

УДК 629.3:621.396.663
DOI 10.17513/snt.40242

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЭКСКАВАТОРА В ЗАБОЕ ОТНОСИТЕЛЬНО КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Кизилов С.А., Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю.

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук», Кемерово,
e-mail: sergkizilov@gmail.com, ltd.mseng@gmail.com, admolv@gmail.com

Целью работы являлась функциональная детализация технических шагов по определению местоположения экскаватора в забое относительно карьерного самосвала без использования спутниковой навигации, обеспечивающая последующую разработку и программную реализацию алгоритмов управления автономным транспортным средством. Объектом исследования являлся технологический процесс подъезда карьерного самосвала под ковш экскаватора в забое для погрузки вскрышных пород. Детализация и формализация задачи выполнена с применением методологии функционального графического моделирования, отображающей структуру и функции технологического процесса. В результате выполненных работ проведен системный анализ процесса определения положения экскаватора в координатной системе забоя, получена схема работы системы определения координат экскаватора в забое и выполнена ее декомпозиция. Показана техническая возможность точного определения координат экскаватора в забое на основе комплексного применения наземного оптического и ультразвукового оборудования. Впервые предложен способ точного позиционирования экскаватора в забое без использования средств спутниковой навигации и выполнен его системный анализ. Представлено описание способа определения местоположения экскаватора в забое при взаимодействии с автоматически управляемыми самосвалами и схема выполнения этапов определения местоположения экскаватора в забое с графическим наложением на схему разработки уступа. Определено место интеграции координатных систем экскаваторного забоя и технологической дороги. В результате чего показана перспективность применения систем позиционирования на основе наземного оборудования.

Ключевые слова: карьерная техника, экскаватор, карьерный самосвал, автономное транспортное средство, система автономного управления движением, спутниковая навигация, технологическая схема обработки уступа, позиционирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р (Соглашение от 28.09.2022 № 075-15-2022-1199).

DETERMINING EXCAVATOR LOCATION IN THE FACE RELATIVE TO A DUMP TRUCK ISSUE WITHOUT USING SATELLITE NAVIGATION

Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Khudonogov D. Yu.

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo,
e-mail: sergkizilov@gmail.com, ltd.mseng@gmail.com, admolv@gmail.com

The aim of the work was a functional detailing of technical steps for determining the location of an excavator in a face relative to a quarry dump truck without using satellite navigation, ensuring the subsequent development and software implementation of algorithms for controlling an autonomous vehicle. The object of the study was the technological process of a quarry dump truck approaching under an excavator bucket in a face for loading overburden. Detailing and formalization of the problem was performed using the methodology of functional graphical modeling, displaying the structure and functions of the technological process. As a result of the work performed, a system analysis of the process of determining the excavator position in the coordinate system of the face was carried out, a diagram of the operation of the excavator coordinate determination system in the face was obtained and its decomposition was performed. The technical feasibility of precise determination of excavator coordinates in the face based on the integrated use of ground-based optical and ultrasonic equipment is demonstrated. For the first time, a method for precise positioning of an excavator in a face without using satellite navigation tools has been proposed and its system analysis has been performed. A description of the method for determining the location of an excavator in the face when interacting with automatically controlled dump trucks is presented. A diagram of the stages of determining the location of an excavator in the face with a graphical overlay

on the bench development diagram is developed. The location of the integration of the coordinate systems of the excavator face and the technological road is determined. As a result, the prospects for using positioning systems based on ground equipment are shown.

Keywords: mining equipment, excavator, dump truck, autonomous vehicle, autonomous moving control system, satellite navigation, technological scheme of mining the highwall, positioning

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the areas of exploration and production of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep processing products from coal raw materials while consistently reducing the environmental burden and risks to population life", approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 11.05.2022 No. 1144-r (Agreement dated 28.09.2022 No. 075-15-2022-1199).

Введение

Месторождения полезных ископаемых, пригодные к открытой добыче, характеризуются большим разнообразием горно-геологических условий. При этом самые высокие эксплуатационные расходы и численность рабочих наблюдаются на разрезах, где используются системы разработки с автомобильным транспортом [1, с. 6]. Карьерная техника эксплуатируется практически во всех климатических зонах при температуре от -50 до $+50$ °С, что накладывает высокие требования к физическому здоровью водителей карьерных самосвалов и создает проблемы с привлечением квалифицированных кадров [2].

Главными направлениями совершенствования открытой добычи угля с применением автомобильного транспорта являются применение типовых технологических схем, обеспечивающих оптимальные параметры элементов систем разработки и повышение технико-экономических показателей оборудования [1, с. 6]. Одним из таких направлений является применение автономных транспортных средств – автомобильной техники большой грузоподъемности с автоматической системой управления движением (АСУД) [2, 3].

По данным из открытых источников известно, что к середине 2022 г. в мире эксплуатировалось более тысячи карьерных самосвалов, оснащенных АСУД [3–5]. Те же источники показывают постоянное увеличение количества эксплуатируемых машин оборудованных АСУД, по прогнозам ко второй половине 2026 г. объем рынка подобных транспортных средств превысит 4 млрд долларов, что показывает актуальность разработки АСУД и ее компонентов для карьерного транспорта [5].

Причина роста интереса к автономным карьерным самосвалам – достижение технологией состояния, когда она дает возможность крупным компаниям извлекать прибыль от ее применения [4]. Например, представители компании «Komatsu» деклариру-

ют в открытых источниках, что их система FrontRunner Autonomous Haulage System (AHS) снижает стоимость перевозки груза на 15 %, при этом аварийность на автоматизированных участках падает до нуля [6, 7].

Одним из главных условий для успешной работы участка карьера, использующего самосвалы с АСУД, является точное позиционирование карьерной техники на автоматизированном участке и вне его. Наиболее распространенным решением данной задачи является применение спутниковой навигации, которую используют все производители карьерных самосвалов и АСУД, чаще всего используется система Global Positioning System (GPS), реже – Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) [8–10]. Современные системы спутникового позиционирования позволяют определять координаты техники с точностью вплоть до 1 см. Но для обеспечения высокой точности позиционирования каждой отдельной машины требуется качественное покрытие карьера беспроводной связью и установка специальных базовых станций системы спутниковой навигации для формирования и постоянной передачи навигационных поправок. Без этого точность позиционирования снижается до 15–20 м [11]. Данный подход имеет как свои достоинства, так и недостатки, главный из которых – зависимость автоматического транспортного участка от стабильной работы системы спутниковой навигации.

Использование систем спутниковой навигации как единственного способа позиционирования техники для управления автоматизированным участком в карьере является основным, но не является самым точным, кроме того, существуют риски прекращения функционирования спутниковой навигации над некоторыми территориями, связанные с преднамеренным искажением сигналов [12, 13]. Немаловажен и имеющийся дефицит качественной элементной базы для производства систем точной спутниковой навигации на территории Российской Федерации в гражданских целях.

Требуется разработать способ, позволяющий инструментально определять координаты текущего положения экскаватора в забое с привязкой координатной системы экскаваторного забоя к координатной системе технологической дороги, по которой перемещаются самосвалы, без использования систем спутниковой навигации.

Ранее на уровне действующих масштабных моделей авторами разработаны и реализованы решения для самосвалов, оснащенных АСУД (далее – самосвал с АСУД), позволяющие определять их координаты на технологической дороге и осуществлять маршрутизацию без применения спутниковой навигации [4, 14]. Одним из направлений для продолжения исследований являлась разработка способа определения местоположения экскаватора в забое без применения средств спутниковой навигации относительно технологической дороги, по которой подъезжает самосвал с АСУД к забою.

Таким образом, **цель работы** заключается в функциональной детализации технических шагов по определению местоположения экскаватора в забое относительно карьерного самосвала с АСУД (но без использования спутниковой навигации), позволяющей обеспечить последующую разработку и программную реализацию алгоритмов управления автономным транспортным средством.

Материалы и методы исследования

Постановку и формализацию задачи определения местоположения экскаватора в забое относительно карьерного самосвала без использования спутниковой навигации предложено выполнить с применением методологии функционального графического моделирования SADT, в результате которого разрабатываются графические схемы моделей IDEF0, отображающие структуру и функции технологического процесса. Для этого забой в рамках задачи рассмотрен как двумерная координатная плоскость, а наиболее подходящим местом для стыковки координатной системы технологической дороги и экскаваторного забоя выбраны въездные ворота забоя.

Результаты исследования и их обсуждение

Соответственно, исследования, направленные на разработку альтернативного высокоточного способа позиционирования карьерной техники, являются актуальными. При этом из-за разницы в горно-геологических условиях залегания полезного ископаемого, а также значительного количества способов его вскрытия и обработки разра-

батываемое решение не может быть универсальным и подходит для любых условий. В связи с этим авторами введены ограничения по условиям применимости системы определения положения экскаватора в забое, не использующей спутниковую навигацию. Первичным является ограничение по типу транспортной схемы открытой разработки месторождения. Так как система определения координат экскаватора в забое предназначена для совместной работы с самосвалами с АСУД, очевиден выбор транспортных схем разработки карьеров с автомобильным транспортом [1, с. 7–9]. Из них, ввиду значительной распространенности и относительной простоты реализации выбраны схемы разработки, при которых в качестве выемочно-погрузочной машины применяется экскаватор с прямой мехлопатой. Для таких машин наиболее часто на территории Российской Федерации применяются типовые схемы разработки месторождений с использованием автомобильного транспорта (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что представленные типовые схемы разработки имеют общие черты: экскаватор всегда находится внутри забоя, который ограничен с двух сторон уступом с разрабатываемым полезным ископаемым, а с двух других сторон – подъездной дорогой. При этом рабочая площадка, по которой перемещается экскаватор, практически ровная, так как заранее спланирована, и ее уклон должен быть не более 5° [15]. Исходя из вышеописанного, текущее положение экскаватора в забое перед погрузкой можно описать двумя координатами, так как он работает фактически на плоскости и не имеет значительного перемещения вверх или вниз на коротких временных интервалах перемещения вдоль уступа.

Въездные ворота при ручном управлении являются условным участком карьерной автодороги перед въездом в зону ожидания. С применением АСУД в предлагаемом способе для определения координат экскаватора в забое без использования спутниковой навигации наличие въездных ворот, оснащенных специальным оборудованием, является обязательным условием. При этом сами ворота могут представлять собой две мобильные мачты с размещенным оборудованием. Положение въездных ворот на типовой схеме разработки месторождения с использованием автомобильного транспорта при разработке уступа с тупиковым подъездом показано на рис. 2.

Въездные ворота (рис. 2) являются связующим элементом между координатной системой технологической дороги и координатной системой забоя.

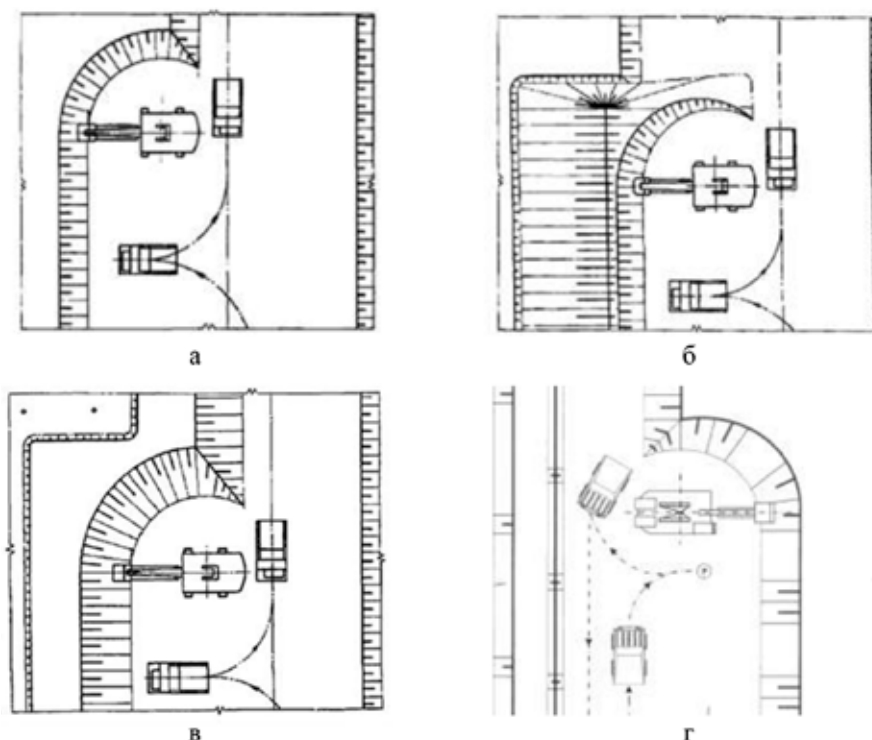


Рис. 1. Типовые схемы разработки месторождений с использованием автомобильного транспорта, где технология: а – разработки уступа за два прохода; б – разработки уступа за один проход; в, г – разработки уступа с тупиковым подъездом

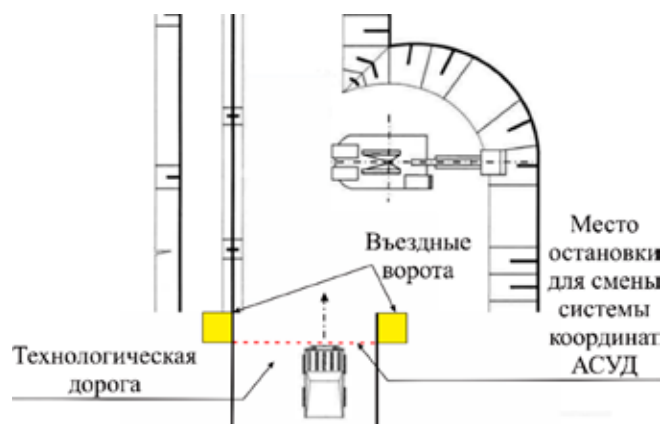


Рис. 2. Расположение въездных ворот при тупиковой схеме разработки

Самосвал подъезжает к въездным воротам, останавливается, АСУД в самосвале переключается с координатной системы технологической дороги на координатную систему забоя. Въездные ворота не требуют точной геодезической привязки к местности и продвигаются вслед за движением забоя. На точность определения координат экскаватора влияют качество измерения расстояния между мачтами въездных ворот и перпендикулярность их установки относительно технологической дороги. Так как въездные ворота выполняют ряд функций, связанных с управлением движением самосвала

в забое, то их высота должна быть равна высоте крыши машинного отделения экскаватора. Координаты экскаватора определяются по его смещению относительно двух виртуальных перпендикулярных друг другу координатных осей, вписанных в пространство забоя. Для этого на въездных воротах и на экскаваторе монтируется комплект измерительного оборудования, которое позволяет измерить расстояние по прямой от въездных ворот до экскаватора и угол поворота устройства измерения расстояния относительно виртуальной горизонтальной координатной оси.

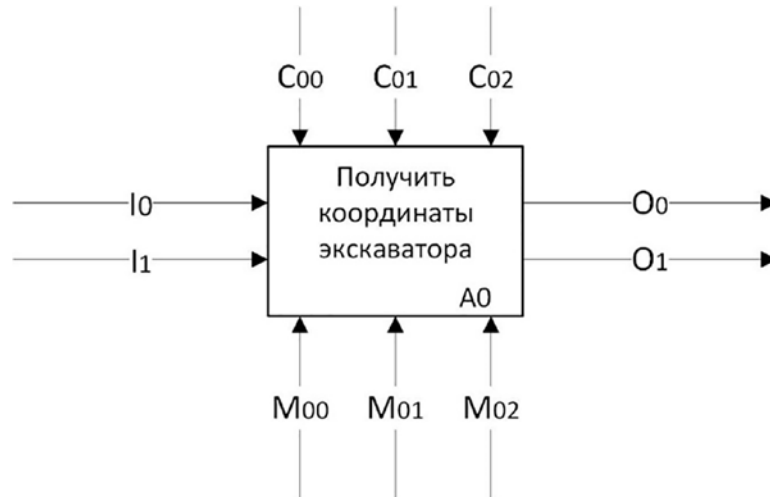


Рис. 3. IDEF0 схема работы системы определения координат экскаватора в забое:
 I_0 – ввод данных о начале процесса поиска координат экскаватора (команда «Старт»);
 I_1 – расстояние от виртуальной вертикальной оси координат до мачты въездных ворот (мм);
 M_{00} – данные от лазерного дальномера; M_{01} – данные от энкодера в поворотной платформе системы определения координат экскаватора; M_{02} – алгоритм определения координат экскаватора в забое;
 C_{00} – контроль направления устройств для определения координат экскаватора в забое в горизонтальной плоскости; C_{01} – контроль направления устройств для определения координат экскаватора в забое в вертикальной плоскости; C_{02} – контроль измерения расстояния;
 O_0 – координата экскаватора по оси Ox ; O_1 – координата экскаватора по оси Oy

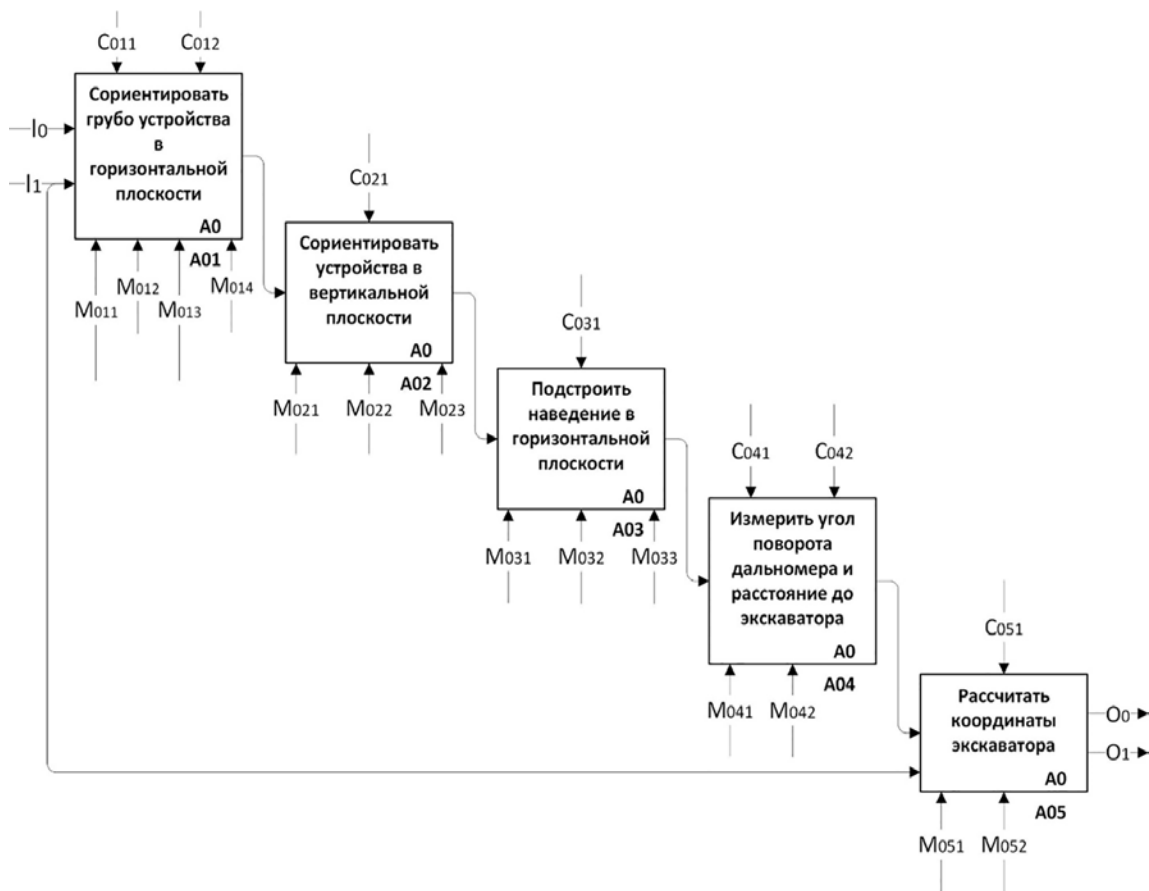


Рис. 4. Декомпозиция схемы IDEF0 работы системы определения координат экскаватора в забое



Рис. 5. Схема выполнения этапов определения местоположения экскаватора в забое

Формализация способа определения координат экскаватора в забое была выполнена в виде схемы структурного анализа и IDEF0, отображающей структуру и функции технологического процесса (рис. 3). Такая схема позволяет описать работу системы точного позиционирования экскаватора в забое, где измерение расстояний предложено выполнять на основе ультразвуковой фазированной решетки (УФР) в комбинации с комплексом оптических средств и без использования средств спутниковой навигации

Декомпозиция схемы работы системы определения координат экскаватора в забое (рис. 3) показана на рис. 4 и отображает последовательность основных действий, а также задействованное оборудование.

На схеме (рис. 4) условно обозначены входные и выходные сигналы в схеме IDEF0, где: I_0 – ввод данных о начале процесса поиска координат экскаватора (команда «Старт»); I_1 – расстояние от виртуальной вертикальной оси координат до мачты въездных ворот (мм); C_{011} – направление мобильного устройства по горизонтали; C_{012} – направление стационарного устройства по горизонтали; M_{011} – излучатель

ультразвуковой фазированной решетки; M_{012} – поворотная платформа на мобильном устройстве; M_{013} – приемник ультразвуковой фазированной решетки; M_{014} – поворотная платформа на стационарном устройстве; C_{021} – вертикальное положение стационарного устройства; M_{021} – массив фотодиодов; M_{022} – точечный лазерный излучатель; M_{023} – привод вертикальной подстройки; C_{031} – направление по горизонтали; M_{031} – массив фотодиодов; M_{032} – точечный лазерный излучатель; M_{033} – поворотная платформа на стационарном устройстве; C_{041} – расстояние до экскаватора от ворот по прямой; C_{042} – угол поворота лазерного дальномера; M_{041} – лазерный дальномер; M_{042} – абсолютный энкодер; C_{051} – точность расчета; M_{051} – алгоритм расчета координат; M_{052} – вычислительное устройство.

На первом этапе производится грубое определение положения экскаватора относительно въездных ворот в горизонтальной плоскости забоя посредством взаимного ориентирования устройств УФР, после чего уже ориентация в вертикальной плоскости и точное измерение расстояний от мачт до экскаватора производится с применением лазерной дальнометрии. Графическое

наложение схемы декомпозиции определения координат экскаватора в забое на схему разработки уступа (рис. 5) позволяет наглядно отобразить техническое решение поставленной задачи.

Из схемы на рис. 5 видно, что весь процесс происходит в пять основных этапов, каждый из которых можно подвергнуть дальнейшей декомпозиции. Этапы А01–А03 являются подготовительными и служат для настройки измерительного оборудования. На этапе А04 происходит измерение опорных величин для расчета координат экскаватора (расстояния по прямой от въездных ворот до экскаватора и угол поворота измерительного оборудования относительно виртуальной горизонтальной координатной оси). В ходе этапа А05, исходя из значений опорных величин, рассчитываются координаты экскаватора в двухмерной координатной системе забоя. Таким образом, показана техническая возможность производства точного позиционирования экскаватора в забое без использования средств спутниковой навигации на основе лазерной дальнометрии и технологии ультразвукового исследования, обеспечивающей электронное динамическое фокусирование с применением ультразвуковой фазированной решетки.

Заключение

В результате выполненной работы формализована научно-техническая задача определения местоположения экскаватора в забое относительно карьерного самосвала без использования спутниковой навигации. Определено место интеграции координатных систем экскаваторного забоя и технологической дороги. Разработан и описан подход к решению поставленной научно-технической задачи, который заключается в использовании комплекса из наземного оптического и ультразвукового оборудования, устанавливаемого на экскаватор и въездные ворота с использованием моторизованных поворотных опор. Выполнено функциональное моделирование по методологии SADT, в результате которого разработаны модели IDEF0, графически представленные в виде схем и описывающие процесс определения координат экскаватора в забое. Представленные в статье модели IDEF0 после дальнейшей декомпозиции позволят разработать алгоритм определения положения экскаватора в забое без использования средств спутниковой навигации, на основе которого будет выполнена программно-аппаратная реализация прототипа системы определения положения экскаватора.

Список литературы

1. Типовые технологические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. М.: Недра, 1982. 405 с.
2. Кучумова А. Карьерные «беспилотники» // Добывающая промышленность. 2020. № 1 (19). С. 64–68. URL: <https://dprom.online/chindustry/karernye-bespilotniki/> <https://dprom.online/chindustry/karernye-bespilotniki/> (дата обращения: 12.10.2024).
3. Дубинкин Д.М. Современное состояние техники и технологий в области автономного управления движением транспортных средств угольных карьеров // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6 (146). С. 8–15. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-8-15.
4. Никитенко М.С., Кизилев С.А., Худоногов Д.Ю. Анализ подходов к управлению автономными транспортными средствами // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 12 (2). С. 278–283. DOI: 10.17513/snt.39472.
5. Sishi M., Telukdarie A. Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry – a case study // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2020. Vol. 11, Is. 1. P. 1–22. DOI: 10.1504/IJMM.2020.105852.
6. Fiscor S. Komatsu Debuts Advanced Autonomous Systems // Engineering and Mining Journal; Jacksonville. 2018. Vol. 219, Is. 11. P. 52–57. URL: <https://www.coalage.com/features/komatsu-debuts-advanced-autonomous-systems/> (дата обращения: 10.10.2024).
7. Leonida C. Management Systems for Future Fleets // Engineering and Mining Journal; Jacksonville. 2020. Vol. 221, Is. 6. P. 52–59. URL: <https://www.coalage.com/features/management-systems-for-future-fleets/> (дата обращения: 11.10.2024).
8. Gaber T., Jazouli Y., Eldesouky E., Ali A. Autonomous Haulage Systems in the Mining Industry: Cybersecurity, Communication and Safety Issues and Challenges // Electronics. 2021. Vol. 10, Is. 11. P. 1357. DOI: 10.3390/ELECTRONICS10111357.
9. Nguyen H.A.D., Ha Q.P. Robotic autonomous systems for earthmoving equipment operating in volatile conditions and teaming capacity: a survey // Robotica. 2023. Vol. 41, Is. 2. P. 486–510. DOI: 10.1017/S0263574722000339.
10. Hamada T., Saito S. Autonomous haulage system for mining rationalization // Hitachi review. 2018. Vol. 67, Is. 1. P. 86–87. URL: https://www.hitachihyoron.com/rev/archive/2018/r2018_01/10a07/index.html (дата обращения: 11.10.2024). DOI: 10.3390/electronics10111357.
11. Лебедев В. Системы активной безопасности в добывающей индустрии // Золото и технологии. 2022. № 4 (58). С. 106–110. URL: https://zolteh.ru/technic/sistemy_aktivnoy_bezopasnosti_v_dobyvayushchey_industrii/ (дата обращения: 05.10.2024).
12. Wu Z., Zhang Y., Yang Y., Liang C., Liu R. Spoofing and Anti-Spoofing Technologies of Global Navigation Satellite System: A Survey // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 165444–165496. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022294
13. Cardellach E., Elosegui P., Davis J.L. Global distortion of GPS networks associated with satellite antenna model errors // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. DOI: 10.1029/2006JB004675.
14. Кизилев С.А., Никитенко М.С. Концепция применения технологий компьютерного зрения для управления автономным транспортом // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2020. № 6. С. 235–238. URL: <https://library.sibsui.ru/LibrPublications-SectionsPublicationsFiles.asp?lngSection=94&lngPublication=320> (дата обращения: 03.10.2024).
15. Kujundzic T., Klanfar M., Korman T., Brisevac Z. Influence of Crushed Rock Properties on the Productivity of a Hydraulic Excavator // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, Is. 5. P. 2345. DOI: 10.3390/APP11052345.