

Комиссаров Анатолий Павлович¹, доктор техн. наук, профессор, **Лагунова Юлия Андреевна**^{1, 2}, доктор техн. наук, профессор, **Набиуллин Рустем Шафкатович**¹, канд. техн. наук, доцент, **Лукашук Ольга Анатольевна**², канд. техн. наук, доцент

¹Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

²Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: Yu.lagunova@mail.ru

ЦИФРОВИЗАЦИЯ В ГОРНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация: Рассмотрена цифровая имитационная модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора. В процессе экскавации при совместном действии главных механизмов (подъема и напора) ввиду неопределенности и резкого изменения условий ведения процесса экскавации существенно изменяются режимы работы главных механизмов карьерного экскаватора, что, в конечном счете, приводит к снижению работоспособности организма машиниста и к уменьшению производительности экскаватора.

Выявлены закономерности изменения режимных параметров (скоростей подъема и напора) главных механизмов, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории.

На основе математической модели разработана имитационная цифровая модель процесса экскавации горных пород в виде набора расчетных значений скоростей подъема и напора, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории.

Результаты работы могут быть использованы при создании адаптивной системы цифрового управления приводами главных механизмов в процессе экскавации горных пород.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, процесс экскавации горных пород, главные механизмы, цифровая модель.

Информация о статье: принята 12 октября 2020 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-34-38

Характеристика основной темы

Карьерные экскаваторы с рабочим оборудованием типа прямая напорная лопата (мехлопаты) благодаря своим техническим преимуществам, заключающимся в простоте конструкции и надежности электромеханического оборудования, обеспечивают относительно более высокую производительность по сравнению с другими видами выемочно-погрузочной техники при разработке скальных и полускальных пород в сложных горно-геологических условиях и при наличии негабаритов.

Вместе с тем, выполнение операций рабочего цикла экскаватора в условиях дефицита времени (расчетная длительность цикла составляет 25 – 28 с), особенно в сложных условиях и к концу смены, ограничивается психофизическими возможностями машиниста экскаватора. Как показывает практика эксплуатации карьерных экскаваторов, длительность реального рабочего цикла часто значительно превышает расчетную.

В современных условиях рыночной экономики проблема повышения эффективности использования технологических возможностей карьерных экскаваторов приобретает особую актуальность.

Обзор литературы по проблеме повышения эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов

(мехлопат) показал, что вопросы, связанные с повышением эффективности эксплуатации, рассматриваются в аспекте повышения эффективности управления. Предложены алгоритмы управления приводами напора и подъема для выполнения операции черпания с использованием технологии нечеткой логики и разработаны компоненты интеллектуального управления, обеспечивающие коррекцию и предупреждение ошибочных действий машиниста [1 – 7].

Представление электромеханических систем карьерного экскаватора в виде различных схем неизбежно приведет к существенным погрешностям в оценке кинематических и динамических характеристик рабочего процесса, так как при этом не учитываются особенности структуры рабочего оборудования и свойства механической системы, образующейся в процессе экскавации при совместном действии главных механизмов (подъема и напора), включающей главные механизмы и кинематическую цепь, соединяющую главные механизмы с ковшом.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – установление кинематических и динамических характеристик процесса экскавации за счет выявления закономерностей

изменения режимных параметров (скоростей подъема и напора) главных механизмов, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории.

Задачи исследования состоят в следующем:

- обоснование математической модели механической системы, образующейся в процессе экскавации;
- структурный и кинематический анализ механической системы;
- определение скоростей подъема и напора, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории.

Основные методы

Объектом исследования является механическая система, включающая главные механизмы (подъема и напора) и кинематическую цепь, соединяющую главные механизмы с ковшом.

Предмет исследования – установление функциональных зависимостей между параметрами, определяющими положение ковша (вершины режущей кромки) в забое, и режимными параметрами главных механизмов (скоростями подъема и напора).

Методы исследования – методы теории машин и механизмов, математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Кинематическая цепь состоит из ведомых звеньев главных механизмов (кремальерной шестерни механизма напора, головного блока стрелы, фрагмента подъемного каната, сбегавшего с головного блока) и элементов рабочего оборудования (седлового подшипника, рукояти, ковша, жестко закрепленного на рукояти, и подвески ковша).

Выполнен структурный анализ кинематической цепи. Приняты следующие допущения:

- головной блок стрелы фактически представляет собой ведомое звено механизма подъема, так как скорость точки схода подъемного каната с головного блока равна скорости подъема, и в кинематическом отношении является кривошипом;
- подъемный канат (фрагмент) представляет собой невесомую нерастяжимую нить в виде стержня переменной длины;
- подвеска ковша представляет собой твердое тело, шарнирно соединенной с ковшом и образующее вместе с подъемным канатом единый стержень.

В результате структурного анализа кинематической цепи установлено:

- кинематическая пара, образованная подъемным канатом и головным блоком, эквивалентна по отношению к скорости вращательной пары (шарниру), которая в данном случае является мгновенной;
- звено «рукоять-ковш» образует со стойкой (стрелой) двухподвижное соединение в виде поступательной пары (рукоять-седловой подшипник) и вращательной пары (седловой подшипник-стрела);
- кинематическая цепь включает четыре подвижных звена: два кривошипа (кремальерная шестерня и головной блок), стержень (подъемный канат и подвеска ковша) и звено «рукоять-ковш»;
- кинематическая цепь образует со стойкой двухкривошипно-шатунный механизм.

Таким образом, в процессе образуется передаточный механизм (рис. 1), преобразующий движения ведомых звеньев главных механизмов в движение (перемещение) ковша [2].

Число степеней свободы (подвижности) передаточного механизма составит

$$S = 3n - 2P_5 = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 5 = 2,$$

где $n = 4$ – число пар подвижных звеньев; $P_5 = 5$ – число кинематических пар пятого класса (одноподвижных).

В механизме с двумя степенями свободы (двумя обобщенными координатами) могут быть или два начальных звена, если за обобщенные координаты приняты координаты двух звеньев, или одно начальное звено, если оно образует со стойкой двухподвижную пару [4].

За начальное звено принимается звено «рукоять-ковш» и, соответственно, при этом положения всех звеньев как передаточного механизма, так и главных механизмов определяются положением звена «рукоять-ковш».

Таким образом, образуется общий передаточный механизм главных приводов, включающий главные механизмы и передаточный механизм [5].

За обобщенные координаты принимаем координаты вершины режущей кромки ковша точки $K (X_k$ и $Y_k)$ в системе координат XOY , где ось OX совпадает с уровнем стояния экскаватора, а ось OY – с осью вращения поворотной платформы.

Выполнен кинематический анализ передаточного механизма на основе графоаналитического метода путем построения планов механизма и скоростей.

Для определения скоростей рабочих движений (подъема и напора) необходимо задать законы движения начального звена, т. е. траекторию перемещения ковша (вершины режущей кромки) и скорость копания, а также размеры звеньев передаточного механизма.

Так как скорость напора меняет направление в зависимости от положения ковша в забое, то, соответственно, изменяется форма плана скоростей и вид зависимостей для определения скоростей рабочих движений.

Зависимости для определения кинематических передаточных функций (соотношений между скоростями подъема и напора, и скоростью копания) имеют вид:

$$\text{при втягивании рукояти} \\ \text{КПФН}_{\text{вт}} = \frac{V_n}{V_k} = \frac{\cos(\psi - \psi_1)}{\sin(\alpha - \phi_1)} = a;$$

$$\text{КПФП}_{\text{вт}} = \frac{V_n}{V_k} =$$

$$\sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(\alpha - \phi_2)} \sin(\phi_2 + \delta - \varepsilon - \gamma);$$

при выдвигании рукояти (напорном движении)

$$\text{КПФН}_n = a;$$

$$\text{КПФП}_n =$$

$$\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\alpha - \phi_2)} \sin(\phi_2 + \delta + \varepsilon + \gamma),$$

где $\text{КПФН}_{\text{вт}}$, $\text{КПФП}_{\text{вт}}$, КПФН_n , КПФП_n – кинематические передаточные функции движений напора и подъема при втягивании и выдвигании рукояти;

$$b = \frac{O_1C \cos(\psi - \alpha)}{O_1K \sin(\alpha - \phi_1)}$$
; O_1C , O_1K – радиус-векторы точек C и K ; ψ – угол наклона касательной к траектории перемещения ковша в точке K ; ϕ_1 , ϕ_2 – полярные углы; α , δ , γ – углы, определяющие положения звеньев; ε – угол между векторами переносной и абсолютной скоростей точки C .

Выполнен вычислительный эксперимент по расчету режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора ЭКГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод». Усилия подъема и напора определяются при заданных внешних силах по уравнениям статики.

Исходные данные для расчета:

- координаты звена «рукоять-ковш», а именно координаты точки K (вершины режущей кромки ковша) – X_K и Y_K ;
- скорость копания $V_k = 1$ м;
- угол наклона касательной к траектории перемещения ковша $\psi = 60^\circ$;
- радиусы копания на уровне стояния экскаватора для начальной, средней и конечной траекторий составляют $R_{к.уч} = 9, 12$ и 15 м;
- максимальная высота копания $H_{к.мах} = 17$ м;
- сила сопротивления копанию (касательная составляющая) $F_c = 230$ кН.

В результате вычислительного эксперимента установлено, что значения режимных параметров главных механизмов существенно изменяются в зависимости как от радиуса копания (координаты X_K), так и высоты копания (координаты Y_K). Диапазоны изменения значений скоростей рабочих движений составляют: скорости напора $-0,87 \text{ м/с} \leq V_n \leq 0,84 \text{ м/с}$ и скорости подъема $0,01 \text{ м/с} \leq V_n \leq 0,95 \text{ м/с}$.

Имитационная модель процесса экскавации определяет алгоритм цифрового управления, который формирует управляющее воздействие на привода главных механизмов.

Таким образом, на основе имитационной модели процесса экскавации, полученной в результате вычислительного эксперимента, можно определить для любой точки в рабочей зоне экскаватора режимные параметры главных механизмов при заданных энергосиловых параметрах, реализуемых на ковше, и при заданной траектории перемещения ковша (вершины режущей кромки).

Результаты исследования

Выполнена математическая модель передаточного механизма, соединяющего главные механизмы с ковшом и преобразующего движения ведомых звеньев главных механизмов в перемещение ковша. Разработана имитационная цифровая модель процесса экскавации горных пород в виде процесса экскавации горных пород в виде набора расчетных значений скоростей подъема и напора, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории. Предложенная методика расчета режимных параметров (скоростей подъема и напора) главных механизмов карьерных экскаваторов посредством вычислительного эксперимента позволяет определить фактические значения скоростей рабочих движений в конкретных

горнотехнических условиях работы (размеры забоя, вид траекторий перемещения ковша и др.).

Установление взаимозависимостей между режимными параметрами главных механизмов в процессе экскавации может служить основой для разработки адаптивной системы цифрового управления приводами главных механизмов, обеспечивающей за счет согласования скоростей рабочих движений в конкретных условиях эксплуатации повышение эффективности функционирования экскаватора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаков С. Е., Певзнер Л. Д. Алгоритмизация управления движением ковша экскаватора в режиме черпания с применением нечеткой логики // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 9. С. 8 – 17.
2. Дружинин А. В. Повышение качества управления одноковшовыми экскаваторами на основе мультиагентного подхода / Новые огнеупоры. 2016. № 3. С. 11 – 12.
3. Коряков А. А. Геометрическая модель рабочего оборудования карьерного экскаватора для расчета нагрузок электропривода и контроля положения ковша // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 3. С. 106 – 113.
4. Малафеев С. И., Тихонов Ю. В. Компоненты интеллектуального управления для карьерных экскаваторов // Автоматизация в промышленности. 2013. № 10. С. 33 – 37.
5. Малафеев С. И., Серебренников Н. А. Повышение энергетической эффективности карьерных экскаваторов на основе модернизации электрооборудования и систем управления // Уголь. 2018. № 10. С. 30 – 33.
6. Певзнер Л. Д. Математическая модель динамики карьерного экскаватора как объекта управления / Л. Д. Певзнер, С. Е. Бабаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 12. С. 249 – 252.
7. Певзнер Л. Д., Бабаков С. Е. Алгоритм управления операцией черпания карьерного экскаватора-мехлопаты с применением нечеткой логики // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 1. С. 263 – 271.
8. Гафурьянов Р. Г., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Моделирование рабочего процесса карьерных экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 6. С. 40 – 45.
9. Комиссаров А. П., Летнев К. Ю., Лукашук О. А. Анализ двухкривошипно-рычажных механизмов рабочего оборудования карьерных экскаваторов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. трудов XIV Международ. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В. Р. Кубачека». Екатеринбург (20-21 апреля 2017); Изд-во УГГУ, 2017. С. 41-46.
10. Лукашук О. А., Летнев К. Ю., Комиссаров А. П. Определение режимов работы двигателей главных механизмов одноковшового экскаватора // Изв. вузов. Горный журнал. № 5. 2017. С. 52-58.

11. Митрев Р. П. Кинематическое моделирование шарнирно-рычажных механизмов горных и строительных машин // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докладов IX Междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В. Р. Кубачека». Екатеринбург, УГГУ, 2011. С. 385 – 401.

12. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. МГГУ, 2007. 680 с.: ил.

13. Bender F. A., Sawodny O. A. Predictive Driver Model for the Virtual Excavator // The 13th

International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), 2014, pp. 187 – 192.

14. Lee B., Kim H. J. Trajectory Generation for an Automated Excavator // Proceedings of the 14 International Conference on Control, Automation and Systems (Iccas/14). Seoul, 2014. P. 716 – 719.

15. Sanat A. Talmaki Real-Time Visualization for Prevention of Excavation Related Utility Strikes. PhD Diss. University of Michigan, Michigan, USA, 2012. 336 p.

Anatoly P. Komissarov^{1,2}, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Yuliya A. Lagunova**^{1,2}, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Rustem Sh. Nabiullin**¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Olga A. Lukashuk**², C. Sc. in Engineering, Associate Professor

¹ Ural State Mining University, 620144, Russia, Yekaterinburg, ul. Kuybysheva, 30

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Russia, Yekaterinburg, ul. Mira, 19

DIGITALIZATION IN MINING ENGINEERING

Abstract: Abstract: a digital simulation model of the rock excavation process using a straight shovel of a quarry excavator is Considered. During the excavation process, when the main mechanisms (lifting and pressure) work together, due to uncertainty and a sharp change in the conditions for conducting the excavation process, the operating modes of the main mechanisms of the quarry excavator significantly change, which ultimately leads to a decrease in the efficiency of the driver's body and to a decrease in the productivity of the excavator.

The regularities of changes in the operating parameters (lift and head speeds) of the main mechanisms that ensure the movement of the bucket (the top of the cutting edge) along a given trajectory are revealed.

Based on the mathematical model, a digital simulation model of the rock excavation process is developed in the form of the rock excavation process as a set of calculated values of the lifting and pressure speeds that ensure the movement of the bucket (the top of the cutting edge) along a given trajectory.

The results of this work can be used to create an adaptive digital control system for the main mechanism drives in the process of rock excavation.

Keywords: quarry excavator, rock excavation process, main mechanisms, digital model.

Article info: received October 12, 2020

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-34-38

REFERENCES

1. Babakov S. E., Pevzner L. D. Algoritmizatsiya upravleniya dvizheniem kovsha ekskavatora v rezhime cherpaniya s primeneniem nechetkoj logiki // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2012. № 9. S. 8 – 17.

2. Druzhinin A. V. Povyshenie kachestva upravleniya odnokovshovymi ekskavatorami na osnove mul'tia-gentnogo podhoda / Novye ogneupory. 2016. № 3. S. 11 – 12.

3. Koryukov A. A. Geometricheskaya model' rabocheho oborudovaniya kar'ernogo ekskavatora dlya rascheta nagruzok elektroprivoda i kontrolya polozheniya kovsha // Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal. 2013. № 3. S. 106 – 113.

4. Malafeev S. I., Tihonov Yu. V. Komponenty intellektual'nogo upravleniya dlya kar'ernyh ekskavatorov // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2013. № 10. S. 33 – 37.

5. Malafeev S. I., Serebrennikov N. A. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti kar'ernyh ekskavatorov na osnove modernizatsii elektrooborudovaniya i sistem upravleniya // Ugol'. 2018. № 10. S. 30 – 33.

6. Pevzner L. D. Matematicheskaya model' dinamiki kar'ernogo ekskavatora kak ob'ekta upravleniya / L. D. Pevzner, S. E. Babakov // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2013. № 12. S. 249 – 252.

7. Pevzner L. D., Babakov S. E. Algoritm upravleniya operaciej cherpaniya kar'ernogo ekskavatoramekhlapaty s primeneniem nechetkoj logiki // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2015. № 1. S. 263 – 271.

8. Gafur'yanov R. G., Komissarov A. P., Shestakov V. S. Modelirovanie rabocheho processa kar'ernyh ekskavatorov // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2009. № 6. S. 40 – 45.

9. Komissarov A. P., Letnev K. Yu., Lukashuk O. A. Analiz dvuhkrivoshipno-rychaznyh mekhanizmov ra-

bochego oborudovaniya kar'ernyh ekskavatorov // Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti: sb. trudov XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Chteniya pamyati V. R. Kubacheka». Ekaterinburg (20-21 aprelya 2017): Izd-vo UGGU, 2017. S. 41-46.

10. Lukashuk O. A., Letnev K. Yu., Komissarov A. P. Opredelenie rezhimov raboty dvigatelej glavnyh mekhanizmov odnokovshovogo ekskavatora // Izv. vuzov. Gornyj zhurnal. № 5. 2017. S. 52-58.

11. Mitrev R. P. Kinematicheskoe modelirovanie sharnirno-rychazhnyh mekhanizmov gornyh i stroitel'nyh mashin // Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti: sb. dokladov IX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Chteniya pamyati V. R. Kubacheka». Ekaterinburg, UGGU, 2011. S. 385 – 401.

12. Poderni R. Yu. Mekhanicheskoe oborudovanie kar'erov. 6-e izd., pererab. i dop. M.: Izd. MGGU, 2007. 680 s.: il.

13. Bender F. A., Sawodny O. A. Predictive Driver Model for the Virtual Excavator // The 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), 2014, pp. 187 – 192.

14. Lee B., Kim H. J. Trajectory Generation for an Automated Excavator // Proceedings of the 14 International Conference on Control, Automation and Systems (Iccas/14). Seoul, 2014. P. 716 – 719.

15. Sanat A. Talmaki Real-Time Visualization for Prevention of Excavation Related Utility Strikes. RhD Diss. University of Michigan, Michigan, USA, 2012. 336 p.

Библиографическое описание статьи

Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Набиуллин Р.Ш., Лукашук О.А. Цифровизация в горном машиностроении // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 5 (151). – С. 34-38.

Reference to article

Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Nabiullin R.Sh., Lukashuk O.A. Digitalization in mining engineering. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.5 (151), pp. 34-38.