive underframe structures. *Transport: Science, Equipment, Management*. 2016;(10):3–12. (In Russ.)
11. Дзотсенидзе Т.Д., Козловская М.А., Загарин Д.А. Новый технический облик автомобилей и тракторов как способ преодоления кризисных явлений в отечественном машиностроении. *Автомобильная промышленность*. 2020;(10):13–18.
Dzotsenidze T.D., Kozlovskaja M.A., Zagarin D.A. The new technical content of automobiles and tractors as a way to overcome the crisis in domestic engineering. *Avtomobilnaya Promyshlennost*. 2020;(10):13–18. (In Russ.)

12. Дзотсенидзе Т.Д., Ульянов О.В., Козловская М.А., Ильин В.М. Результаты испытаний гусеничного трактора ВТ-155Д с новой верхней надстройкой. *Тракторы и сельхозмашины*. 2011;(12):7–9. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69232>
Dzotsenidze T.D., Ulyanov O.V., Kozlovskaya M.A., Ilyin V.M. Test results of ВТ-155Д caterpillar tractor with a new superstructure. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2011;78(12):7–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69232>
13. Шмелев А.В., Лисовский Э.В., Короткий В.С. Основы методики виртуального моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2015;(3):64–72. Режим доступа: <https://mmmm.by/ru/readers/archive-room?layout=edit&id=624> (дата обращения: 11.08.2024).
Shmelev A.V., Lisovski E.V., Korotki V.S. Basics of the computer simulation procedure for commercial vehicle cab passive safety testing. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2015;(3):64–72. (In Russ.) Available at: <https://mmmm.by/ru/readers/archive-room?layout=edit&id=624> (accessed: 11.08.2024).
14. Dzotsenidze T.D., Zagarin D.A., Kozlovskaya M.A. Use of profiled tubes to create three-dimensional frame-and-panel systems for tractors and automobiles. *Metallurgist*. 2014;58(7-8):717–723. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9983-2>
15. Mirzaamiri R., Esfahanian M., Ziaei-Rad S. Crash test simulation and structure improvement of IKCO 2624 truck according to ECE-R29 regulation. *International Journal of Automotive Engineering*. 2012;2(3):180–192. Available at: <https://ziaeirad.iut.ac.ir/crash-test-simulation-and-structure-improvement-ikco-2624-truck-according-ece-r29-regulation> (accessed: 11.08.2024).

Информация об авторах

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>; e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

Гришин Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8010-7542>; e-mail: igorgi@mail.ru

Акманова Зоя Сергеевна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: z.akmanova@magtu.ru

Лукашук Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, заведующий кафедрой подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4952-0344>; e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru,

Лукашук Алена Дмитриевна – магистр, Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: alena_lukashuk@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.08.2024

Поступила после рецензирования: 16.10.2024

Принята к публикации: 17.10.2024

Information about the authors

Vladimir S. Velikanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation; Professor, Department of Automatics and Computer Technologies, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>; e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

Igor A. Grishin – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8010-7542>; e-mail: igorgi@mail.ru

Zoya S. Akmanova – Cand. Sci. (Educ.), Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Informatics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: z.akmanova@magtu.ru

Olga A. Lukashuk – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4952-0344>; e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru

Alena D. Lukashuk – Master student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: alena_lukashuk@mail.ru

Article info

Received: 19.08.2024

Revised: 16.10.2024

Accepted: 17.10.2024