

Дубинкин Дмитрий Михайлович, кандидат техн. наук, доцент, **Садовец Владимир Юрьевич**, кандидат техн. наук, доцент, **Сыркин Илья Сергеевич**, кандидат техн. наук, доцент, **Чичерин Иван Владимирович**, кандидат техн. наук, доцент

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ КАРЬЕРНЫМ САМОСВАЛОМ

***Аннотация:** в статье представлена разработанная структура системы управления автономным карьерным самосвалом. Выделены условия работы и определена область применения беспилотного карьерного самосвала. Представлены отличия системы управления карьерным самосвалом от традиционной системы управления большегрузными самосвалами. Проанализирована компоновка общей схемы структуры управления автономного карьерного самосвала с выделением основных элементов и устройств системы управления. Проведен анализ структурных единиц системы управления с указанием их технических характеристик. Выделены основные недостатки и особенности системы управления существующих карьерных самосвалов. Сформулированы основные научные и технические задачи, решение которых позволит разработать систему управления автономного карьерного самосвала нового уровня. Представлена разработанная авторами общая структура многоуровневой системы управления автономного карьерного самосвала с подробным описанием системы управления верхнего, среднего и нижнего уровня. Сформулирован вывод о необходимости разработки математических моделей и алгоритмов систем управления автономного карьерного самосвала. Выделены направления дальнейших научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, основными из которых являются разработка требований к оборудованию и формирование списка устройств для обеспечения автономного управления карьерным самосвалом, а также разработка необходимого программного обеспечения взаимодействия подсистем системы управления автономного карьерного самосвала как между собой, так и в системе «Умный карьер».*

***Ключевые слова:** карьерный самосвал, система управления, автономное транспортное средство, «Умный карьер».*

***Информация о статье:** принята 20 ноября 2020 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-25-30*

В настоящее время беспилотные транспортные средства получают широкое распространение в различных областях деятельности человека. Применение беспилотных транспортных средств в промышленности диктуется вредными и опасными условиями работы, а также необходимостью повышения производительности труда.

Применение беспилотных транспортных средств при перемещении грузов позволяет исключить ошибки водителя, вызванные усталостью, ограниченным обзором и т.д. Ограничение распространения автономных транспортных средств связано с высокой стоимостью оборудования, обеспечивающего автономное движение транспортного средства [1÷4, 12, 16, 17].

В данной статье рассматриваются технические решения по организации системы автономного управления транспортного средства, которые решают задачи транспортирования горной массы при разработке месторождения полезного ископаемого открытым способом.

Российская компания «VIST Robotics» в рамках проекта «Интеллектуальный карьер» разработала автоматизированную систему управления карьерными самосвалами, позволяющую исключить человека из опасных и переместить его в более комфортные условия [5÷7]. Основными преимуществами системы являются: безопасность операторов; то, что один оператор может управлять 4÷10 автосамосвалами; повышение производительности на 20%; возможность ведения добычи в труднодоступных и тяжелых по климатическим условиям регионов.

Совместно с «БЕЛАЗ» создан прототип беспилотного карьерного самосвала на базе модели «БелАЗ-7513R» (рис. 1). Самосвал может работать как в автономном режиме, так и в режиме телеуправления.

«БелАЗ-7513R» работает следующим образом: диспетчер выдает системе задание на смену, выделяет требуемое количество единиц техники и производственный маршрут. Грузовики выезжают с парковки на участок и начинают

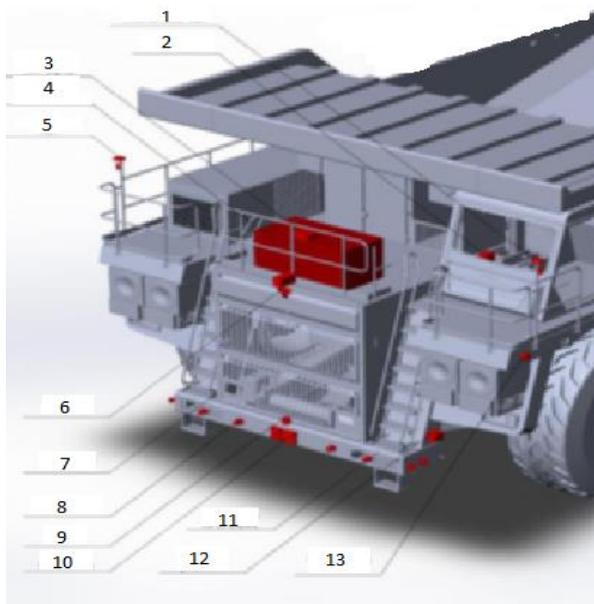


Рис. 1. Основные элементы системы автономного управления движением самосвала БЕЛАЗ-7513R
 1 – приемник GPS; 2 – информационная панель;
 3 – блок мониторинга силового шкафа;
 4 – силовой шкаф; 5 – приемник GPS;
 6 – камера; 7 – датчик движения;
 8 – парктроник; 9 – радар; 10 – лидар;
 11 – парктроник; 12 – камера; 13 – камера кругового обзора.

Fig. 1. The main elements of an autonomous movement control system of BELAZ-7513R dump truck



Рис. 2. Удаленное рабочее место водителя
 Fig. 2. Remote driver's workplace

непрерывную работу – погрузка, дорога, разгрузка. Оператор может переназначить машину на другой маршрут или отправить на стоянку: робот закончит текущий цикл и направится на новое задание [8, 9].

При возникновении сложных условий дистанционное управление на себя берет оператор (рис. 2), который может одновременно контролировать сразу несколько автомобилей.

Система автономного управления движением самосвала БЕЛАЗ-7513R (рис. 1) включает себя

бортовой шкаф управления, расположенный в передней части автомобиля рядом с кабиной водителя. На левом и правом бортах автомобиля установлены два приемника спутниковых навигационных систем [10].

Для визуального контроля используются 11 видеокамер, которые установлены по периметру транспортного средства [11]. В автомобиле применяются защищенные камеры фирмы Orlaco серии EMOS с интерфейсом Ethernet. За обнаружение людей и других объектов на пути следования отвечают несколько радаров «Delphi ESR», работающих в среднем и дальнем диапазоне.

В режиме дальнего радиуса действия угол обзора составляет +/- 10 градусов, дальность действия 174 м. В режиме среднего радиуса действия угол обзора составляет +/- 45 градусов, дальность действия 60 м. Период обновления данных радара 50 мс. В передней части автомобиля установлен 3D-лидар фирмы Quanergy. Лидар Mark VIII QUA-M8 позволяет сканировать пространство на 360° в горизонтальной плоскости и на 20° в вертикальной. Лидар работает в диапазоне 1÷150 м и используется для трехмерного картографирования.

Помимо трехмерного лидара используются двумерные лидары Leddar IS16 фирмы LeddarTech. IS16 представляет собой промышленный твердотельный лидар без движущихся частей и используется для контроля зоны безопасности вокруг автомобиля. Лидар имеет угол обзора 45 градусов, разделенный на 16 сегментов. Дальность действия лидара составляет 50 м.

По периметру автомобиля установлены ультразвуковые датчики (сонары) Banner QT50U. Ультразвуковые датчики используются для обнаружения препятствий на малых расстояниях, диапазон обнаружения датчика составляет 0,2÷8,0 м [14, 15].

Разработкой систем автономного управления карьерными самосвалами уже долгое время занимаются такие фирмы, как Komatsu, Volvo, SCANIA, Caterpillar и другие [14÷17].

Для обеспечения эффективной работы автономного карьерного самосвала необходимо разработать систему управления, реализующую множество задач. Перечень задач, решаемых при управлении автономным карьерным самосвалом, зависит от технических характеристик конкретной модели карьерного самосвала. Особенно это важно при разработке и создании нового типа карьерного самосвала, потому как на этапе формирования конструктивных решений существует возможность адаптирования элементов автономной системы управления в разрабатываемую конструкцию карьерного самосвала.

Задачи, связанные с разработкой системы автономного управления карьерного самосвала, можно разделить на следующие классы:

- управление движением автономного карьерного самосвала по трассе;

- повышение эффективности работы автономного карьерного самосвала;
- позиционирование автономного карьерного самосвала в пространстве;
- управление вспомогательными системами карьерного самосвала;
- диагностика состояния автономного карьерного самосвала;
- взаимодействие системы управления автономного карьерного самосвала с оператором;
- взаимодействие системы управления автономного карьерного самосвала с диспетчерским пунктом;
- взаимодействие системы управления автономного карьерного самосвала с другими устройствами, входящими в систему «Умный карьер».

Задача управления движением автономного карьерного самосвала в первом приближении сводится к задаче управления исполнительными механизмами, основными из которых являются мотор-редукторы, рулевое управление, тормозная система. Мотор-редуктора приводят в движение колеса, а рулевое управление осуществляет маневрирование по трассе автономного карьерного самосвала. Решение этой задачи может быть осуществлено как в ручном, так и автоматическом режимах. В ручном режиме оператор с помощью органов управления включает исполнительные механизмы и меняет параметры их работы для осуществления маневрирования и изменения скорости движения автономного карьерного самосвала. В автоматическом режиме автоматизированная система диспетчеризации задает траекторию и скорость движения, а автономная система управления карьерного самосвала рассчитывает параметры работы исполнительных механизмов и подает на них соответствующие управляющие воздействия.

Задача повышения эффективности работы автономного карьерного самосвала разделяется на две подзадачи:

- повышение эффективности работы автономного карьерного самосвала на основе критериев оптимизации;
- повышение эффективности работы автономного карьерного самосвала на основе использования адаптивных алгоритмов, учитывающих такие внешние факторы, как особенности карьера и динамические параметры самого карьерного самосвала.

Для решения задачи оптимизации необходимо разработать математические модели и интеллектуальные алгоритмы работы системы управления автономного карьерного самосвала, учитывающие взаимосвязь всех его элементов. Эти модели и алгоритмы позволяют подавать на исполнительные механизмы такие управляющие воздействия, при которых работа автономного карьерного самосвала будет удовлетворять заданному критерию оптимизации. Критериями оптимизации могут быть энергозатраты автономного карьерного

самосвала на единицу пути, точность траектории движения и др.

В настоящее время задача ориентации и навигации в пространстве наземных объектов эффективно решается с помощью систем глобального позиционирования (ГЛОНАСС, GPS). Однако для карьерных машин использование таких систем возможно с другими системами позиционирования, основанными на инерциальных системах навигации, так как иногда в карьерах сигналы спутников до них не доходят. Таким образом, разработка системы позиционирования автономного карьерного самосвала в пространстве является предметом дальнейших исследований. Работа такой системы должна быть основана на сочетании технологий спутниковой навигации, одометрических датчиков и инерциальной навигации.

Под вспомогательными системами автономного карьерного самосвала понимаются системы, обеспечивающие основной процесс – движение автономного карьерного самосвала по трассе карьера. К таким системам можно отнести энерго-силовую установку, привод опрокидывания кузова. Задача управления этими принципиально различными системами также должна решаться системой управления автономного карьерного самосвала.

Тяжелые условия эксплуатации автономного карьерного самосвала, а также высокий уровень динамических нагрузок предопределяет особые требования к его надежности. Одним из важных факторов повышения надежности в условиях эксплуатации является техническое диагностирование. Система управления автономного карьерного самосвала должна включать диагностическую подсистему, выполняющую контроль технического состояния путем измерения и индикации параметров элементов автономного карьерного самосвала, устройств автоматики, электрических и гидравлических систем, систем смазки, подшипниковых узлов и т.д.

Основными техническими средствами для осуществления взаимодействия системы управления автономного карьерного самосвала с оператором являются пульт управления и устройство отображения информации. С помощью пульта управления оператор подает управляющие воздействия на подсистемы, исполнительные механизмы и устройства автономного карьерного самосвала, работающего в ручном, полуавтоматическом (автоматизированном) или автоматическом режимах. В полуавтоматическом режиме необходимо решить задачу четкого разделения функций управления между оператором и устройством управления. Устройство отображения информации (монитор) позволяет оператору в режиме реального времени и ретроспективно отслеживать состояние процессов и элементов, наличие аварийных ситуаций, результаты работы системы диагностирования. Также возможна реализация дополнительного звукового и светового



оповещения оператора, например, для сигнализации аварийных ситуаций. Задача системы управления заключается в предоставлении оператору необходимой информации.

Кроме этого, для эффективной работы автономного карьерного самосвала во взаимосвязи с другими горными машинами необходимо решать задачи по моделированию и разработке моделей взаимодействия системы управления автономного карьерного самосвала с диспетчерским пунктом.

С учетом сложности и многообразия сформулированных задач, решаемых при управлении автономным карьерным самосвалом, а также с учетом сложной структуры конструкции автономного карьерного самосвала, состоящего из множества взаимосвязанных систем, была разработана общая структура многоуровневой системы управления автономного карьерного самосвала, которая представлена на рисунке 3.

Система управления верхнего уровня представляет собой информационно-управляющую систему, которая решает задачи координации работы нижестоящих подсистем, обмена информации между этими подсистемами, а также взаимодействия системы управления автономным карьерным самосвалом с оператором и диспетчерским пунктом, диагностики состояния и ориентации автономного карьерного самосвала в пространстве. Средний уровень системы управления представлен подсистемами управления приводами. Нижний уровень представлен подсистемами управления приводами основных и вспомогательных систем (двигателем, мотор-редукторами, тормозной системой, системой рулевого

управления, устройством опрокидывания кузова и т.д.).

Представленные задачи и общая структура системы управления позволяет сделать вывод о том, что задачи, решаемые системой управления автономным карьерным самосвалом, сложны и многообразны. Однако в настоящее время отсутствуют научно обоснованные подходы для разработки, математические модели и алгоритмы систем управления автономного карьерного самосвала. Это сдерживает создание автономного карьерного самосвала, обладающего принципиально новыми характеристиками. Поэтому исследования, направленные на решение этих задач, являются актуальными.

Для продолжения исследований необходимо:

- сформулировать требования, предъявляемые к системе управления автономного карьерного самосвала;
- проанализировать задачи, решаемые системой управления автономного карьерного самосвала;
- разработать структуру, математические модели и алгоритмы работы выделенных подсистем системы управления автономного карьерного самосвала;
- разработать требования к оборудованию для системы управления автономным карьерным самосвалом;
- сформировать список необходимого оборудования для обеспечения автономного управления карьерным самосвалом;
- разработать программное обеспечение, позволяющее моделировать взаимодействие подсистем системы управления автономного карьерного самосвала между собой;
- разработать программное обеспечение, позволяющее моделировать взаимодействие подсистем управления автономного карьерного самосвала с системой «Умный карьер».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-20 19-034 от 22.11.2019г. с ПАО "КАМАЗ" по комплексному проекту «Разработка и создание высокотехнологичного производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых в системе "Умный карьер"», при участии ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в части выполнения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К. Н., Клебанов Д. А., Ясюченя С. В. Основы создания и этапы реализации роботизированных технологий открытых горных работ // Горный журнал. 2013. №10. С. 67-72.
2. I. A. Sokolov, A. S. Misharin, V. P. Kupriyanovskiy, O. N. Pokusaev, O. N. Larin. International Journal of Open Information Technologies 6, 44 (2018).
3. S. Fiscor Engineering & Mining Journal. 11, 52 (2018).
4. A. Kuchumova, Dobyvayushchaya promyshlennost' 2, 92 (2019).
5. ВИСТ Групп и СУЭК, испытания беспилотного БЕЛАЗа на разрезе в Хакасии – Режим доступа: <https://vistgroup.ru/media/news/nid/vistgroup-and-suek-are-unmanned-belaz-on-mine-in-khakassia/> [16.08.2019].
6. Баранова А. С., Охрименко А.Е., Столярова А. П., Стенина Н. А. Анализ проблем угольной отрасли. В сборнике: Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». Конференция проходит при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. 2017. С. 39002.
7. Yu. Voronov, A. Voronov, S. Grishin, A. Bujankin, E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium (2017).
8. Буялич Г. Д., Фурман А. С. Исследование транспортного процесса карьерных автосамосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 5 (132). С. 40-42.
9. S. S. Shadrin, O. O. Varlamov, A. M. Ivanov Journal of Advanced Transportation. Article

ID 2492765. 10 pages (2017). doi:10.1155/2017/2492765.

10. V. Nesterov, V. Aksenov, V. Sadovets, D. Pashkov E3S Web of Conferences IVth International Innovative Mining Symposium 03001. (2019).

11. Стенин Д. В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6 (146). С. 3-8.

12. Дубинкин Д. М. Современное состояние техники и технологии в области автономного управления движением транспортных средств угольных карьеров // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6 (146). С. 8-15.

13. V. Aksenov, I. Chicherin, I. Kostinez, A. Kazantsev, A. Efremkov E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium. (2017).

14. Аброськин А. С. Проблема внедрения технологии «Интеллектуальный карьер» на горнодобывающих предприятиях РФ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. №10. С. 121-123.

15. V. V. Aksenov, A. B. Efremkov, V. Yu. Sadovets, D. A. Pashkov IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic edition 012005. (2018).

16. Dmitry Dubinkin, Alexander Kulpin, and Dmitry Stenin. Justification of the Number and Type of Tire Size for a Dump Truck with a Lifting Capacity from 90 to 130 Tons // Vth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 174, 03015 (2020).

17. Карташов А. Б., Косицын Б. Б., Котиев Г. О., Дубинкин Д. М., Назаренко С. В. Метод определения энергоэффективного закона движения карьерного автосамосвала // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 3 (148). – С. 11-24.

Dmitry M. Dubinkin, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Vladimir Yu. Sadovets**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Ilya S. Syrkin**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor and **Ivan V. Chicherin**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE FOR THE UNMANNED MINING DUMP TRUCK CONTROL SYSTEM

Abstract: the article presents the developed structure of the self-contained dump truck control system. The working conditions were highlighted and the scope of application of the unmanned quarry dump truck was determined. The differences of the pit dump truck control system from the traditional heavy duty dump truck control system are presented. The general layout of the control structure of the self-contained quarry dump truck with the highlighted main elements and devices of the control system was analyzed. Structural units of the control system have been analyzed with indication of their technical characteristics. The main disadvantages and features of the control system of existing dump trucks are highlighted. The main scientific and technical problems were formulated, the solution of which would allow the development of a new level of self-contained

quarry dump truck control system. Presented, developed by the authors, is a general structure of a multilevel control system of a self-contained quarry dump truck with a detailed description of the upper, middle and lower level control system. The conclusion was formulated on the need to develop mathematical models and algorithms of control systems of a self-contained quarry dump truck. The directions of further research and development work are highlighted, the main of which are: development of equipment requirements and formation of a list of devices for providing autonomous control of a quarry dump truck, as well as development of the necessary software for interaction of the subsystems of the self-contained quarry dump truck control system, both among themselves and in the "Smart quarry" system.

Keywords: quarry dump truck, control system, self-contained vehicle, "Smart quarry".

Article info: received November 20, 2020
DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-25-30

REFERENCES

1. K. N. Trubetskoy, D. A. Klebanov, S. V. Yasyuchena Gornyy zhurnal. **10**, 67 (2013)
2. I. A. Sokolov, A. S. Misharin, V. P. Kupriyanovskiy, O. N. Pokusaev, O. N. Larin. International Journal of Open Information Technologies **6**, 44 (2018).
3. S. Fiscor Engineering & Mining Journal. **11**, 52 (2018).
4. A. Kuchumova Dobyvayushchaya promyshlennost' **2**, 92 (2019).
5. VIST Grupp i SUEK ispytyvayut bespilotnye BELAZy na razreze v Khakasii. – Rezhim dostupa: <https://vistgroup.ru/media/news/nid/vist-group-and-suek-are-unmanned-belaz-on-mine-in-khakassia/> [16.08.2019].
6. A. S. Baranova, A. E. Okhrimenko, A. P. Stolyarova, N. A. Stenina. Sbornik materialov IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem "Rossiya molodaya" **39** (2017).
7. Yu. Voronov, A. Voronov, S. Grishin, A. Bujankin, E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium (2017).
8. G. D. Buyalich, A. S. Furman Gornoe oborudovanie i elektromekhanika **5**, 40 (2017).
9. S. S. Shadrin, O. O. Varlamov, A. M. Ivanov. Journal of Advanced Transportation. Article ID 2492765. **10** pages (2017). doi:10.1155/2017/2492765.
10. V. Nesterov, V. Aksenov, V. Sadovets, D. Pashkov E3S Web of Conferences IVth International Innovative Mining Symposium 03001. (2019).
11. D. V. Stenin Gornoe oborudovanie i elektromekhanika **6**, 3 (2019).
12. D. M. Dubinkin Mining Equipment and Electromechanics **6**, 8 (2019).
13. V. Aksenov, I. Chicherin, I. Kostinez, A. Kazantsev, A. Efremkov E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium. (2017).
14. A. S. Abros'kin, Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta **10**, 121 (2014).
15. V. V. Aksenov, A. B. Efremkov, V. Yu. Sadovets, D. A. Pashkov IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic edition 012005. (2018)
16. Dmitry Dubinkin, Alexander Kulpin, and Dmitry Stenin. Justification of the Number and Type of Tire Size for a Dump Truck with a Lifting Capacity from 90 to 130 Tons // Vth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. **174**, 03015 (2020).
17. Kartashov A. B., Kositsyn B. B., Kotiev G. O., Dubinkin D. M., Nazarenko S. V. Method for determining the energy-efficient law of mining dump truck motion. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.3 (148), pp. 11-24.

Библиографическое описание статьи

Дубинкин Д.М., Садовец В.Ю., Сыркин И.С., Чичерин И.В. Разработка структуры системы управления беспилотным карьерным самосвалом // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 6 (152). – С. 25-30.

Reference to article

Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu., Syrkin I.S., Chicherin I.V. Development of the structure for the unmanned mining dump truck control system. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.6 (152), pp. 25-30.