

КОНТРОЛЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КОВША ЭКСКАВАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКОВ

Бугебрин Ш., Михайлов А.В., Казаков Ю.А.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: карьер, экскаватор, рабочий цикл, самосвал, позиционирование, датчики.

Аннотация. В статье приведены прогнозы по использованию таких датчиков, как: lidar, лазерный датчик, GPS в целях контроля рабочего органа экскаватора (рука, стрела, ковш). С учетом ряда факторов: статус уступа, стабильность машины, нагрузка, видимость оператора и близость к окружающим объектам, дан анализ категорий рисков возникновения аварийных ситуаций. Система сможет помочь оператору точно позиционировать экскаватор в соответствии с откосом и самосвалом. Анализ кинематики рабочего органа экскаватора в рамках системы координации D-H поможет системе экскаватора контролировать процесс разгрузки ковша, при поддержке датчиков. Это позволит обеспечить точную высоту ковша и траекторию движения рабочего органа от откоса к месту разгрузки. Взаимодействие системы управления и искусственного интеллекта могут быть основой для совершенствования оборудования выемочно-транспортного комплекта с интегрированным в него элементами искусственного интеллекта для снижения вероятности рисков возникновения аварийных ситуаций и соблюдения техники безопасности при проведении работ.

CONTROL OF EXCAVATOR BUCKET POSITIONING USING SENSORS

Bougebrine S., Mikhailov A.V., Kazakov Yu.A.

Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint-Petersburg

Keywords: open pit, excavator, working cycle, dump truck, positioning, sensors.

Abstract. The article present prediction on the use of sensors such as: lidar, laser sensor, GPS in reason to control the working body of excavator (arm, boom, bucket). By considering factors such as bench status, equipment stability, load, operator visibility, and proximity to surrounding structures, the analysis of risks categories occurrence of accidents is provided. The system will be able to help operator to precise excavator positioning according to the slope and dump truck. The analysis of kinematic working body of the excavator within the coordination system D-H will assist the system of excavator to control the unloading process of the bucket, with the support of the sensors. This will be able ensure the precise height of the bucket and the trajectory of working body from slope to unloading position. The collaboration of the control system and AI could be a foundation for improving the complex machinery of excavation-transport with the artificial intelligence elements integrated into it to reduce the probability of accident situations risks and compliance with safety standards during the work.

Введение. Комплект машин экскаватор-самосвал является одним из наиболее часто используемых при добыче полезных ископаемых, и анализу его функционирования уделяется достаточно много внимания в ряде исследований [1-4].

Основной целью текущих исследований в горнодобывающем секторе является анализ производительности комплекта экскаватор-самосвал [5-7].

В процессе эксплуатации отмечается значительное влияние человеческого фактора на эффективность функционирования комплекта и безопасность проведения процесса добычи. Ошибки операторов горных машин могут привести к падению машин в карьер или их столкновению при погрузке, а ошибки оператора карьерного экскаватора могут стать причиной перегрузки или недогрузки самосвалов [8, 9].

Обзор современных систем. Система позиционирования рабочего оборудования экскаватора является 3D-системой контроля, предназначенной для повышения эффективности функционирования экскаватора, которая позволяет видеть текущую ситуацию при позиционировании экскаватора в системе координат в режиме реального времени. В 3D-системах позиционирование экскаватора определяется в абсолютных координатах относительно цифровой модели выбранной поверхности. Система координат может быть

выбрана исходя из удобства использования для определенных видов работ [10]. Позиционирование рабочего органа машины определяется в координатах стандартными геодезическими методами, что позволяет сравнивать текущие координаты с координатами на цифровой модели и вносить необходимые коррективы [11, 12].

При позиционировании ковша экскаватора относительно центра поворота верхнего строения, во всех системах используется алгоритм, который базируется на тригонометрических расчетах [13-15]. Для выполнения этих расчетов системе необходимо задать текущие углы наклона элементов гидроманипулятора: стрела, рукоять и ковш, а также расстояния между осями вращения этих элементов. Углы наклона во всех системах управления определяются датчиками угла, установленными на всех элементах, а расстояния определяются один раз при установке системы и записываются в панель контроля системы для правильной конфигурации машины [16].

В статье представлен анализ способов управления процессом погрузки горной массы в самосвал и прогнозирование способов контроля процесса, что может послужить подготовкой к созданию усовершенствованной системы автоматизированного управления.

Материалы и методы. Важным моментом является рациональное расстояние между экскаватором и самосвалом при погрузке горной массы. В соответствии с нормами безопасности это расстояние отмечается в пределах не менее 1 м. Но существует ряд других факторов, которые могут влиять на это расстояние, например: параметры рабочего органа, угол разгрузки, параметры борта картера и т.д. (рис. 1).

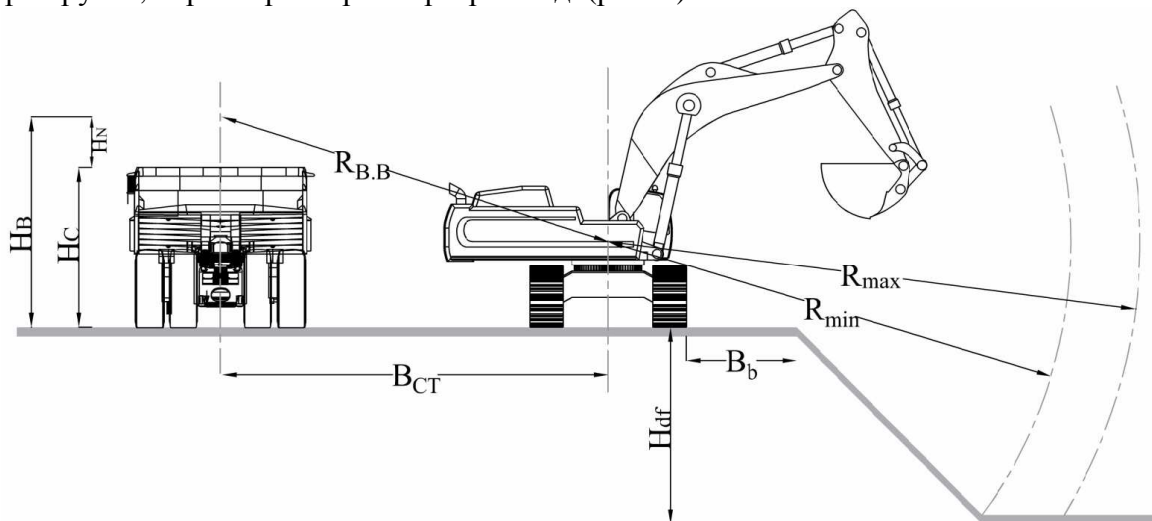


Рис. 1. Схема взаимодействия экскаватор и самосвал в период экскавации на уступе карьера

Расстояние между парковочными осями экскаватора и самосвала можно определить как [17, 18]:

$$B_{CT} = \sqrt{R_{B,B}^2 + H_B^2},$$

где H_B – максимальная высота разгрузки ковша, м; $R_{B,B}$ – максимальный радиус разгрузки при наибольшей высоте разгрузки, м

$$R_{B,B} = 0,75(l_p + l_c),$$

где l_p – длина рукояти экскаватора, м; l_c – длина стрелы экскаватора, м.

$$H_{df} = H_{m.k} - B_b,$$

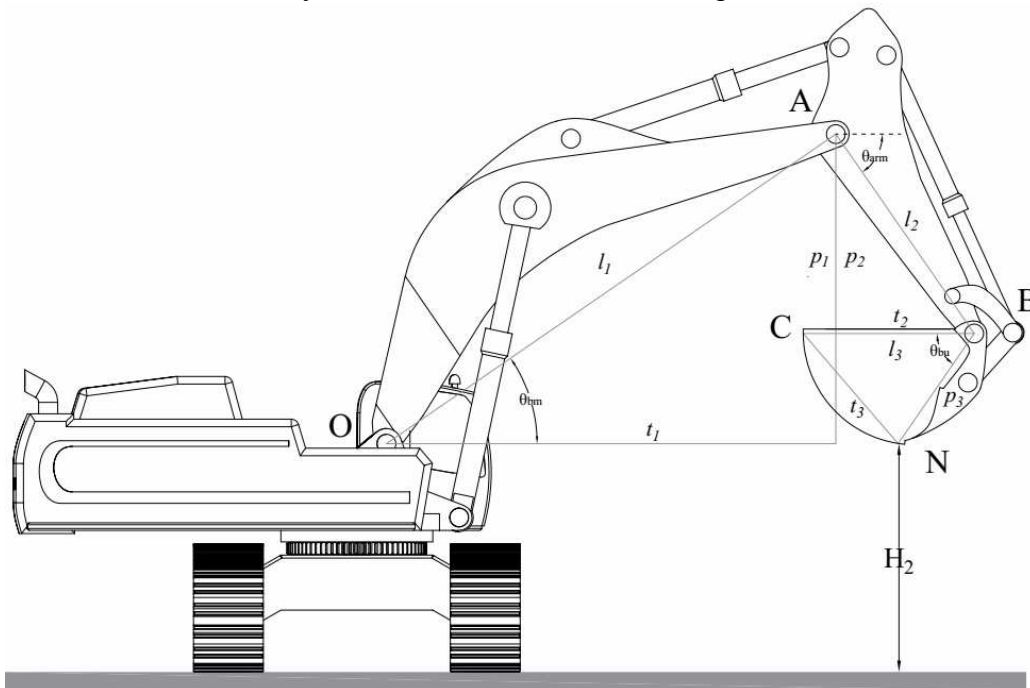
где H_{df} – глубина карьера, м; $H_{m.k}$ – максимальный радиус копания, м; B_b – минимальное расстояние от края откоса карьера до гусениц экскаватора, м.

Параметры откоса карьера нерудных материалов: угол откоса 45° для песчаных и торфяных грунтов, глубина залежи 5 м, а слой воды в карьере 2 м в торфяном и более 1 м в песчаном карьере (рис. 1), берма безопасности при размещении экскаватора от 0,5 м до 1,5 м.

Одним из аспектов процесса погрузки в кузов самосвала является соблюдение минимального расстояния в 0,5 метра по высоте (норма безопасности) между ковшом и

кузовом, что имеет решающее значение для предотвращения повреждения борта кузова ковшем и обеспечения безопасной разгрузки горной массы. Такие факторы, как рельеф местности, движение экскаватора, могут вызвать колебания расстояния по высоте.

Анализ кинематики рабочего органа экскаватора. Кинематическая модель рабочего органа экскаватора построена с целью оценки и контроля точного положения наконечника ковша. Даже если не принимать во внимание поворот экскаватора, рабочие органы можно описать как манипулятор с тремя степенями свободы. Согласно кинематическому анализу, приведенному на рисунке 2, система координат стрелы установлена в точке O , а θ_{bm} – угол совместный стрелы. Точка соединения рукояти со стрелой A . Угол совместный рукояти определяется как θ_{arm} . B – точка соединения ковша и стрелы; здесь задается система координат ковша, где θ_{bu} – угол совместная ковша. N – вершина ковша [21-23].



O – исходная точка системы координат;	θ_{boom} – угол наклона стрелы, °;	p_1 – высота стрелы, м;
A – координата перемещения стрелы, м;	θ_{arm} – угол наклона рукояти, °;	p_2 – высота рукояти, м;
B – координата перемещения рукояти, м;	θ_{bucket} – угол наклона ковша, °;	p_3 – высота ковша, м;
C – координата перемещения ковша, м;	t_1 – проекция стрелы, м;	l_1 – длина стрелы, м;
N – координата перемещения дна ковша;	t_2 – проекция рукояти, м;	l_2 – длина рукояти, м;
H_2 – расстояние между землей и ковшом, м;	t_3 – проекция ковша, м;	l_3 – длина ковша, м

Рис. 2. Система координат D-H рабочего устройства экскаватора

Система координат Денавита-Хартенберга (D-H) и векторный алгоритм могут быть использованы для описания кинематики экскаватора в процессе разгрузки в точке N , соответствующей нижней части ковша [24].

В системе координат D-H каждому соединению экскаватора соответствует своя координатная сетка. Преобразование между этими сетками может быть описано с помощью параметров: длины соединения и угла наклона соединения, что систематизирует описание геометрии экскаватора [24, 25].

Векторный алгоритм может быть использован для расчета необходимого вертикального положения и ориентации концевой движитель экскаватора (ковша) основываясь на углах соединений, что обеспечит точный контроль траектории движения ковша [25].

В соответствии с установленной системой координат D-H и векторным алгоритмом, могут быть записаны уравнения

$$A(X_A, Y_A = (t_1, p_1) = (l_1 \cos \theta_{boom}; l_1 \sin \theta_{boom}) ;$$

$$B(X_B, Y_B = (t_1 + t_2, p_1 - p_2) = (l_1 \cos \theta_{boom} + l_2 \cos \theta_{arm}; l_1 \sin \theta_{boom} - l_2 \sin \theta_{arm}) ;$$

$$C(X_C, Y_C = (t_1 + t_2 - t_3, p_1 - p_2 - p_3) =$$

$$= (l_1 \cos \theta_{boom} + l_2 \cos \theta_{arm} - l_3 \sin \theta_{bucket}; l_1 \sin \theta_{boom} - l_2 \sin \theta_{arm} - l_3 \cos \theta_{bucket});$$

$$N(X_N, Y_N = (t_1 + t_2 - t_3, p_1 - p_2 - p_3) =$$

$$= (l_1 \cos \theta_{boom} + l_2 \cos \theta_{arm} - l_3 / 2; l_1 \sin \theta_{boom} - l_2 \sin \theta_{arm} - p_3).$$

Контроль высоты расположения ковша экскаватора в процессе разгрузки может быть обеспечен за счет комбинации сенсорных технологий и гидравлических систем. Такие датчики, как LiDAR и лазерный дальномер, могут быть установлены на стреле, рукояти и ковше экскаватора (рис. 3).

Система будет контролировать позиционирование ковша экскаватора с высокой точностью при помощи датчиков совместной работы. Сенсор LiDAR использует импульсное лазерное



Рис. 3. Динамическая рабочая зона экскаватора

излучение для измерения расстояний, генерируя трехмерные данные. Датчиками расстояния (инфракрасные датчики) измеряется расстояние между рабочим органом экскаватора и землей или зоной разгрузки. Система GPS, оснащенная GNSS-приемниками, установленными на экскаваторе, обеспечивает точное позиционирование машины на рабочей площадке. Эти системы работают, совместно предоставляя в режиме реального времени данные о положении и перемещении элементов рабочего органа экскаватора [26, 27].

Использование системы контроля позиционирования рабочего органа экскаватора, основанной на анализе кинематической модели и данных перемещения, обеспечит обработку данных системой контроля, которая посылает команды в гидравлическую систему для регулировки положения стрелы, рукояти и ковша, тем самым, контролируя позиционирование рабочего органа экскаватора. Такое сочетание технологий позволяет точно управлять рабочим органом экскаватора, повышая эффективность и безопасность таких операций, как разгрузка горной массы. Применение этих технологий может варьироваться в зависимости от типа экскаватора и специфических требований к технологической операции.

Структурная модель продолжительности рабочего цикла одноковшового полноповоротного экскаватора определяется суммой отдельных рабочих операций

$$t_{цз} = t_K + t_{под} + t_{пов.гр} + t_B + t_{пов.х} + t_{оп},$$

где t_K – продолжительность операции копания, с; $t_{под}$ – продолжительность операции подъема ковша с грунтом, с; $t_{пов.гр}$ – продолжительность поворота платформы и ковша с грунтом к месту выгрузки грунта, с; t_B – продолжительность выгрузки грунта, с; $t_{пов.х}$ – продолжительность поворота платформы с ковшом без грунта обратно в забой, с; $t_{оп}$ – продолжительность опускания ковша, с. [28, 29].

Контроль позиционирования рабочего органа экскаватора (стрелы, рукояти, ковша), обеспечит контроль продолжительности выполнения операций: $t_{под}$, $t_{пов.гр}$, $t_{пов.х}$, $t_{оп}$ с возможностью их совмещения, при которых продолжительность рабочего цикла будет наименьшей при определенных условиях эксплуатации. Подъем совмещают с поворотом платформы с рабочим оборудованием на выгрузку $t_{под}$, $t_{пов.гр}$. Поворот платформы без груза выполняют одновременно с опусканием рабочего оборудования $t_{пов.х}$, $t_{оп}$.

Система не только управляет движением стрелы, рукояти и ковша, но и может регулировать их положение на основе данных, полученных от датчиков. Также обеспечивается защита от несчастных случаев. Если датчики определяют, что ковш находится слишком высоко или слишком низко, гидравлическая система может отрегулировать положение стрелы и рукояти, чтобы добиться рациональной высоты для разгрузки. Также, если самосвал

располагается слишком далеко или близко, система экскаватора обнаружит и покажет на мониторе оператора причину для связи с оператором самосвала.

В перспективе, когда экскаватор работает, любая система изменения углов наклона стрелы может рассчитать правильное положение ковша относительно некоторого исходного положения, то есть система рассчитывает вертикальное и горизонтальное перемещение ковша относительно кузова. Датчик положения кузова системы позиционирования не только определяет текущий крен и тангаж машины, он также определяет угол поворота кузова благодаря встроенному компасу. Эта функция служит для повышения точности системы, так как дополняет работу спутниковых систем.

Заключение. Интеграция датчиков в систему контроля экскаваторов – это переломный момент для экскаваторных работ. Эти датчики повышают безопасность, контролируя позиционирование манипуляторов экскаватора в режиме реального времени и, тем самым, предотвращая несчастные случаи. Они также повышают эффективность за счет помощи оператору и автоматизации рабочих функций, сокращая затраты на работу и время. Кроме того, эти датчики обеспечивают безопасность в зонах с серьезным риском аварий или загрязнения и обеспечивают точную навигацию, позволяя экскаватору срезать склон для трубопровода на многие километры без необходимости регулярной геодезической съемки.

В дополнение к этим преимуществам внедрение систем искусственного интеллекта (ИИ) значительно усиливает их. Системы искусственного интеллекта могут автономно выполнять задачи, устраняя необходимость в человеке-операторе в опасных ситуациях. Они могут работать непрерывно, повышая тем самым производительность и эффективность. Кроме того, системы искусственного интеллекта могут адаптироваться к широкому спектру условий окружающей среды, что делает их подходящими для различных сценариев.

Список литературы

1. Бугебрин Ш., Соловьев И.В., Михайлов А.В. Анализ рисков при позиционировании экскаватора на карьере нерудных // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 20. – С. 183-189. –doi.org/10.26160/2658-3305-2023-20-183-189.
2. Demirel N., Taghizadeh A., Khouri S., Tyuleneva E. Optimization of the Excavator-and-Dump Truck Complex at Open Pit Mines – the Case Study // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 41, p. 01006. doi.org/10.1051/e3sconf/20184101006.
3. Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 10-21. – doi.org/10.31897/PMI.2020.1.10.
4. Khakulov V.A., Shapovalov V.A., Karyakin A.T., Ignatov M.V. Research and Improvement of the Current Management of the Job Rhythms of the Intellectual Complex Excavator – Dump Truck in the Adjacent Faces // 2019 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS). – 2019. – P. 258-263. doi.org/10.1109/itqmis.2019.8928399.
5. Вишняков Г.Ю., Пушкарев А.Е., Ботян Е.Ю., Хлопонина В.С. Обоснование рациональных режимов работы карьерных автосамосвалов при сверхнормативной эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №11-1. – С. 24-37. – doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_24.
6. Singh S.P., Narendrula R. Factors affecting the productivity of loaders in surface mines // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2006, vol. 20, pp. 20-32. doi.org/10.1080/13895260500261574.
7. Bakhaev P.K. Automated control of unmanned truck for transport complex of mining industry // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1333, p. 052001. doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052001.
8. Aksenov V.V., Dubinkin D.M., Khoreshok A.A., Markov S.O., Efremkov A.B., Tyulenev M.A. Evaluating the impact of excavator bucket capacity on the output of a haul truck in different variants of their positioning // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 2052, p. 012001. doi.org/10.1088/1742-6596/2052/1/012001.
9. Nasonov M.Y., Lykov Y.V. Effects of working conditions on excavator performance - longevity of metal structures // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194, p. 042017. doi.org/10.1088/1755-1315/194/4/042017.
10. Bender F.A., Goltz S., Braunl T., Sawodny O. Modeling and Offset-Free Model Predictive Control of a Hydraulic Mini Excavator // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2017, vol. 14, pp. 1682-1694. doi.org/10.1109/tase.2017.2700407.
11. Shi Xiaoping. Application of modern surveying technology in the digital mine // Civil Engineering and Energy-Environment. – CRC Press, 2023. – Vol. 1. – P. 156-161.
12. Блищенко А.А. Использование геодезических приборов на открытых горных работах, тенденция применения беспилотных технологий // Colloquium-journal. – 2020. – №14(66). – С. 46-47. – doi.org/10.24411/2520-6990-2020-11902.

13. He Q., Hao P., Zhang D. Modeling and parameter estimation for hydraulic system of excavator's arm // *Journal of Central South University of Technology*. 2008, vol. 15, pp. 382-386. doi.org/10.1007/s11771-008-0072-1.
14. Koivo A.J., Thoma M., Kocaoglan E., Andrade-Cetto J. Modeling and Control of Excavator Dynamics during Digging Operation // *Journal of Aerospace Engineering*. 1996, vol. 9, pp. 10-18. doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(1996)9:1(10).
15. Потюхляев В.Г. Расчет точности построения разбивочной сети с использованием спутниковых навигационных систем // *Записки Горного института*. – 2012. – Т. 199. – С. 325-328.
16. Vähä P.K., Skibniewski M.J. Dynamic Model of Excavator // *Journal of Aerospace Engineering*. 1993, vol. 6, pp. 148-158. doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(1993)6:2(148).
17. Илиополов С.К., Матуа В.П. Технологические карты на устройство земляного полотна и дорожной одежды. – М.: Росавтодор, 2004. – 354 с.
18. Бондарик В.А., Овчинников Э.В. Производство земляных работ: Учеб. пособие для строит. спец. вузов. – Мн.: Высш. школа, 1979. – 128 с.
19. Гусеничный экскаватор UMG E160C / технические характеристики / фото / описание | РСТ ГРУПП | Нижний Новгород [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rus-ap.ru/umg/ekskavatory-gusenichnye/gusenichnyy-ekskavator-e160c.html>.
20. A25G | Articulated Haulers | Overview. Volvo Construction Equipment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.volvoce.com/united-states/en-us/products/articulated-haulers/a25g/>.
21. Ma W., Ma S., Qiao W., Cao D., Yin C. Research on PID Controller of Excavator Electro-Hydraulic System Based on Improved Differential Evolution // *Machines*. 2023, vol. 11, p. 143. doi.org/10.3390/machines11020143.
22. Vahdatikhaki F., Hammad A., Siddiqui H. Optimization-based excavator pose estimation using real-time location systems // *Automation in Construction*. 2015, vol. 56, pp. 76-92. doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.006.
23. Wang X., Sun H., Feng M., Ren Z., Liu J. Dynamic Analysis of Working Device of Excavator under Limit Digging Force // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2021, vol. 102, pp. 1137-1144. doi.org/10.1007/s40032-021-00725-4.
24. Li X., Wang G., Miao S., Li X. Optimal design of a hydraulic excavator working device based on parallel particle swarm optimization // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017, vol. 39, pp. 3793-3805. doi.org/10.1007/s40430-017-0798-5.
25. Fu T., Zhang T., Li G., Qiao J., Sun G., Yue H., et al. Design and Development of an Unmanned Excavator System for Autonomous Mining // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023, vol. 1060, pp. 430-438. doi.org/10.1007/978-981-99-4334-0_55.
26. Eraliev O.M.U., Lee K-H., Shin D-Y., Lee C-H. Sensing, perception, decision, planning and action of autonomous excavators // *Automation in Construction*. 2022, vol. 141, p. 104428. doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104428.
27. Capony A., Lorino T., Muresan B., Baudru Y., Dauvergne M., Dunand M., et al. Assessing the Productivity and the Environmental Impacts of Earthwork Machines: A Case Study for GPS-Instrumented Excavator // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012, vol. 48, pp. 256-265. doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1006.
28. Rafi Y.F/, Witjaksana B. Productivity analysis of excavator and dump truck heavy equipment on digging and loading works flood control Afvoer Watudakon Mojokerto // *Jurnal Teknik Sipil*. 2023, vol. 23, no. 2, pp. 205-210. doi.org/10.26418/jtst.v23i2.61025.
29. Баловнев В.И. Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты. – М.: МАДИ, 2014. – 180 с.

References

1. Bouguebrine C., Soloviev I.V., Mikhailov A.V. Risk analysis in the positioning of the excavator in the mining of nonmetallic materials // *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023, no. 20, pp. 183-189. doi.org/10.26160/2658-3305-2023-20-183-189.
2. Demirel N., Taghizadeh A., Khouri S., Tyuleneva E. Optimization of the Excavator-and-Dump Truck Complex at Open Pit Mines – the Case Study // *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 41, p. 01006. doi.org/10.1051/e3sconf/20184101006.
3. Kurganov V., Gryaznov M., Kolobanov S. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes // *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 10-21. doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10.
4. Khakulov V.A., Shapovalov V.A., Karyakin A.T., Ignatov M.V. Research and Improvement of the Current Management of the Job Rhythms of the Intellectual Complex Excavator – Dump Truck in the Adjacent Faces // *2019 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS)*. – 2019. – P. 258-263. doi.org/10.1109/itm.2019.8928399.
5. Vishnyakov G.Yu., Pushkarev A.E., Botyan E.Yu., Khloponina V.S. Justification of rational modes of operation of quarry dump trucks in case of over-normative operation // *Mining information and analytical bulletin*. 2023, vol. 11-1, pp. 24-37. doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_24.
6. Singh S.P., Narendrula R. Factors affecting the productivity of loaders in surface mines // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2006, vol. 20, pp. 20-32. doi.org/10.1080/13895260500261574.
7. Bakhaev P.K. Automated control of unmanned truck for transport complex of mining industry // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1333, p. 052001. doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052001.
8. Aksenov V.V., Dubinkin D.M., Khoreshok A.A., Markov S.O., Efremenkov A.B., Tyulenev M.A. Evaluating the

- impact of excavator bucket capacity on the output of a haul truck in different variants of their positioning // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 2052, p. 012001. doi.org/10.1088/1742-6596/2052/1/012001.
9. Nasonov M.Y., Lykov Y.V. Effects of working conditions on excavator performance - longevity of metal structures // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194, p. 042017. doi.org/10.1088/1755-1315/194/4/042017.
 10. Bender F.A., Goltz S., Braunl T., Sawodny O. Modeling and Offset-Free Model Predictive Control of a Hydraulic Mini Excavator // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2017, vol. 14, pp. 1682-1694. doi.org/10.1109/tase.2017.2700407.
 11. Shi Xiaoping. Application of modern surveying technology in the digital mine // Civil Engineering and Energy-Environment. – CRC Press, 2023. – Vol. 1. – P. 156-161.
 12. Blyshchenko A.A. use of geodetic instruments in open-pit mining, the trend of using unmanned technologies // Colloquium-journal. 2020, vol. 66, no. 14, pp. 46-47. doi.org/10.24411/2520-6990-2020-11902.
 13. He Q., Hao P., Zhang D. Modeling and parameter estimation for hydraulic system of excavator's arm // Journal of Central South University of Technology. 2008, vol. 15, pp. 382-386. doi.org/10.1007/s11771-008-0072-1.
 14. Koivo A.J., Thoma M., Kocaoglan E., Andrade-Cetto J. Modeling and Control of Excavator Dynamics during Digging Operation // Journal of Aerospace Engineering. 1996, vol. 9, pp. 10-18. doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(1996)9:1(10).
 15. Potyukhlyayev V.G. The calculation of accuracy of breaking the network using satellite navigation systems // Journal of Mining Institute. 2012, vol. 199, pp. 325-328.
 16. Vähä P.K., Skibniewski M.J. Dynamic Model of Excavator // Journal of Aerospace Engineering. 1993, vol. 6, pp. 148-158. doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(1993)6:2(148).
 17. Iliopolov S.K., Matua V.P. Technological maps for earth bed and pavement construction. – M.: Rosavtodor, 2004. – 354 p.
 18. Bondarik V.A., Ovchinnikov E.V. Production of earthworks: Textbook for construction specialties of universities. – Mn.: Higher school, 1979. – 128 p.
 19. Crawler excavator UMG E160C / technical characteristics / photo / description | RST GROUP | Nizhny Novgorod [Electronic resource]. – Access mode: <https://rus-ap.ru/umg/ekskavatory-gusenichnye/gusenichnyy-ekskavator-e160c.html>.
 20. A25G | Articulated Haulers | Overview. Volvo Construction Equipment [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.volvoce.com/united-states/en-us/products/articulated-haulers/a25g/>.
 21. Ma W., Ma S., Qiao W., Cao D., Yin C. Research on PID Controller of Excavator Electro-Hydraulic System Based on Improved Differential Evolution // Machines. 2023, vol. 11, p. 143. doi.org/10.3390/machines11020143.
 22. Vahdatikhaki F., Hammad A., Siddiqui H. Optimization-based excavator pose estimation using real-time location systems // Automation in Construction. 2015, vol. 56, pp. 76-92. doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.006.
 23. Wang X., Sun H., Feng M., Ren Z., Liu J. Dynamic Analysis of Working Device of Excavator under Limit Digging Force // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. 2021, vol. 102, pp. 1137-1144. doi.org/10.1007/s40032-021-00725-4.
 24. Li X., Wang G., Miao S., Li X. Optimal design of a hydraulic excavator working device based on parallel particle swarm optimization // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017, vol. 39, pp. 3793-3805. doi.org/10.1007/s40430-017-0798-5.
 25. Fu T., Zhang T., Li G., Qiao J., Sun G., Yue H., et al. Design and Development of an Unmanned Excavator System for Autonomous Mining // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2023, vol. 1060, pp. 430-438. doi.org/10.1007/978-981-99-4334-0_55.
 26. Eraliev O.M.U., Lee K-H., Shin D-Y., Lee C-H. Sensing, perception, decision, planning and action of autonomous excavators // Automation in Construction. 2022, vol. 141, p. 104428. doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104428.
 27. Capony A., Lorino T., Muresan B., Baudru Y., Dauvergne M., Dunand M., et al. Assessing the Productivity and the Environmental Impacts of Earthwork Machines: A Case Study for GPS-Instrumented Excavator // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2012, vol. 48, pp. 256-265. doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1006.
 28. Rafi Y.F., Witjaksana B. Productivity analysis of excavator and dump truck heavy equipment on digging and loading works flood control Afvoer Watudakon Mojokerto // Jurnal Teknik Sipil. 2023, vol. 23, no. 2, pp. 205-210. doi.org/10.26418/jtst.v23i2.61025.
 29. Balovnev V.I. Determination of optimal parameters and selection of road-building machines by the method of analysis of the fourth coordinate. – M.: MADI, 2014. – 180 p.

Сведения об авторах:

<i>Сведения об авторах:</i>	<i>Information about authors:</i>
Бугебрин Шуаиб – аспирант	Bouguebrine Chouaib – postgraduate student
Михайлов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения	Mikhailov Aleksandr Viktorovich – doctor of technical science, professor of Department of mechanical engineering
Казakov Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, ассистент кафедры машиностроения s223100@stud.spmi.ru	Kazakov Yuri Alekseevich – candidate of technical sciences, assistant of Department of mechanical engineering

Получена 11.04.2024