

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЭКСКАВАТОРА В ЗАБОЕ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ¹

TECHNICAL IMPLEMENTATION OF A METHOD FOR EXCAVATOR POSITIONING IN A FACE WITHOUT USING A SATELLITE NAVIGATION

*S. Kizilov
M. Nikitenko
D. Khudonogov*

Summary. The article describes modern approaches and provides examples of methods for determining the location of quarry equipment equipped with an automatic motion control system. The object of the study is the process of approaching a quarry dump truck under an excavator bucket at a face for loading overburden. The difficulties arising from the use of satellite navigation are briefly described. A systems analysis of the process of determining the excavator position in the coordinate system of the face is carried out. A coordinate system for an excavator face is proposed, which allows describing the location of the excavator in the form of its displacement relative to the virtual coordinate axes. The diagrams show the technique for determining the excavator position in the face, the place of integration of the coordinate system of the face and the technological road, for which the use of a special device is proposed. Sketches are shown and the main elements of technical devices for determining the coordinates of the excavator in the face without using a satellite navigation system, based on a combination of optical and ultrasonic systems, are described. A simplified description of the method and algorithm for determining the position of an excavator in a face when interacting with automatically controlled dump trucks without the use of satellite navigation equipment is presented.

Keywords: autonomous transport, autonomous vehicle, machine vision, radio direction finding, orientation of moving objects, route, trajectory of movement.

Кизилов Сергей Александрович

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр угля
и углехимии Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Кемерово
sergkizilov@gmail.com

Никитенко Михаил Сергеевич

кандидат технических наук, Федеральный
исследовательский центр угля и углехимии Сибирского
отделения Российской академии наук, г. Кемерово
ltd.mseng@gmail.com

Худоногов Данила Юрьевич

научный сотрудник, Федеральный исследовательский
центр угля и углехимии Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Кемерово
admolv@gmail.com

Аннотация. В статье описаны современные подходы и приведены примеры способов определения местоположения карьерной техники, оснащенной автоматической системой управления движением. Объектом исследования является процесс подъезда карьерного самосвала под ковш экскаватора в забое для погрузки вскрышных пород. Кратко описаны сложности, возникающие при использовании средств спутниковой навигации. Проведен системный анализ процесса определения положения экскаватора в координатной системе забоя. Предложена координатная система для экскаваторного забоя, позволяющая описать местоположение экскаватора в виде его смещения относительно виртуальных координатных осей. На схемах показана методика определения положения экскаватора в забое, место интеграции координатной системы забоя и технологической дороги, для чего предложено применение специального устройства. Показаны эскизы и описаны основные элементы технических устройств для определения координат экскаватора в забое без использования системы спутниковой навигации, основанные на комбинации оптических и ультразвуковых систем. Представлено упрощенное описание способа и алгоритма для определения положения экскаватора в забое при взаимодействии с автоматически управляемыми самосвалами без использования спутниковой навигационной аппаратуры.

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

¹ 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).

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].

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]. Одним из таких направлений является применение автономных транспортных средств — автомобильной техники большой грузоподъемности с автоматической системой управления движением (далее АСУД) [2, 3].

По данным из открытых источников известно, что к середине 2022 года в мире эксплуатировалось более тысячи карьерных самосвалов, оснащенных АСУД [2–4]. Причина роста интереса к автономным карьерным самосвалам — это достижение технологией состояния, когда она дает возможность крупным компаниям извлекать прибыль от ее применения [2].

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, чаще всего используется система GPS, реже ГЛОНАСС [5, 6, 7, 8].

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 [9, 10, 11]. Так же не маловажен имеющийся дефицит качественной элементной базы для производства систем точной спутниковой навигации на территории РФ в гражданских целях.

Соответственно, исследования, направленные на разработку альтернативных высокоточных способов позиционирования карьерной техники, являются актуальными.

Решение задачи

По мимо спутниковой навигации существует еще несколько возможных способов для определения положе-

ния и навигации транспорта с АСУД, которые неплохо описаны. При этом способы привязки спутниковых координат экскаватора, относительно его положения в забое и их связи с координатной системой технологической дороги описаны в литературе достаточно слабо, как и способы определения его координат без применения систем спутниковой навигации. На уровне действующих масштабных моделей разработаны и реализованы решения для самосвалов с АСУД (далее самосвал), позволяющие определять его координаты на технологической дороге и осуществлять маршрутизацию без применения спутниковой навигации [2, 12]. Одним из направлений для продолжения данных исследований является разработка способа, позволяющего определить место положение экскаватора в забое без применения средств спутниковой навигации относительно технологической дороги, по которой подъезжает самосвал к забою.

Так как система определения координат экскаватора в забое предназначена для совместной работы с самосвалами, оснащенными АСУД, то выбирается транспортная система разработки карьеров с автомобильным транспортом [1, 13], в качестве экскаватора выбирается прямая мехлопата [1, 13].

При этом, рабочая площадка по которой перемещается экскаватор практически ровная, так как заранее спланирована и ее уклон должен быть не более 5° [14]. 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.

Таким образом 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.

Определение координат экскаватора в забое

Так как забой рассматривается как двумерная координатная плоскость, то наиболее подходящим местом для стыковки координатной системы технологической дороги и экскаваторного забоя будут въездные ворота забоя. 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, оснащенные специальным оборудованием являются обязательным условием.

При этом сами ворота могут представлять собой две мобильные мачты с размещенным на них оборудованием.

Въездные ворота не требуют точной геодезической привязки к местности, и продвигаются в след за движением забоя. На точность определения координат экскаватора влияют точное измерение расстояния между мачтами въездных ворот и перпендикулярность установки ворот 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. Положение въездных ворот на типовой схеме разработки месторождения с использованием автомобильного транспорта при разработке уступа с тупиковым подъездом показано на рисунке 1.

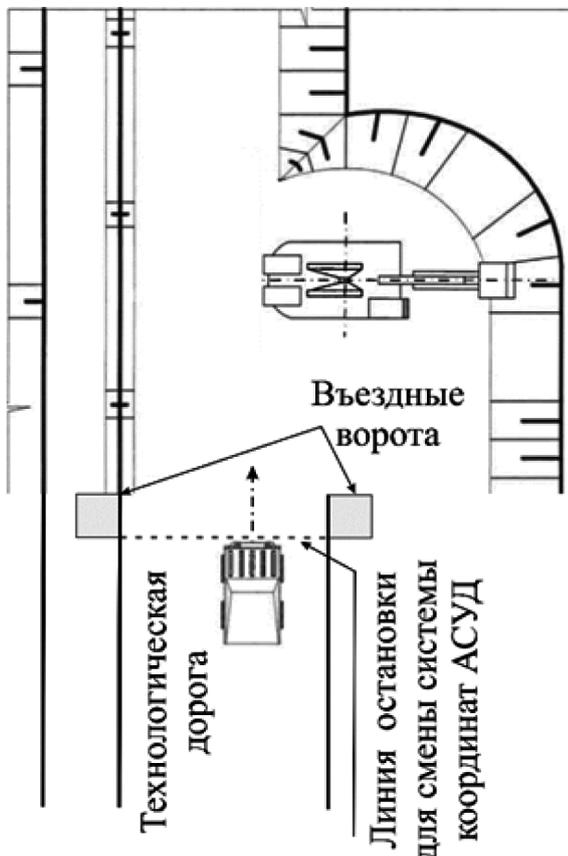


Рис. 1. Расположения въездных ворот при тупиковой схеме разработки

Въездные ворота (Рисунок 1) являются связующим элементом между координатной системой технологической дороги и координатной системой забоя. Самосвал, подъезжает к въездным воротам, останавливается, АСУД в самосвале переключается с координатной системы технологической дороги на координатную систему разреза.

Так как для выбрана двухкоординатная система, то для ее реализации в территорию экскаваторного забоя

вписываются виртуальные горизонтальная и вертикальная координатные оси, Ox и Oy соответственно. Виртуальные координатные оси перпендикулярны друг другу, а ось Ox должна быть параллельна въездным воротам и перпендикулярна технологической дороге, как показано на рисунке 2.

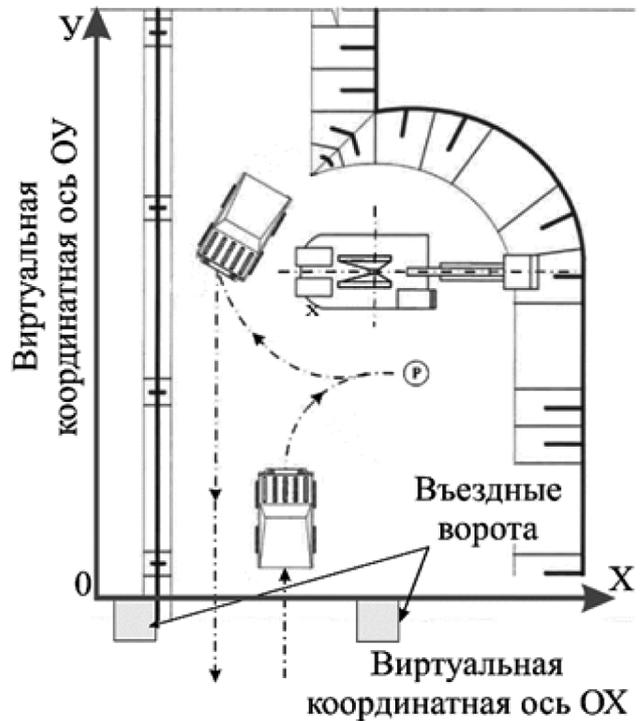


Рис. 2. Расположение виртуальных координатных осей в экскаваторном забое

Минимальный шаг между двумя соседними координатами на виртуальной координатной оси 10 миллиметров. Таким образом координаты, описывающие положение экскаватора, будут выглядеть как $(1 \cdot 10^5 \text{ мм}, 6 \cdot 10^4 \text{ м})$, согласно данному примеру экскаватор смещен на 100 метров от нуля по оси Ox и на 60 метров от нуля по оси Oy , рисунок 3.

Для определения координат экскаватора въездные ворота и экскаватор оснащаются специально разработанными устройствами с набором датчиков и излучателей. Определение координат экскаватора сводится к расчёту вертикального и горизонтального катета виртуального треугольника, где гипотенуза и один из углов между гипотенузой и прилежающим катетом измеряются с помощью измерительного оборудования, установленного на въездных воротах, как показано на рисунке 4.

На рисунке 4 пунктирной линией показан прямоугольный треугольник ABC значение длины стороны BC , которого является вертикальной координатой, а значение суммы отрезка OA и стороны AC — горизонтальной координатой. Инструментально измеряются гипотенуза AC и угол CAB . Расстояние OA известно и определяется

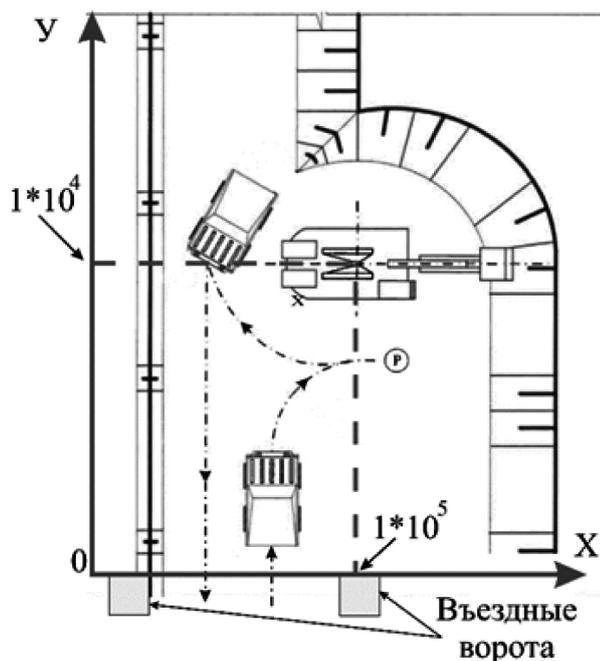


Рис. 3. Пример определения координат экскаватора в забое

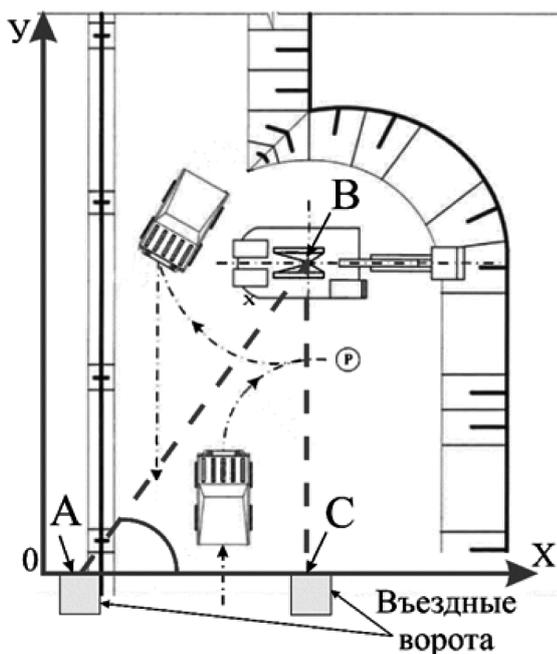


Рис. 4. Пример определения координат экскаватора при измеренной гипотенузе треугольника ABC

при установке въездных ворот. Координата по оси OX (длина отрезка OC) рассчитывается по формуле:

$$OC = OA \pm AB \cdot \cos(CAB)$$

При этом знак в формуле может меняться с плюса на минус в том случае, если экскаватор будет расположен левее мачты въездных ворот (Рисунок 1), с которого производится измерение угла CAB и отрезка AB. Вторая координата экскаватора по оси OY (длина стороны BC в треугольнике ABC) рассчитывается по формуле:

$$BC = AB \cdot \sin(CAB)$$

Таким образом координата экскаватора в забое будет представлена в виде (OC, BC).

Оборудование для определения положения экскаватора в забое

Для определения положения экскаватора в забое разработано два устройства — первое мобильное, для монтажа на крыше моторного отсека экскаватора, второе стационарное — монтируется в верхней точке мачты въездных ворот. Для определения положения экскаватора оба модуля должны в заданный момент времени автоматически сориентироваться друг на друга, спозиционировав их оптические элементы вдоль одной оси. Основными элементами, обеспечивающими ориентацию модулей друг на друга являются: ультразвуковой излучатель с узкой диаграммой направленности и ультразвуковая фазированная антенная решётка (УФАР) с несколькими излучателями, синхронизированных по времени ультразвуковым излучателем, расположенными на въездных воротах.

Внешний вид, мобильного устройства, монтируемого на крыше моторного отсека экскаватора и его основные элементы показаны на рисунке 5.

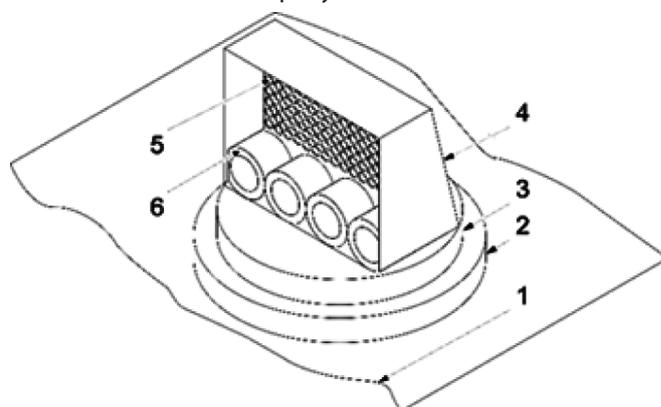


Рис. 5. Мобильное устройство для определения положения экскаватора в забое, монтируемая на крыше моторного отсека экскаватора, где: 1 — крыша машинного отделения экскаватора; 2 — опорная платформа с электроприводом; 3 — поворотная платформа; 4 — защитный кожух; 5 — массив светодиодов; 6 — ультразвуковая фазированная антенная решётка

Основными элементами мобильного устройства, показанного на рисунке 5 являются массив светодиодов (поз. 5) и УФАР (поз. 6). Для защиты от ударного воздействия малогабаритных осколков горной массы массив светодиодов и ультразвуковые излучатели установлены в защитных кожух (Рисунок 5, поз.4), внутри которого так же смонтированы вычислительное устройство и радио-

оборудование. Защитный кожух крепится на поворотной платформе с углом поворота 350° (Рисунок 5, поз. 3), которая вращается с помощью электропривода, установленного в опорной платформе (Рисунок 5, поз. 3).

Стационарное устройство для определения положения экскаватора в забое, монтируемое на въездных воротах показано на рисунке 6.

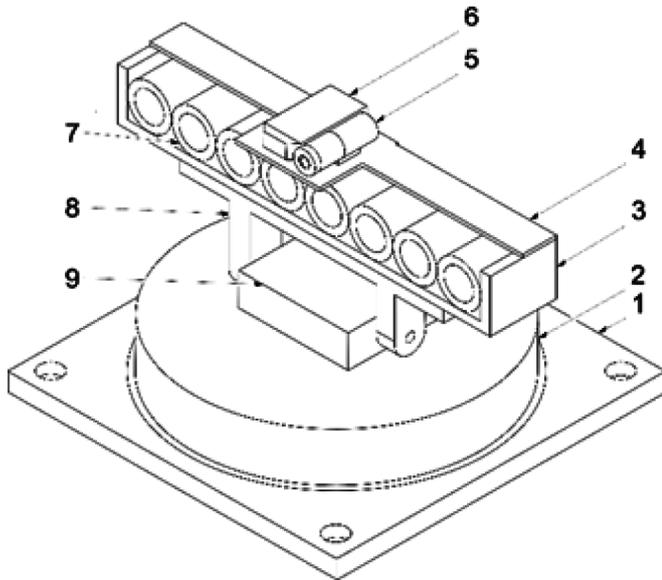


Рис. 6. Стационарное устройство для определения положения экскаватора в забое, монтируемое на въездных воротах, где: 1 — монтажная пластина; 2 — поворотная платформа с электроприводом и энкодером; 3 — корпус; 4 — крепление оптических приборов к корпусу; 5 — точечный лазерный излучатель; 6 — лазерный дальномер; 7 — приемники УФРУДН; 8 — крепление корпуса к сервоприводу вертикальной подстройки положения датчиков; 9 — сервопривод вертикальной подстройки положения датчиков

Стационарное устройство для определения положения экскаватора в забое (Рисунок 6), состоит из корпуса (поз. 3), в котором смонтирована УФАР с четырьмя излучателями (поз. 7) выполненный в виде расположенных в линию приемников ультразвукового сигнала, на верхней части корпуса установлены точечный лазерный излучатель (поз. 5) и лазерный дальномер (поз. 6), внутри корпуса установлено радиоэлектронное оборудование. Согласно [14] на площадке внутри забоя допускается уклон в 5°, что в свою очередь может привести к перепаду высоты до 8,7 метров на 100 метров, для компенсации перепада высот и ориентации мобильного и стационарного устройств в вертикальной плоскости, корпус устанавливается на крепления, соединённым с вращающейся осью сервопривода для компенсации вертикального перепада высот (поз. 9). Для обеспечения ориентации излучателей и приемников на экскаватор сервопривод

с корпусом устанавливаются на поворотной платформе с углом поворота 180° в горизонтальной плоскости (поз. 2). Привод поворотной платформы оснащается абсолютным энкодером с высоким разрешением.

При монтаже, мобильного и стационарного устройства для определения положения экскаватора в забое необходимо, чтобы обе его части находились в одной горизонтальной плоскости, т. е. они должны монтироваться на одной высоте от рабочей площадки в забое при ее нулевом уклоне.

Аппаратный способ определения координат экскаватора в забое

Как описывалось ранее в предлагаемой системе координат координатами экскаватора в забое будут длины отрезков OC и BC (Рисунок 4). Для этого с помощью комплекта из оборудования, показанного на рисунках 4 и 5 предлагается измерить угол CAB и отрезок AB в треугольнике ABC (Рисунок 4). Отрезок OA (Рисунок 4) является константой и задается в процессе монтажа въездных ворот.

При подъезде самосвала к въездным воротам поступает сигнал запроса координат экскаватора, что активирует систему позиционирования. Стационарное устройство для определения координат экскаватора с помощью поворотной платформы (Рисунок 6 поз. 2) поворачивается, чтобы установить угол CAB (Рисунок 4) равным 90°, а сервопривод (Рисунок 6 поз. 9) поворачивается в верх на 10° относительно плоскости забоя. Затем на мобильном устройстве определения координатами экскаватора в забое поворотная платформа поворачивается в начальную точку (поворот в лево до срабатывания концевого выключателя, что соответствует положению «повернуто на 0°»). На обоих устройствах включаются модули УФРУДН. Определение направления источника сигнала производится с помощью амплитудного метода, что позволяет достаточно точно спозиционировать устройства друг на друга. Для этого поворотная платформа на мобильном устройстве начинает поворачиваться от положения 0° к положению 350° до достижения максимального качества приема ультразвукового сигнала приемником УФРУДН. Далее производится подстройка направления устройств друг на друга с применением УФРУДН по тому же принципу, но поворачивается уже поворотная платформа на стационарном устройстве в сторону, с которой УФРУДН зафиксирован наиболее качественный сигнал до получения четкого основного лепестка на диаграмме направленности в вычислительном модуле УФРУДН, что означает завершение первичной синхронизации мобильного и стационарного устройств друг на друга, и точечный лазерный излучатель (Рисунок 6 поз. 5) находится напротив пластины с фотодиодами (Рисунок 5 поз. 5) в горизон-



Рис. 7. Зависимость изменения расчетного размера отрезка АВ на один шаг у энкодеров с разным соотношением шагов/оборотов на расстоянии 100 метров до экскаватора

тальной плоскости. На стационарном устройстве включается точечный лазерный излучатель (Рисунок 6 поз. 5), а сервопривод (Рисунок 6 поз. 9), начинает изменять угол вертикального положения по направлению к плоскости площадки, пока один или несколько фотодиодов на мобильном устройстве (Рисунок 5, поз. 5) не зафиксируют воздействие на них светового пятна от лазерного излучателя (Рисунок 6 поз. 5). Используя привод поворотной платформы и сервопривод вертикальной подстройки положения датчиков мобильное устройство ориентируется на засвеченные световым пятном от лазерного излучателя направляется на центр массива фотодиодов в мобильном устройстве.

Затем лазерный дальномер (Рисунок 6. Поз. 6) производит измерение расстояния, которое будет соответствовать длине стороны АВ в треугольнике АВС (Рисунок 4).

Важным элементом в системе определения координат экскаватора в забое является абсолютный энкодер, точность измерения, которого имеет значительное влияние на конечный результат. На рисунке 7 показана зависимость изменения расчетного размера отрезка АВ на один шаг у энкодеров с разным соотношением шагов/оборот на расстоянии 100 метров до экскаватора.

Так как угол САВ (Рисунок 4) измеряется по данным от энкодера встроенного в поворотную платформу стационарного устройства, то от точности его измерения зависит точность определения горизонтальной и верти-

кальной координаты экскаватора. Из рисунка 7 видно, что при условии расстояния от въездных ворот до экскаватора не более 100 метров достаточной точностью обладает уже энкодер с 4096 делениями на оборот, у которого разброс значений длины стороны ВС будет лежать в диапазоне 150 мм. При удалении экскаватора от въездных ворот более чем на 100 метров, потребуются значительное увеличение точности энкодера, так как для правильного позиционирования автономного.

Заключение

В ходе работ, описанных в статье выполнен системный анализ процесса определения координат техники, применяемой на разрезах и карьерах, определено, что возможно производить точное позиционирование экскаватора в забое без использования средств спутниковой навигации. Показана перспективность применения систем позиционирования на основе наземного оборудования. Разработан способ определения координат экскаватора в забое, обеспечивающий подъезд автономного транспортного средства под погрузку с требуемой точностью. Произведена эскизная проработка комплекта оборудования, обеспечивающего получения координат экскаватора в предложенной координатной системе забоя. Выполнено исследование типовых модельных рядов абсолютных энкодеров, в ходе которого получена зависимость точности позиционирования экскаватора на расстоянии 100 метров от въездных ворот на один шаг энкодера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Типовые технологические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. М. «Недра», 1982. 405 с
2. 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; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39472> (дата обращения: 24.10.2024).
3. Autonomous Mining Equipment And Vehicles Global Market Report 2022 // ReportLinker URL: <https://www.reportlinker.com/p06320349/Autonomous-Mining-Equipment-And-Vehicles-Global-Market-Report.html> (дата обращения: 24.10.2024).
4. Global autonomous mining truck population tops thousand mark, to reach 1,800 by 2025 — report // Mining. Com. — 2022. — URL: <https://www.mining.com/global-autonomous-mining-truck-population-tops-thousand-mark-to-reach-1800-by-2025-report/> (дата обращения: 24.10.2024).
5. Trucks // Komatsu URL: <https://www.komatsu.com/en/products/trucks/> (дата обращения: 24.10.2024).
6. Liebherr partners with Hexagon to deliver next generation mine automation // Press release URL: <https://www.liebherr.com/shared/media/corporate/news/news-2021/09/13/min/hexagon/liebherr-press-release-minexpo-hexagon.pdf> (дата обращения: 24.10.2024).
7. Milestone: Caterpillar surpasses 5 billion tonnes of material autonomously hauled // Cat URL: https://www.cat.com/en_US/news/machine-press-releases/milestone-caterpillar-surpasses-5-billion-tonnes-of-material-autonomously-hauled.html (дата обращения: 24.10.2024).
8. Hamada T, Saito S Autonomous Haulage System for Mining Rationalization // Hitachi review. 2018. №Vol.67, №1.
9. Лебедев В. Системы активной безопасности в добывающей индустрии // Золото и технологии. 2022. №4 (58). С. 106–110.
10. Global Positioning System — GPS NAVSTAR GPS NAVigation Satellites providing Time And Range GPS-spoofing. Date Views 24.10.2024 tadviser.com/index.php/Article:GPS.
11. Israel fakes GPS locations to deter attacks, but it also throws off planes and ships. Date Views 24.10.2024 www.npr.org/2024/04/22/1245847903/israel-gps-spoofing.
12. Zeng, Kexiong & Shu, Yuanchao & Liu, Shinan & Dou, Yanzhi & Yang, Yaling. (2017). A Practical GPS Location Spoofing Attack in Road Navigation Scenario. 85–90. 10.1145/3032970.3032983.
13. Кизилев, С.А. Концепция применения технологий компьютерного зрения для управления автономным транспортом / С.А. Кизилев, М.С. Никитенко // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2020. — № 6. — С. 235–238. — EDN EHRBNE.
14. Горное дело: Терминологический словарь / Под научной редакцией акад. РАН К.Н. Трубецкого, чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунова. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство «Горная книга», 2016. — 635 с. ISBN 978-5-98672-435-5 (в пер.)
15. Эксплуатация карьерного оборудования. Изучение конструкции и правил эксплуатации карьерного экскаватора: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: С.Ю. Кувшинкин, П.В. Иванова, Д.А. Шибанов. СПб, 2021. 43 с.

© Кизилев Сергей Александрович (sergkizilov@gmail.com); Никитенко Михаил Сергеевич (itd.mseng@gmail.com);

Худоногов Данила Юрьевич (admolv@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»