

Научная статья

УДК 621.879.48

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-42-50

Либерман Яков Львович, Лукашук Ольга Анатольевна, Маалаоуи Хамед

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

* для корреспонденции: o.a.lukashuk@urfu.ru

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РОТОРНОГО КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА, ОСНАЩЕННОГО СИСТЕМОЙ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ**Информация о статье**

Поступила:

31 октября 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

14 ноября 2025 г.

Принята к печати:

15 ноября 2025 г.

Опубликована:

18 декабря 2025 г.

Ключевые слова:многоковшовый экскаватор,
ротор, добыча, система
управления, алгоритм, авто-
матизация**Аннотация.**

В современных условиях роста цен на энергоресурсы и увеличения объемов добычи полезных ископаемых особую актуальность приобретает совершенствование технологических процессов работы карьерных экскаваторов. Существующие методы управления не в полной мере отвечают требованиям производительности и безопасности. Статья посвящена разработке алгоритмов работы системы управления перемещениями ротора карьерного роторного экскаватора с выдвижной или телескопической стрелой, способной оптимизировать процесс добычи полезных ископаемых. В ходе исследования проведен анализ существующих систем управления, разработана структура новой системы, включающей подсистемы контроля пространственного положения ротора, командный контроллер и подсистемы непосредственного управления перемещениями. Предложена оригинальная архитектура системы с возможностью переключения между автоматическим и ручным режимами управления. Предложены оригинальные алгоритмы работы в пяти различных режимах цикла, учитывающие особенности конструкции экскаватора и характеристики разрабатываемого грунта: базовый режим с последовательными перемещениями ротора; режим без холостых ходов с возможностью копания в обе стороны; режим с совмещением движений; режим с раздельными рабочими движениями и диагональными холостыми перемещениями; продольно-поперечный режим с чередующимися перемещениями. Описана структура программного управления с использованием кадров, содержащих информацию о требуемых перемещениях ротора. Проведено моделирование работы системы в различных производственных условиях. Практическая реализация системы позволяет существенно снизить зависимость от субъективных качеств машиниста, повысить производительность работы экскаватора, обеспечить более точное позиционирование рабочего органа и оперативно реагировать на нештатные ситуации при переключении между режимами управления. Внедрение системы управления перемещениями ротора карьерного роторного экскаватора способствует повышению эффективности и безопасности производственного процесса. Автоматизация роторного экскаватора является обоснованной стратегией, направленной на повышение устойчивости, производительности и конкурентоспособности горнодобывающих предприятий.

Для цитирования: Либерман Я.Л., Лукашук О.А., Маалаоуи Хамед. Алгоритмизация работы роторного карьерного экскаватора, оснащенного системой программного управления // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 6 (182). С. 42-50. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-42-50, EDN: KFSHND

В свете экономического подъема последнего десятилетия, совпавшего с периодом устойчивого развития угледобывающей отрасли, российские компании активно увеличивают извлечение бурого угля – наиболее экономически выгодного энергоресурса. Капиталовложения в угольные предприятия возросли в 2,5 раза, что отражает позитивную динамику отрасли. Как указано в Программе развития

угольной промышленности России на период до 2035 года [1], современный объем добычи превосходит 440 миллионов тонн ежегодно, увеличившись в 1,3 раза за прошедшее десятилетие. Это происходит на фоне общемирового повышения стоимости энергоносителей, стимулирующего развитие отечественной угледобычи.

Горнодобывающая промышленность остается одной из ключевых отраслей мировой экономики, однако ее развитие сдерживается высокой стоимостью эксплуатации техники, зависимостью от человеческого фактора и нестабильностью производственных процессов. В последние годы внедрение цифровых технологий, включая системы мониторинга, автоматизированного управления и прогнозной аналитики, становится важным инструментом повышения рентабельности. Особое значение при этом приобретает оптимизация работы карьерных экскаваторов – центрального звена технологической цепи добычи [2-4].

В современных условиях большинство горнодобывающих предприятий сталкивается с проблемами, связанными с сохранением устаревших технологических подходов на основных этапах добычи полезных ископаемых [5-7]. Многие производственные процессы до сих пор реализуются по принципам, сложившимся десятилетия назад, что снижает общую эффективность и гибкость производственных цепочек. Проведение комплексной модернизации в отрасли представляет собой не только стратегическое направление повышения производительности, но и важнейший фактор обеспечения промышленной безопасности [8, 9]. В рамках достижения целей автоматизации и цифровизации горнодобывающего производства активно применяются современные методы управления, включая цифровые двойники, системы искусственного интеллекта, IoT-технологии и адаптивное регулирование технологических режимов и другие методы [10-13].

В современных условиях развития горнодобывающей промышленности особую актуальность приобретает вопрос повышения эффективности и безопасности производственных процессов. Рост цен на энергоресурсы и увеличение объемов добычи полезных ископаемых требуют внедрения инновационных решений в области автоматизации и управления карьерной техникой.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования технологических процессов добычи полезных ископаемых с помощью карьерного оборудования. Существующие методы управления роторными экскаваторами не в полной мере отвечают современным требованиям производительности, надежности и безопасности. При этом эффективность использования современной карьерной техники в значительной степени зависит от квалификации машиниста и его способности быстро принимать решения в изменяющихся условиях работы [14, 15].

Статистические данные свидетельствуют о существенном снижении производительности (на 30–40%) при работе неопытного оператора, дополнительное падение эффективности на 15–20% вследствие утомления и уменьшении скорости операций на 10% в сложных производственных условиях [16].

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка автоматизированных систем управления, способных обеспечить безопасную и эффек-

тивную эксплуатацию горнодобывающего оборудования без непосредственного участия человека.

Цель исследования заключается в разработке и обосновании системы управления перемещениями ротора карьерного роторного экскаватора, позволяющей оптимизировать процесс добычи полезных ископаемых.

На открытых горных работах широкое применение получили роторные экскаваторы, имеющие ряд преимуществ перед другими землеройными машинами. Они обеспечивают непрерывное действие, способствуют поточности и автоматизации процесса производства, а также гарантируют максимальную производительность и интенсивность работ при минимальных затратах [17].

Анализ систем управления роторными экскаваторами показывает необходимость разработки интегрированных решений, объединяющих возможности автоматизированных систем и оператора [18-20].

Автоматизация процессов позволяет существенно повысить эффективность горных работ за счет: контроля положения ротора в пространстве, оптимизации технологических операций, снижения нагрузки на оператора. Современные системы управления должны обеспечивать: высокую точность позиционирования механизмов, оптимальный режим работы электроприводов, автоматизацию сложных технологических операций. Перспективным направлением является создание комбинированных цифро-аналоговых систем, позволяющих максимально использовать профессиональный опыт машиниста при одновременном повышении производительности и безопасности работ [21-25].

Предлагаемая система управления перемещениями ротора карьерного роторного экскаватора предназначена преимущественно для экскаваторов с выдвижной или телескопической стрелой и ориентирована на использование в рамках программного и ручного управления [26].

Она включает в себя три основных части:

1. Подсистему включения-выключения видеокамеры и лазерного дальномера, установленных на стреле экскаватора. С их помощью машинист экскаватора имеет возможность визуально контролировать пространственные положения ротора по координатам X (вдоль стрелы), α – угол поворота стрелы, Z – перемещение ротора по вертикали. Помимо видеокамеры и дальномера в эту подсистему входят элементы отображения получаемой от них информации и представления ее машинисту.

2. Командоконтроллер, содержащий самоблокирующиеся кнопки «а», «b», «с», «d», «е», «f», блоки переключения сигналов по координатам X , α , Z и сигнала задания скорости ротора n , а также блоки включения-выключения цепей обратной связи перемещений ротора по координатам X и α . С их помощью машинист имеет возможность переходить из режима работы системы по программе в режим ручного управления перемещением ротора от джойстиков А, В, С, D, представляющих собой датчики регулируемых сигналов напряжения.

3. Совокупность подсистем непосредственного управления перемещениями ротора по координатам X, α, Z и скоростью вращения ротора n .

В основу построения подсистем, образующих третью часть, положен счетно-импульсивный цикл. Подсистемы управления перемещением ротора по координатам X, α, Z , а также управления скоростью вращения n ротора построены как импульсно-

следящие, а подсистема управления перемещением ротора по координате Z – как позиционная счетно-импульсная.

Перейдем к более детальному рассмотрению системы.

Обратимся к подсистеме управления по координате X . Первым ее блоком является задающее устройство X (ЗУХ), в котором хранится информа-

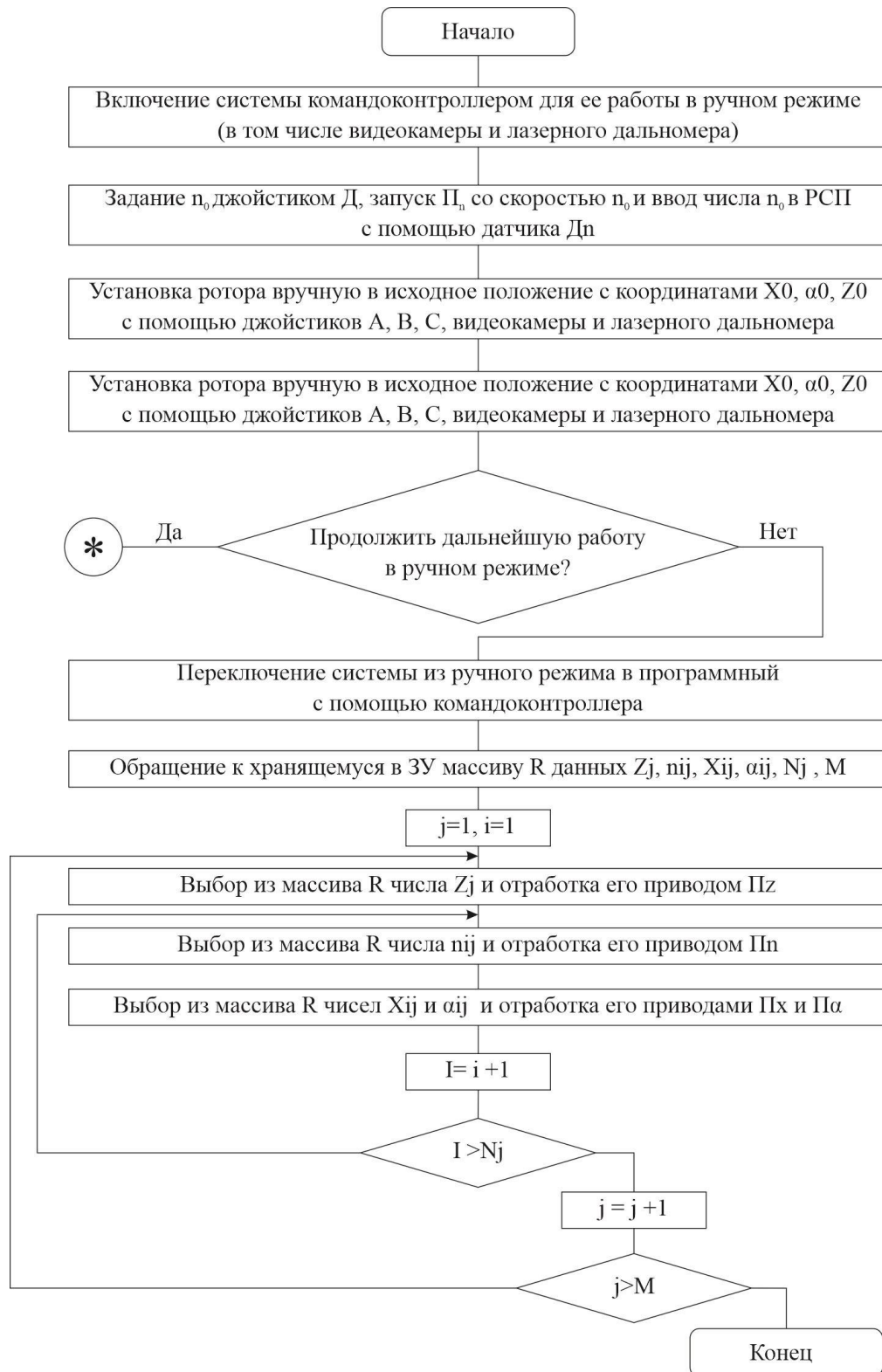


Рис. 1. Алгоритм работы СУ перемещениями ротора в программном режиме (обобщенный алгоритм)
Fig. 1. Algorithm of operation of the rotor motion control system in software mode (generalized algorithm)

ция о требуемых перемещениях X ротора. Некоторая запрограммированная величина X вводится из ЗУХ в интерполятор ИНХ, преобразующий ее в последовательность импульсов. Количество импульсов характеризует величину X , а частота – нужную скорость перемещения ротора этой координате. Интерполятор имеет два выхода: «+» и «-». Если перемещение ротора требуется «вперед», то

импульсы выданных ИНХ с выхода «+». Если «назад», то с выхода «-». Импульсы от интерполятора поступают на соответствующие входы реверсивного счетчика импульсов РСХ. В первом случае при приходе на него каждого импульса число (код) на его выходе возрастает, в противном случае – уменьшается. Код с выхода РСХ поступает в преобразователь «код-напряжение» ПКН и далее через

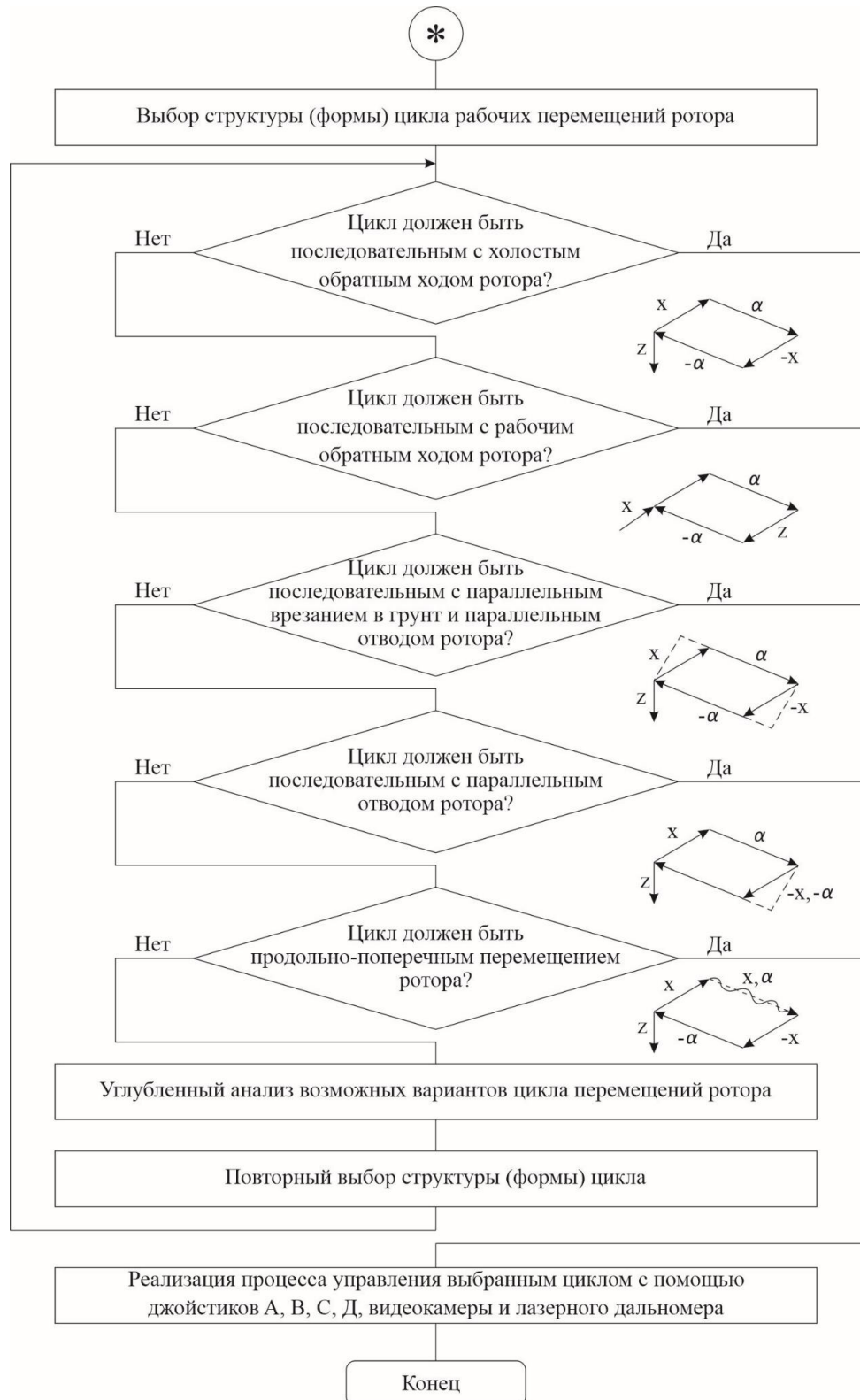


Рис. 2. Алгоритм работы СУ перемещениями ротора в ручном режиме (обобщенный алгоритм)
Fig. 2. Algorithm for operation of the rotor motion control system in manual mode (generalized algorithm)

переключатель X – на привод перемещения ротора по координате X (на привод линейного перемещения стрелы P_x).

При использовании системы в программном решении управляющая программа должна вводиться в нее кадрами.

Всякий ij -ый кадр программы – это описание перемещения ротора между двумя конечными точками i -го отрезка кривой, аппроксимирующей профиль j -го горизонтального сечения забоя.

Для хранения программы должно быть применено стековое запоминающее устройство, в каждую j -ю строку которого последовательно (покадрово) записаны данные, требуемые для выполнения прохода ротора вдоль профиля j -го горизонтального сечения забоя. Для обработки программы эти данные должны быть представлены в виде двоичнокодированных чисел (количеств) импульсов заданной цены и включать в себя следующее:

- X_0 – линейная, α_0 – угловая координаты исходного положения ротора экскаватора в системе полярных координат с центром, совпадающим с осью горизонтального поворота стрелы экскаватора;

- Z_0 – координата исходного положения ротора по вертикали;

- n_0 – средняя скорость вращения ротора;

- Z_j – вертикальный шаг между j -ми и $(j+1)$ -ым горизонтальными сечениями забоя;

- n_{ij} – приращение скорости вращения ротора при обработке ij -го кадра программы;

- X_{ij} и α_{ij} – приращение координат положения ротора в результате отработки ij -го кадра программы;

N_j – предполагаемое наибольшее число кадров программы, обрабатываемых при проходе ротора вдоль профиля j -го горизонтального сечения забоя;

M – предполагаемое число проходов ротора, требуемое для разработки забоя.

Приведение системы в действие в программном режиме начинается после включения видеокамеры и дальномера и установки ротора экскаватора по командам машиниста в исходном положении с координатами X_0 , α_0 и Z_0 с помощью соответствующих кнопок контроллера и джойстиков. Далее управление осуществляется согласно алгоритму, показанному на Рис. 1.

Поскольку СУ предусмотрена возможность работы в программном и ручном режимах, наряду с алгоритмом ее работы по программе был разработан и алгоритм ручного управления перемещением ротора экскаватора (Рис. 2).

Отсчет всех перемещений ротора по координатам X и α в этом случае должен производиться машинистом экскаватора по данным, получаемым с помощью видеокамеры и лазерного дальномера, установленных на стреле экскаватора. Но на долю машиниста приходится не только это. Ему надлежит еще самостоятельно, руководствуясь знаниями об устройстве экскаватора и собственном опыте, выбирать и структуру цикла работы системы. Из чего же, из каких вариантов, он должен вести выбор? Рассмотрим первый вариант, наиболее простой.

Он состоит в последовательных перемещениях ротора по координате X (подвод к поверхности грунта, и его погружение в грунт, на требуемую глубину), затем в перемещении ротора (стрелы) по координате α (на требуемое расстояние), после этого в отводе ротора назад (перемещение его по координате X с минусом), далее в движении ротора в направлении, обратном перемещению α (на расстояние $-\alpha$), и далее в перемещении ротора вниз (обычно) по координате Z (для производства следующего цикла копания грунта).

Перемещение ротора на величины « $-X$ » и « $-\alpha$ » – есть холостые перемещения, в процессе которых разработка забоя не осуществляется. Это снижает производительность разработки, но если ротор экскаватора сконструирован так, что копание грунта возможно при движении по координате α только в одну сторону, то это неисключимо. Обычно это происходит из-за того, что привод вращения ротора имеет большие габариты и смонтирован сбоку от ротора. Если же привод вращения ротора имеет малые габаритные размеры или смонтирован внутри ротора (в полости между ковшами по центру ротора), то разработка грунта может вестись по координате X и «вправо» и «влево». Холостые ходы тогда из цикла перемещений ротора могут быть исключены, и цикл становится последовательным с рабочим обратным ходом ротора. Это второй видоизмененный его вариант. Он включает в себя: подвод ротора по координате X к поверхности грунта и погружение в грунт на требуемую глубину, затем перемещение по координате α на требуемое расстояние, после этого перемещение по координате Z (обычно вниз), движение ротора в направлении $-\alpha$ без прекращения копания, потом снова перемещение вниз по координате Z и т. д.

Производительность разработки забоя при использовании второго варианта цикла по сравнению с первым вариантом оказывается почти в два раза выше. Но это не означает, что первый вариант применять не стоит. Он может быть усовершенствован путем совмещения движений ротора в процессе подвода к поверхности грунта и врезания (перемещение по координате X) с движением по координате α . Таким способом может быть построен третий вариант цикла.

Нельзя, однако, не отметить, что, повышая производительность копания по сравнению с первым вариантом примерно на 15-20%, третий вариант может использоваться ограниченно. Во-первых, движение ротора одновременно в направлениях X и α (по диагонали) реализуемо лишь при использовании в экскаваторе ковшей, по форме представляющих собой сегмент сферы (сферический сегмент). Во-вторых, из-за диагонального рабочего перемещения ротора в забое могут остаться непроработанные зоны, что нежелательно. Избавиться от этих недостатков можно, применив четвертый вариант цикла: рабочие перемещения ротора по направлениям X и α не совмещать, а перемещения в направлениях « $-X$ » и « $-\alpha$ » выполнять одновременно, по диагонали.

Наряду с рассмотренными четырьмя вариантами цикла работы экскаватора, в режиме ручного управления принципиально возможен и еще один режим: с чередующимися и сочетающимися продольными (по координате α) и поперечными (по координате X) перемещениями редуктора. Такое продольно-поперечное перемещение ротора целесообразно при условии применения в нем ковшей сферической формы (сегментов сферы) и при существенной неоднородности (неравномерной твердости) грунта. Последняя должна быть либо предварительно изучена геологами-изыскателями или контролируема машинистом по колебаниям нагрузки на ротор, для чего экскаватор должен быть дополнительно снабжен соответствующим регистрирующими (измерительными) приборами.

Следует отметить, что работа машиниста экскаватора при использовании последнего из рассмотренных вариантов цикла оказывается весьма напряженной и трудоемкой. Поэтому этот цикл, хотя и можно реализовать в другом режиме управления, предпочтительно осуществлять программно. Впрочем, любой из рассмотренных циклов может быть реализован программно. Это возможно с помощью блока «выбор из массива R чисел X_{ij} и α_{ij} и обработка их приводами P_x и P_α » алгоритма, приведенного на Рис. 2. Массив же R данных, записанных в блока ЗУ системы, как уже отмечалось, может быть априори сформирован по результатам геолого-изыскательных результатов исследований грунта забоя, выбранного для разработки. Если же таковых нет, то можно использовать данные о нагрузке приводов при пробном копании забоя.

Разработанная система управления роторным экскаватором обеспечивает управление в автоматическом и ручном режимах, позволяет формировать оптимальную траекторию движения роторного колеса, предохраняет от перегрузок при максимальном наполнении ковшей материалом, увеличивает скорость переработки материала.

Автоматизация и цифровизация горнодобывающей отрасли способна кардинально изменить подход к управлению техникой и производственными процессами. Автоматизация работы экскаваторов — это не просто следование технологическому тренду, а обоснованная стратегия, направленная на повышение устойчивости, эффективности и конкурентоспособности предприятий. В будущем развитие отрасли будет все больше зависеть от интеграции данных, искусственного интеллекта и систем предиктивной аналитики, превращая карьеры в высокотехнологичные производственные комплексы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. № 1582-р (с изменениями на 21.10.2024) [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/565123539> (date of the application: 29.08.2025).

2. Анистратов К. Ю. Разработка стратегии технического перевооружения карьеров // Горная промышленность. 2012. № 4. С. 90–104.

3. Перепелицын А. И., Китляйн Е. Е., Клебанов Д. А. Комплексная система управления промышленной безопасностью и оценки рисков на горнодобывающих предприятиях // Горный журнал. 2012. № 7. С. 55–59.

4. Хорошавин С. А. Повышение эффективности карьерных одноковшовых экскаваторов за счет совершенствования рабочего оборудования : автореферат дис. кандидата техн. наук : 05.05.06 / Хорошавин Сергей Александрович; [Место защиты: Ур. гос. гор. ун-т]. Екатеринбург, 2015. 16 с.

5. Рыльникова М. В. Условия и принципы устойчивого развития горнодобывающих предприятий в период повышенных рисков и глобальных вызовов. Горная промышленность. 2022. № 3. С. 69–73. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-69-73.

6. Рыльников А. Г., Пыталев И. А. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020;(1):470–481. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481.

7. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 24–39.

8. Рыльникова М. В., Струков К. И., Радченко Д. Н., Есина Е. Н. Цифровая трансформация – условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем. Горная промышленность. 2021. № 3. С. 74–78. DOI: 10.30686/1609-91922021-3-74-78.

9. Абраштов А. Ю., Череповицын А. Е. К вопросу операционной эффективности технологической модернизации: особенности горнодобывающего производства // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2024. № 10-1. С. 5–10. DOI: 10.17513/vaael.3768.

10. Панкратов М. В. Цифровая САУ процессом копания роторного экскаватора // ГИАБ. 1999. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-sau-protsessom-kopaniya-rotornogo-eks-kavatora> (дата обращения: 05.09.2025).

11. Клебанов А. Ф., Еремкин И. В., Габусу П. А. Цифровые двойники процессов управления высокоавтоматизированными горнотранспортными комплексами. Горная промышленность. 2025. № 4. С. 61–70. DOI: 10.30686/16099192-2025-4-61-70.

12. Владимиров Д. Я., Клебанов А. Ф., Кузнецов И. В. Цифровая трансформация открытых горных работ и новое поколение карьерной техники. Горная промышленность. 2020. № 6. С. 10–12. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-10-12.

13. Хитрых Д. Цифровые двойники в промышленности: истоки концепции, современный уровень развития и примеры внедрения. Современная электроника. 2022. № 1. С. 62–67. Режим доступа: <https://cloud.cta.ru/iblock/8ac/8ac945382792f55a712e606b51fd68/20220162.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).

14. Мухин В. Д. Исследование системы машинист-экскаватор в режиме транспортных перемеще-

ний ковша : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Свердловский горный ин-т, 1972. С. 22.

15. Трубецкой К. Н. Перспективы применения роботизированной техники на карьерах будущего // ГИАБ. 2013. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-robotizirovannoy-tehniki-na-karierah-buduschego> (дата обращения: 05.09.2025).

16. Трубецкой К. Н., Кулешов А. А., Клебанов А. Ф., Владимиров Д. Я. Современные системы управления горно-транспортными комплексами / Под ред. акад. РАН К.Н. Трубецкого. СПб. : Наука, 2007. 306 с.

17. Астахов В. К., Лагунова Ю. А [и др.] Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. М. : Машиностроение. Горные машины. Т.IV-24. Под общ. ред. В. К. Астахова. 2010. 1480 с.

18. Милосердов Е. Е., Минеев А. В. Блочномодульная модель автоматизированной системы контроля и управления роторным экскаватором большой единичной мощности // ГИАБ. 2013. № 10.

19. Сашурин А. Д. Повышение конкурентоспособности горнодобывающих предприятий на основе внедрения оборудования спутниковой навигации (GPS-технологии) // Известия УГТУ. 2000. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-konkurentosposobnosti-gornodobyvayuschih-predpriyatiy-na-osnove-vnedreniya-oborudovaniya-sputnikovoy-navigatsii-gps> (дата обращения: 05.09.2025).

20. Калашников Ю. Т. Системы электропривода и электрооборудования роторных экскаваторов. - М. : Энергоатомиздат, 1998.

21. Бухгольц В. Д., Снагин В. Г. Автоматическое управление роторными экскаваторами. М. : Недра, 1992.

22. Певзнер Л. Д., Киселев Н. А. Система автоматического управления процессом черпания шагающего экскаватора-драглайна // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7. № 1. С. 57–65. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-57-65.

23. Ignajtovic, D., Pavlovic, V., Jovancic, P., Boskovic, S. (2014). Cutting Parameters Optimization for Difficult Excavating Conditions with Bucket Wheel Excavators on Gracanica Opencast Mine in Gacko. In: Drebenstedt, C., Singhal, R. (eds) Mine Planning and Equipment Selection. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_31.

24. Baqqal, I., Mouatassim, S., Benabbou, R., Benhra, J. Digital Twin Design for Monitoring System – A Case Study of Bucket Wheel Excavator // In: Masrour, T., El Hassani, I., Barka, N. (eds) Artificial Intelligence and Industrial Applications. A2IA 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 771. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-43524-9_11.

25. Kim Y., Kim J. Enhanced Hydraulic Excavator Control via Semi-automatic Grading Control Using Reinforcement Learning // Int. J. Control Autom. Syst. 2025. № 23. Pp. 896–906. DOI: 10.1007/s12555-024-0213-9.

26. Либерман Я. Л., Лукашук О. А., Маалаоуи Х., Давыдова В. В. Система управления перемещениями ротора карьерного роторного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 6 (176). С. 65–72. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-65-72. EDN VOZXXM.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Либерман Яков Львович, кандидат техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Лукашук Ольга Анатольевна, кандидат техн. наук, заведующий кафедрой подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru

Маалаоуи Хамед, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Заявленный вклад авторов:

Либерман Яков Львович – постановка исследовательской задачи, разработка системы управления, выводы, написание текста.

Лукашук Ольга Анатольевна – научный менеджмент, постановка исследовательской задачи, сбор и анализ данных, концептуализация исследований, разработка системы управления, написание текста.

Маалаоуи Хамед – сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы, разработка системы управления.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-42-50

Yakov L. Liberman, Olga A. Lukashuk, Hamed Maalaoui

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ALGORITHMIZATION OF OPERATION OF A ROTARY QUARRY EXCAVATOR EQUIPPED WITH A SOFTWARE CONTROL SYSTEM



Article info

Received:

31 October 2025

Accepted for publication:

14 November 2025

Accepted:

15 November 2025

Published:

18 December 2025

Keywords: multi-bucket excavator, rotor, mining, control system, algorithm, automation.

Abstract.

In the current conditions of rising energy prices and increasing volumes of mineral extraction, improving the technological processes of quarry excavators is of particular relevance. Existing control methods do not fully meet the requirements of productivity and safety. The article is devoted to the development of algorithms for the operation of the rotor movement control system of a quarry rotary excavator with an extendable or telescopic boom, capable of optimizing the process of mineral extraction. In the course of the study, an analysis of existing control systems was carried out, the structure of a new system was developed, including subsystems for controlling the spatial position of the rotor, a command controller and subsystems for direct movement control. An original system architecture with the ability to switch between automatic and manual control modes is proposed. Practical implementation of the system can significantly reduce dependence on the subjective qualities of the operator, increase the productivity of the excavator, ensure more accurate positioning of the working body and promptly respond to emergency situations when switching between control modes. The implementation of the system helps to increase the efficiency and safety of the production process.

For citation: Liberman Ya.L., Lukashuk O.A., Maalaoui Hamed. Algorithmization of operation of a rotary quarry excavator equipped with a software control system. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 6(182):42-50 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-42-50, EDN: KFSHHD

REFERENCES

1. Long-term program for the development of the coal industry in Russia for the period up to 2035. Approved by the Government of the Russian Federation on June 13, 2020 No. 1582-r [Electronic resource] URL: <http://docs.cntd.ru/document/565123539> (date of the application: 10.11.2024).
2. Anistratov K.Yu. Development of a strategy for technical re-equipment of quarries. *Mining industry*. 2012; 4:90–104. (In Russ.)
3. Perepelitsyn A.I., Kitlein E.E., Klebanov D.A. Integrated industrial safety management system and risk assessment at mining enterprises. *Mining Journal*. 2012; 7:55–59. (In Russ.)
4. Khoroshavin S.A. Increasing the efficiency of single-bucket quarry excavators by improving the working equipment: abstract of dis. candidate of technical sciences: 05.05.06 / Khoroshavin Sergey Aleksandrovich; [Place of protection: Ural state city university]. Ekaterinburg, 2015. 16 p.
5. Rylnikova M.V. Conditions and principles of sustainable development of mining enterprises in the period of increased risks and global challenges. *Mining industry*. 2022; 3:69–73. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-69-73.
6. Rylnikov A.G., Pytalev I.A. Digital transformation of the mining industry: technical solutions and technological challenges. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2020; 1:470–481. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481.
7. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Development of scientific and methodological foundations for the sustainability of mining engineering systems in the context of the introduction of a new technological order. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2020; 4:24–39.
8. Rylnikova M.V., Strukov K.I., Radchenko D.N., Esina EN Digital transformation - a condition and basis for sustainable development of mining engineering systems. *Mining industry*. 2021;(3):74–78. DOI: 10.30686/1609-91922021-3-74-78.
9. Abrashitov A.Yu., Cherepovitsyn A.E. On the issue of operational efficiency of technological modernization: features of mining production. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2024; 10–1:5–10. DOI: 10.17513/vaael.3768.
10. Pankratov M.V. Digital ACS for the digging process of a rotary excavator. *GIAB*. 1999. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-sau-protsessom-kopaniya-rotornogo-eksavatora> (date of access: 09/05/2025).
11. Klebanov A.F., Eremkin I.V., Gabusu P.A. Digital twins of control processes of highly automated mining and transport complexes. *Mining industry*. 2025; 4:61–70. DOI: 10.30686/16099192-2025-4-61-70.
12. Vladimirov D.Ya., Klebanov A.F., Kuznetsov I.V. Digital transformation of open-pit mining and a new generation of quarry equipment. *Mining industry*. 2020; 6:10–12. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-10-12.
13. Khitrykh D. Digital twins in industry: origins of the concept, current level of development and implementation examples. *Modern electronics*. 2022; 1:62–67. Access mode: <https://cloud.cta.ru/iblock/8ac/8acec945382792f55a712e606b51fd68/20220162.pdf> (accessed: 09/05/2025).
14. Mukhin V.D. Study of the driver-excavator system in the bucket transport mode: author's abstract. diss. ... cand. tech. sciences / Sverdlovsk Mining Institute, 1972. P. 22.

15. Trubetskoy K.N. Prospects for the application of robotic technology in quarries of the future. *GIAB*. 2013. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-robotizirovannoy-tehniki-na-karierah-budushego> (date of access: 09/05/2025).

16. Trubetskoy K.N., Kuleshov A.A., Klebanov A.F., Vladimirov D.Ya. Modern control systems for mining and transport complexes / Ed. by Academician of the Russian Academy of Sciences K.N. Trubetskoy. St. Petersburg: Science; 2007. 306 p.

17. Astashov V.K., Lagunova Yu.A. [et al.] Mechanical Engineering. Encyclopedia / Editorial Board: K.V. Frolov (ed.) et al. M.: Mechanical Engineering. Mining Machines. Vol. IV-24. Under the general editorship of V.K. Astashov. 2010. 1480 p.

18. Miloserdov E.E., Mineev A.V. Block-modular model of automated system for monitoring and control of large-capacity rotary excavator. *GIAB*. 2013. № 10.

19. Sashurin A.D. Improving the competitiveness of mining enterprises through the introduction of satellite navigation equipment (GPS technology). *Izvestiya UGMU*. 2000. № 11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-konkurentosposobnosti-gornodobyvayuschih-predpriyatiy-na-osnove-vnedreniya-oborudovaniya-sputnikovoy-navigatsii-gps> (date accessed: 09/05/2025).

20. Kalashnikov Yu.T. Electric drive systems and electrical equipment of rotary excavators. M.: Energoatomizdat; 1998.

21. Bukhgalts V.D., Snagin V.G. Automatic control of rotary excavators. M.: Nedra; 1992.

22. Pevzner L.D., Kiselev N.A. Automatic control system for the digging process of a walking dragline excavator. *Mining sciences and technologies*. 2022; 7(1):57–65. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-57-65.

23. Ignajtovic, D., Pavlovic, V., Jovancic, P., Boskovic, S. (2014). Cutting Parameters Optimization for Difficult Excavating Conditions with Bucket Wheel Excavators on Gracanica Opencast Mine in Gacko. In: Drebenstedt, C., Singhal, R. (eds) Mine Planning and Equipment Selection. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_31.

24. Baqqal I., Mouatassim S., Benabbou R., Benhra J. Digital Twin Design for Monitoring System – A Case Study of Bucket Wheel Excavator. In: Masrour, T., El Hassani, I., Barka, N. (eds) Artificial Intelligence and Industrial Applications. A2IA 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol 771. Springer, Cham. 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-43524-9_11.

25. Kim, Y., Kim, J. Enhanced Hydraulic Excavator Control via Semi-automatic Grading Control Using Reinforcement Learning. *Int. J. Control Autom. Syst.* 2025; 23:896–906. DOI: 10.1007/s12555-024-0213-9.

26. Liberman Ya.L., Lukashuk O.A., Maalaoui H., Davydova V.V. Control system for the rotor movements of a quarry rotary excavator. *Mining equipment and electromechanics*. 2024; 6(176):65–72. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-65-72. EDN VOZXMI.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Yakov L. Liberman, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Instruments, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira St., 19)

Olga A. Lukashuk, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Lifting and Transport Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira St., 19), e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru

Hamed Maalaoui, postgraduate student of the Department of Lifting and Transport Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira St., 19)

Contribution of the authors:

Yakov L. Liberman – formulation of the research problem, development of the management system, conclusions, and writing the text.

Olga A. Lukashuk – scientific management, formulation of the research problem, data collection and analysis, research conceptualization, development of the management system, and writing the text.

Hamed Maalaoui – data collection and analysis; review of relevant literature, development of the management system.

Authors have read and approved the final manuscript.

