

Научная статья

УДК 622.232

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-31-39

Комиссаров Анатолий Павлович^{1,2}, Лукашук Ольга Анатольевна²,
Набиуллин Рустем Шафкатович¹, Летнев Константин Юрьевич²

¹Уральский государственный горный университет²Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

*E-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru

ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ СОВМЕСТНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛАВНЫХ МЕХАНИЗМОВ И РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ ЭКСКАВАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД

**Информация о статье**

Поступила:

01 февраля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 февраля 2024 г.

Принята к печати:

01 марта 2024 г.

Опубликована:

04 апреля 2024 г.

Ключевые слова:

карьерный экскаватор, главные механизмы, общий передаточный механизм приводов главных механизмов, рычажный механизм, рациональные значения скоростей подъема и напора.

Аннотация.

В статье рассмотрены особенности кинематики главных механизмов карьерного экскаватора (мехлопаты) при их совместном функционировании. Выполнен анализ рычажного механизма, соединяющего главные механизмы с ковшом, установлены зависимости между скоростями рабочих движений и положением ковша в рабочей зоне экскаватора, определены рациональные значения скоростей рабочих движений в процессе работы. Показано, что в процессе экскавации горных пород образуется общий передаточный механизм приводов главных механизмов, состоящий из главных механизмов и рычажного механизма, соединяющего главные механизмы с ковшом. Использовались методы анализа механизмов, математическое моделирование и вычислительный эксперимент. На основе имитационной модели процесса экскавации выполнен вычислительный эксперимент по расчету режимных параметров главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод» при отработке экскаваторного забоя. Установлено, что рычажный механизм имеет две степени подвижности. Обобщенными координатами рычажного механизма, определяющими положения всех звеньев как рычажного, так и главных механизмов, являются координаты вершины режущей кромки ковша. Определены рациональные значения скоростей подъема и напора, при которых обеспечивается перемещение ковша с постоянной скоростью копания по заданной траектории в процессе отработки забоя. Выполненный анализ кинематики совместного функционирования главных механизмов и рабочего оборудования при экскавации горных пород показал взаимозависимость между режимными параметрами главных механизмов в процессе экскавации. В дальнейшем установленная взаимозависимость 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.

Для цитирования: Комиссаров А.П., Лукашук О.А., Набиуллин Р.Ш., Летнев К.Ю. Особенности кинематики совместного функционирования главных механизмов и рабочего оборудования карьерного экскаватора при экскавации горных пород // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 1 (171). С. 31-39. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-31-39, EDN: CCGPYG

Введение. Проблема повышения эффективности использования технологических возможностей карьерных экскаваторов в современных условиях рыночной экономики приобретает особую актуальность [1, 2]. Основным направлением решения дан-

ной проблемы является установление законов движения главных механизмов в процессе экскавации [3 – 6].

Режимы работы главных механизмов карьерного экскаватора (мехлопаты) характеризуются, как

показывает практика эксплуатации [7-9], резкими колебаниями скоростей и усилий подъема и напора. Основными факторами, дестабилизирующими значения режимных параметров, являются противодействие главных механизмов [10,11] и несоответствие системы индивидуального управления приводами главных механизмов кинематике совместного функционирования главных механизмов и рабочего оборудования при экскавации горных пород.

Установление взаимозависимостей между режимными параметрами главных механизмов (скоростями подъема и напора) и скоростью копания позволит обеспечить эффективное ведение процесса экскавации горных пород.

Цель работы. Целью исследования является повышение качества управления рабочим процессом экскавации и в целом производительности карьерного экскаватора.

Задачи, решаемые в работе:

- анализ рычажного механизма, соединяющего главные механизмы с ковшом;
- установление зависимостей между скоростями рабочих движений (подъема и напора) и положением ковша в рабочей зоне экскаватора;
- определение рациональных значений скоростей рабочих движений при отработке экскаваторного забоя.

Методология исследования. Объектом исследования является кинематика главных механизмов (подъемного и напорного) и рабочего оборудования в процессе экскавации горных пород.

Предмет исследования – закономерности формирования режимных параметров главных механизмов (скоростей подъема и напора) при обработке экскаваторного забоя.

В процессе экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата при совместной работе приводов главных механизмов при ручном управлении рабочим процессом ввиду отсутствия координации рабочих движений (подъема и напора) могут возникать значительные динамические нагрузки, действующие на рабочее оборудование и главные механизмы, зависящие от степени противодействия главных механизмов, жесткости элементов рабочего оборудования и других факторов [12-14].

Выполнен анализ кинематики совместного функционирования главных механизмов и рабочего оборудования при экскавации горных пород для определения взаимозависимостей между скоростями рабочих движений (подъема и напора) и скоростью копания.

Установлено [15], что при совместной работе приводов главных механизмов образуется общий передаточный механизм приводов, включающий

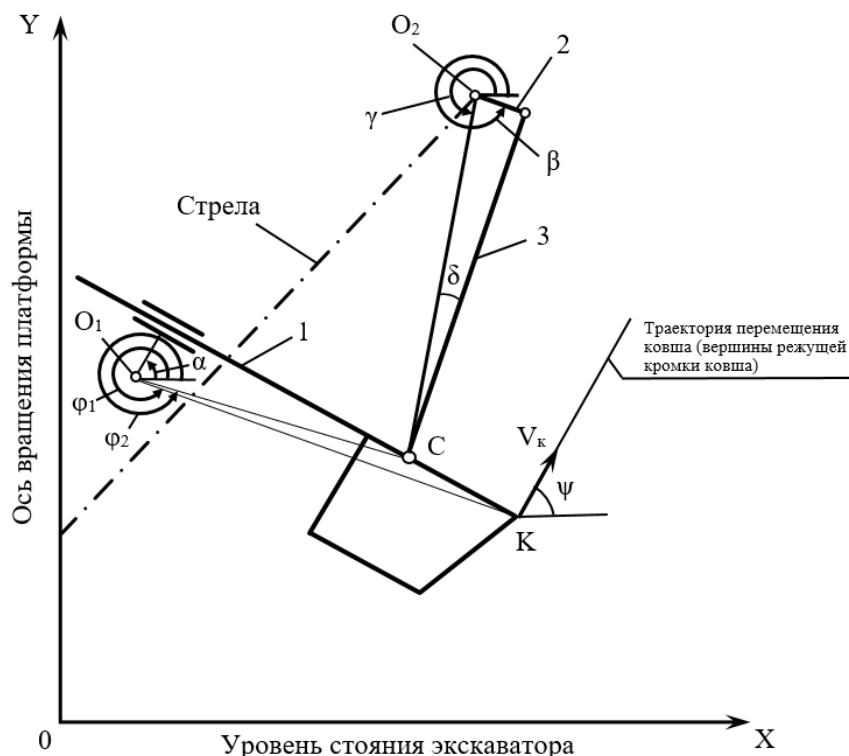


Рис. 1. Схема рычажного механизма:

- 1 – звено «рукоять-ковш»; 2 – кривошип; 3 – стержень (подъемный канат и подвеска ковша);
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \phi_1, \phi_2$ – углы, определяющие положения звеньев;
 ψ – угол наклона траектории перемещения ковша.

Fig. 1. Lever mechanism schematics:

- 1 – «handle-bucket» link; 2 – crank; 3 – rod (lifting rope and bucket suspension);
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \phi_1, \phi_2$ – angles which determine the positions of the links;
 ψ – inclination angle of the bucket movement trajectory

главные механизмы и рычажный механизм, соединяющий главные механизмы с ковшем.

Решение задач исследования. Рычажный механизм (Рис. 1) преобразует движения выходных звеньев главных механизмов в перемещение ковша.

Рычажный механизм состоит из четырех звеньев: стойки, звена «рукоять-ковш», кривошипа (головного блока стрелы) и стержня (подъемный канат и подвеска ковша).

Звено «рукоять-ковш» образует со стойкой двухподвижную кинематическую пару в виде седлового подшипника, допускающую вращательное и поступательное перемещение звена относительно стойки.

Кинематическая пара, образованная подъемным канатом и блоком, эквивалентна шарниру, который в данном случае является мгновенным. Однако в силу последнего эквивалентность не имеет места по отношению к перемещениям и ускорениям.

Число степеней подвижности механизма составит

$$W = 3n - 2p_1 - p_2 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 3 - 1 = 2,$$

где n – число подвижных звеньев, p_1 – число одноподвижных кинематических пар, p_2 – число двухподвижных пар.

Число степеней подвижности механизма (число независимых возможных перемещений) совпадает с числом обобщенных координат механизма, т.е. независимых между собой координат, определяющих положения всех звеньев механизма относительно стойки.

В механизме с двумя обобщенными координатами может быть одно начальное звено, положение которого определяет положения всех звеньев механизма, если оно (начальное звено) образует со стойкой двухподвижную кинематическую пару.

Следовательно, начальным звеном рычажного механизма является звено «рукоять-ковш», положение которого определяет положения всех звеньев общего передаточного механизма приводов главных механизмов.

Обобщенными координатами рычажного механизма, определяющими положение начального звена, являются независимые между собой координаты вершины режущей кромки ковша (точки K) X_k и Y_k в прямоугольной системе координат XOY , где ось OX – уровень стояния экскаватора и ось OY – ось вращения поворотной платформы.

Таким образом, в результате структурного анализа рычажного механизма установлено, что положение начального звена (звена «рукоять-ковш») и скорость копания, а также положения всех звеньев общего передаточного механизма приводов главных механизмов и скорости рабочих движений (подъема и напора) определяются координатами вершины режущей кромки ковша X_k и Y_k .

Таким образом, в процессе экскавации горных пород происходит «обратимость» главных механизмов, т.е. ведущим (начальным) звеном общего передаточного механизма приводов главных механизмов является звено «рукоять-ковш» вместо ведущих звеньев главных механизмов.

Основными характеристиками рычажного механизма являются кинематические передаточные функции (аналог передаточного отношения) [16], определяющие соотношения между скоростями рабочих движений и скоростью копания в зависимости от положения начального звена.

Выполнен кинематический анализ рычажного механизма и получены выражения для кинематических передаточных функций рычажного механизма с учетом вида движений звеньев механизма.

Установлено, что звено «рукоять-ковш» совершает сложное движение – переносное и относительное.

Переносным движением является вращательное движение звена вокруг оси седлового подшипника под действием усилия подъема, а относительным движением является поступательное движение звена по направляющим седлового подшипника под действием усилия напора.

Скорость копания (абсолютная скорость точки K) в этом случае определяется из решения векторного уравнения, представляющего собой сумму векторов скоростей точки K в переносном и относительном движениях звена «рукоять-ковш».

Кроме того, звено «рукоять-ковш» (точнее рукоять) в процессе экскавации горных пород совершает возвратно-поступательное движение, т.е. происходит три фазы движения – стягивание рукояти в седловой подшипник, остановка и выдвигание рукояти.

Вид фазы возвратно-поступательного движения рукояти зависит от положения рукояти, характеризуемого значением полярного угла ϕ_1 радиуса вектора точки K (Рис. 1), и угла наклона траектории перемещения ковша ψ .

Направление вектора скорости напора зависит от соотношения углов ϕ_1 и ψ , а именно:

- при $\phi_1 + 90^\circ < \psi$ вектор скорости напора направлен к точке A (происходит стягивание рукояти в седловой подшипник);
- при $\phi_1 + 90^\circ = \psi$ скорость напора $V_n = 0$;
- при $\phi_1 + 90^\circ > \psi$ вектор скорости напора направлен к точке K (происходит выдвигание рукояти).

Получены выражения для кинематических передаточных функций рычажного механизма.

Кинематические передаточные функции для скоростей подъема и напора имеют вид:

для скорости напора

$$V_n = \frac{V_k \cos(\psi - \phi_1)}{\sin(\alpha - \phi_1)};$$

$$KПФ_n = \frac{V_n}{V_k};$$

для скорости подъема:

при $\phi_1 + 90^\circ < \psi$

$$V_{c1} = \frac{V_k O_1 C \cdot \cos(\psi - \alpha)}{O_1 K \cdot \sin(\alpha - \phi_1)};$$

$$V_c = [V_n^2 + V_{c1}^2 + 2|V_n|V_{c1} \cos(\alpha - \phi_2)]^{0.5};$$

$$\varepsilon = \arcsin \left\{ \frac{|V_n| \sin(\alpha - \phi_2)}{V_c} \right\};$$

$$V_{П1} = V_c \sin(\phi_2 + \delta + \varepsilon - \gamma);$$

Таблица 1. Значения вибрации СКЗ виброскорости Режимные параметры главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А при высоте Нк = 17 м (угол наклона траектории перемещения ковша $\psi = 60^\circ$)
 Table 1. Operational parameters of the main mechanisms of the EKG-20A excavator at a height Нк = 17 m (inclination angle of the bucket movement trajectory $\psi = 60^\circ$)

№ п/п	Координаты точки К		Скорости подъема и напора		Усилия подъема и напора		Мощности усилий	
	X_K , м	Y_K , м	$V_{п}$, м/с	$V_{н}$, м/с	$F_{п}$, кН	$F_{н}$, кН	$P_{п}$, кВт	$P_{н}$, кВт
Начальная траектория ($X_{к0} = 9$ м)								
1	9,0	0	0,95	-0,87	290	630	275	550
2	10,15	2	0,92	-0,81	350	620	331	490
3	11,30	4	0,84	-0,70	420	605	352	421
4	12,45	6	0,70	-0,51	520	580	359	292
5	13,60	8	0,52	-0,19	700	555	366	106
6	14,75	10	0,50	0,19	975	590	489	110
7	15,90	12	0,66	0,50	1270	700	826	348
8	17,05	14	0,80	0,70	1560	850	1220	578
9	18,20	16	0,89	0,81	1810	1005	1580	795
10	18,80	17	0,91	0,84	1910	1060	1770	923
Средняя траектория ($X_{к0} = 12$ м)								
11	12,0	0	0,90	-0,72	517	411	468	296
12	13,15	2	0,85	-0,61	560	402	478	246
13	14,30	4	0,78	-0,45	595	395	464	177
14	15,45	6	0,70	-0,23	674	346	472	80
15	16,60	8	0,65	0,04	755	294	487	11
16	17,75	10	0,66	0,29	838	217	550	64
17	18,90	12	0,69	0,50	886	95	613	48
18	20,05	14	0,68	0,65	896	115	608	74
19	21,20	16	0,49	0,75	890	497	433	371
20	21,80	17	0,25	0,78	960	806	218	638
Конечная траектория ($X_{к0} = 15$ м)								
21	15,0	0	0,85	-0,55	690	207	586	114
22	16,15	2	0,80	-0,42	722	187	577	78
23	17,30	4	0,74	-0,24	754	152	559	37
24	18,45	6	0,69	-0,04	791	91	544	4
25	19,60	8	0,64	0,16	835	9	538	1
26	20,75	10	0,60	0,35	885	156	528	54
27	21,90	12	0,51	0,50	937	372	474	186
28	23,05	14	0,32	0,62	1010	685	327	423
*29	24,20	16	0,08	0,70	1180	1130	43	793
*30	24,80	17	0,01	0,74	1350	1420	225	1057

* Примечание: точка расположена за пределами рабочей зоны экскаватора

$$K\Phi_{\Pi 1} = \frac{V_{\Pi 1}}{V_k};$$

при $\varphi_1 + 90^\circ \geq \psi$

$$V_c = [V_n^2 + V_{c1}^2 - 2V_n V_{c1} \cos(\alpha - \varphi_2)]^{0.5};$$

$$\varepsilon = \arcsin \left\{ \frac{V_n \sin(\alpha - \varphi_2)}{V_c} \right\};$$

$$V_{\Pi 2} = V_c \sin(\varphi_2 + \delta - \varepsilon - \gamma);$$

$$K\Phi_{\Pi 2} = \frac{V_{\Pi 2}}{V_k},$$

где V_{c1} – скорость точки С в переносном движении звена «рукоять-ковш».

На основе имитационной модели процесса экскавации горных пород [17] выполнен вычислительный эксперимент по расчету режимных параметров главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А произ-

водства ПАО «Уралмашзавод» при отработке экскаваторного забоя.

В результате вычислительного эксперимента определены:

- соотношения между скоростью копания и скоростями рабочих движений (подъема и напора);
- рациональные значения скоростей подъема и напора, обеспечивающие перемещение ковша по заданным траекториям при постоянном значении скорости копания.

В Таблице 1 приведены рациональные значения скоростей подъема и напора при скорости копания $V_k = 1 \text{ мс}^{-1}$ при перемещении ковша по расчетным траекториям (начальной, средней и конечной).

На Рис. 2 приведены планы скоростей.

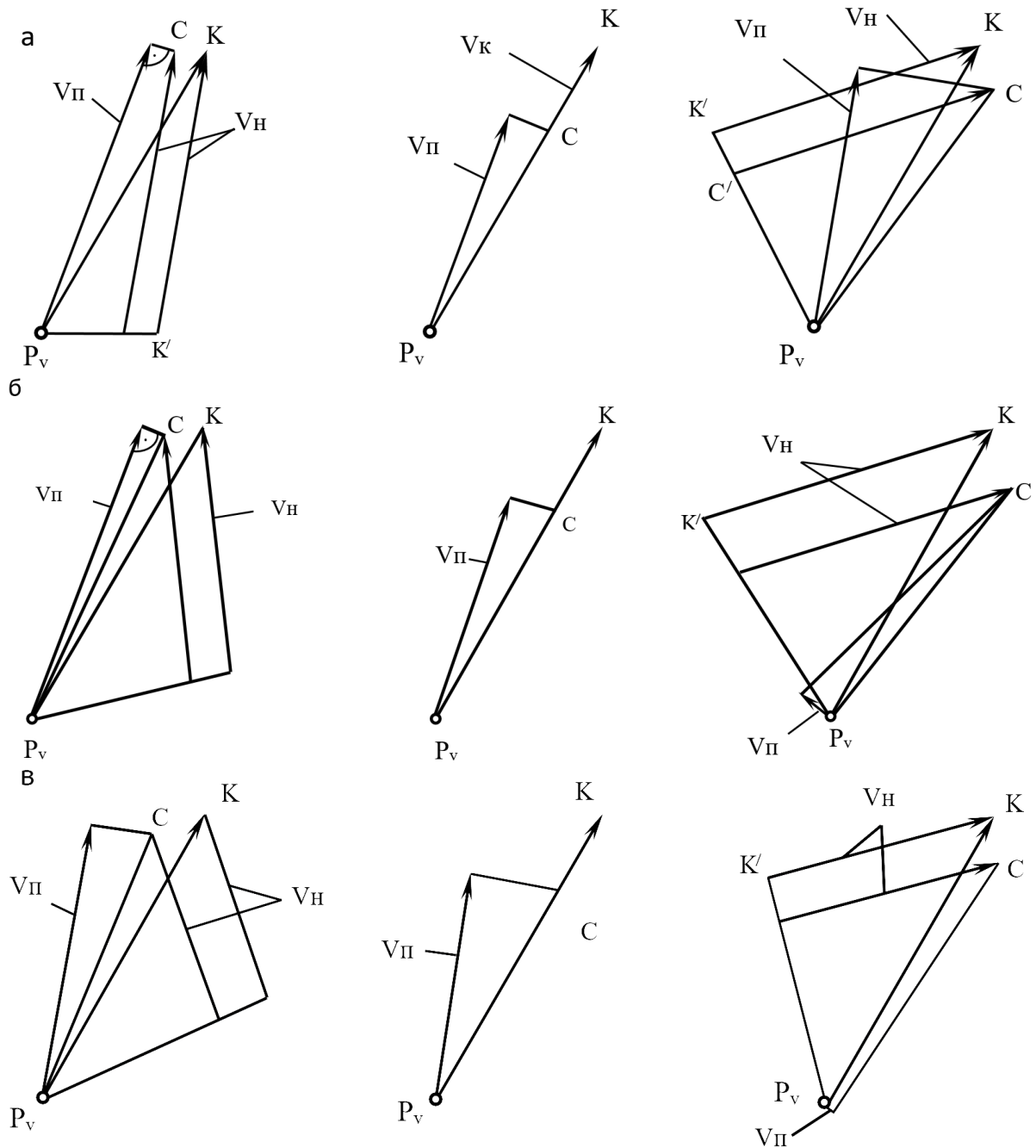


Рис. 2. Планы скоростей:
 а – нормальная траектория; б – средняя траектория; в – конечная траектория
 Fig. 2. Velocity plans:
 а – normal trajectory; б – average trajectory; в – final trajectory

Из приведенных данных следует, что скорости рабочих движений (подъема и напора) изменяются в широком диапазоне в зависимости от вида траектории перемещения ковша.

Так, при перемещении ковша по начальной траектории скорость подъема в начале и конце копания принимает наибольшие значения. В начале копания увеличение скорости подъема определяется совпадением направлений векторов скорости подъема и скорости копания (Рис. 2). В конце копания увеличение скорости подъема определяется увеличением скорости точки С (оси шарнира подвески ковша). Скорость напора в начале процесса экска-

вации уменьшается (величина модуля вектора) до нулевого значения, а затем увеличивается.

При перемещении ковша по средней траектории скорость подъема изменяется от наибольшего значения в начале копания (при совпадении направлений векторов скоростей рабочих движений и скорости копания) до минимального значения в конце копания при несовпадении векторов скоростей подъема и напора. Скорость напора в начале процесса экскавации уменьшается (величина модуля) до нулевого значения, а затем увеличивается.

При перемещении ковша по конечной траектории скорость подъема уменьшается практически до

нулевого значения, а скорость напора в начале копания уменьшается до нулевого значения, а затем увеличивается.

Таким образом, расчетные значения рациональных режимных параметров (скоростей подъема и напора) определяются в соответствии с паспортом забоя на основе имитационной модели процесса экскавации горных пород.

Заключение. В работе показано, что в процессе экскавации горных пород происходит «обратимость» главных механизмов, т.е. ведущим звеном общего передаточного механизма приводов главных механизмов является звено «рукоять-ковш» вместо звеньев главных механизмов.

Установлено, что рациональные значения скоростей рабочих движений (подъема и напора) определяются обобщенными координатами рычажного механизма – координатами вершины режущей кромки ковша.

Результаты работы могут быть использованы для разработки программы управления двигателями приводов главных механизмов в процессе экскавации горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Y., Mu X., Fan R. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator // *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2021. Vol. 1. No. 5.
2. Yang Y., Long P., Song X., Pan J., Zhang L. Optimization-based framework for excavation trajectory generation // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 2. No. 6. Pp. 1479–1486.
3. Певзнер Л. Д. Автоматизированное управление мощными одноковшовыми экскаваторами. – М. : Горное дело, 2014. 400 с.: ил.
4. Певзнер Л. Д., Бабаков С. Е. Управление операцией черпания карьерного экскаватора – мехлопаты с применением нечеткой логики // *Уголь*. 2012. № 8. С. 64–65.
5. Ramezani M., Tafazoli S. Using Artificial Intelligence In Mining Excavators: Automating routine operational decisions // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2021. Vol. 1. No. 15. Pp. 6–11.
6. Zhang L., Zhao J., Long P., Wang L., Qian L., Lu F., Song X., Manocha D. An autonomous excavator system for material loading tasks // *Science Robotics*. 2021. Vol. 55. No. 6. Pp. 8474–8481.
7. Беляков Ю. И. Экскаваторные работы: Справочник рабочего. М. : Недра, 1992. 288 с.
8. Рехтман А. П., Крагель А. А. Комплексные испытания экскаватора ЭКГ-12 // *Механизация строительства*. 2001. № 1. С. 24–26.
9. Слесарев Б. В., Булес П. Исследование условий и параметров экскавации мощных карьерных экскаваторов // *Материалы конференции «Машины и оборудование для открытых горных работ»*. В рамках 19-й Международной выставки «Горное оборудование, добыча и обогащение руд и минералов», 21 апреля 2015. Москва. С. 3–4.
10. Подэрни Р. Ю., Булес П. Сравнительный анализ гидравлических и механических экскаваторов с прямой лопатой // *Горный журнал*. 2015. № 1. С. 55–61.
11. Лагунова Ю. А., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. [и др.] *Горные машины. Энциклопедия*. Т. IV-24. М. : Машиностроение, 2011. 493 с.
12. Корюков 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.
13. Мислибаев И. Т., Махмудов А. М., Махмудов Ш. А. Теоретическое обобщение режимов функционирования и моделирование эксплуатационных характеристик работы экскаваторов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 1. С. 102–110.
14. Sotiropoulos F. E., Asada H. H. Dynamic modeling of bucket-soil interactions using Koopman-DFL lifting linearization for model predictive contouring control of autonomous excavators // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022. Vol. 1. No. 7. Pp. 151–158.
15. Комиссаров А. П., Летнев К. Ю., Лукашук О. А. Анализ двухкривошипно-рычажных механизмов рабочего оборудования карьерных экскаваторов // *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека»*. Екатеринбург : УГГУ, 2017. С. 41–46.
16. Левитский Н. И. *Теория механизмов и машин*. М. : Наука, 1979. 576 с.
17. Гафурьянов Р. Г., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Моделирование рабочего процесса карьерных экскаваторов // *Горное оборудование и электромеханика*. 2009. № 6. С. 40–45.

© 2024 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:

Комиссаров Анатолий Павлович, доктор техн. наук, профессор кафедры горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30); профессор кафедры подъемно-транспортные машины и роботы 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), o.a.lukashuk@urfu.ru

Набиуллин Рустем Шафкатович, кандидат техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30);

Летнев Константин Юрьевич, кандидат техн. наук, старший преподаватель 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:

Комиссаров Анатолий Павлович – постановка исследовательской задачи; разработка концепции; анализ результатов.

Лукашук Ольга Анатольевна – постановка исследовательской задачи; написание текста.

Набиуллин Рустем Шафкатович – обработка результатов эксперимента; обзор соответствующей литературы;

Летнев Константин Юрьевич – выполнение расчетов, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-31-39

Anatoliy P. Komissarov^{1,2}, Olga A. Lukashuk², Rustem Sh. Nabiullin¹, Konstantin Yu. Letnev²

¹Ural State Mining University

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

*E-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru

THE FEATURES OF THE KINEMATICS FOR THE JOINT FUNCTIONING OF THE MAIN MECHANISMS AND WORKING EQUIPMENT OF AN OPEN-PIT EXCAVATOR DURING EXCAVATION OF ROCKS



Article info

Received:

01 February 2024

Accepted for publication:

15 February 2024

Accepted:

01 March 2024

Published:

04 April 2024

Keywords: open-pit excavator, main mechanisms, general transmission mechanism of main mechanisms drives, lever mechanism, rational values of

Abstract.

The article considers the features of the kinematics of the main mechanisms of an open-pit excavator (mechanical shovel) in their joint operation. The analysis of the lever mechanism connecting the main mechanisms with the bucket was carried out, the dependences between the velocities of working movements and the position of the bucket in the working area of the excavator were established, rational values of the velocities during the operation were determined. It is shown that during the excavation of rocks, a general transmission mechanism of the drives of the main mechanisms is formed, consisting of the main mechanisms and the lever mechanism connecting the main mechanisms with the bucket. Methods of mechanism analysis, mathematical modeling and computational experiment were used. On the basis of a simulation model of the excavation process, a computational experiment was performed to calculate the operating parameters of the main mechanisms for the EKG-20A excavator manufactured by PJSC Uralmashplant when working out an excavator face. It was established that the lever mechanism has two degrees of freedom. The generalized coordinates of the lever mechanism, which determine the positions of all links of both the leverage and the main mechanisms, are the coordinates of the bucket's cutting edge top. The rational values of the lifting and thrusting velocities were determined, at which the bucket is moved with a constant digging velocity along a given trajectory in the process of working out the

lifting and thrusting velocities face. The performed analysis of the kinematics for the joint functioning of the main mechanisms and working equipment during the excavation of rocks showed the interdependence between the operating parameters of the main mechanisms in the process of excavation. In the future, the established interdependence can serve as the basis for the development of an adaptive digital control system for the drives of the main mechanisms, which ensures, by coordinating the velocities of working movements in specific operating conditions, an increase in the efficiency of the excavator.

For citation: Komissarov A.P., Lukashuk O.A., Nabiullin R.Sh., Letnev K.Yu. The features of the kinematics for the joint functioning of the main mechanisms and working equipment of an open-pit excavator during excavation of rocks. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 1(171):31-39 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-31-39, EDN: CCGPYG

REFERENCES

1. Li Y., Mu X., Fan R. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2021; 1:5.
2. Yang Y., Long P., Song X., Pan J., Zhang L. Optimization-based framework for excavation trajectory generation. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021; 2(6):1479–1486.
3. Pevzner L.D. Automated control of powerful single-bucket excavators. M.: Mining; 2014. 400 p.: ill.
4. Pevzner L.D., Babakov S.E. Controlling the scooping operation of an open-pit excavator (mechanical shovel) using fuzzy logic. *Coal*. 2012; 8:64–65.
5. Ramezani M., Tafazoli S. Using Artificial Intelligence In Mining Excavators: Automating routine operational decisions. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2021; 1(15)6–11.
6. Zhang L., Zhao J., Long P., Wang L., Qian L., Lu F., Song X., Manocha D. An autonomous excavator system for material loadind tasks. *Science Robotics*. 2021; 55(6):8474–8481.
7. Belyakov Yu.I. Excavator work: A worker's guide. M.: Nedra; 1992. 288 p.
8. Rekhtman A.P., Kragel A.A. Comprehensive testing of the EKG-12 excavator. *Mechanization of construction*. 2001; 1:24–26.
9. Slesarev B.V., Bules P. Study of the conditions and parameters of excavation by powerful open-pit excavators. *Proceedings of the conference "Machines and equipment for open mining". Within the framework of the 19th International Exhibition "Mining Equipment, Extraction and Concentration of Ores and Minerals"*. April 21, 2015. Moscow. Pp. 3–4.
10. Poderni R.Yu. Comparative analysis of hydraulic and mechanical front-shovel excavators / R.Yu. Poderni, P. Bules. *Mining Journal*. 2015; 1:55–61.
11. Lagunova Yu.A., Komissarov A.P., Shestakov V.S. [et al.] Mining machines. Encyclopedia. Vol. IV-24. M.: Machine Building; 2011. 493 p.
12. Koryukov A.A. Geometric model of the working equipment of an open-pit excavator for calculating the loads of its electric drive and controlling the position of the bucket. *University proceedings. Mining magazine*. 2013; 3:106–113.
13. Mislibaev I.T., Makhmudov A.M., Makhmudov Sh.A. Theoretical generalization of operating modes and modeling of operational characteristics of excavators. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021; 1:102–110.
14. Sotiropoulos F.E., Asada H.H. Dynamic modeling of bucket-soil interactions using Koopman-DFL lifting linearization for model predictive contouring control of autonomous excavators. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022; 1(7):151–158.
15. Komissarov A.P., Letnev K.Yu., Lukashuk O.A. Analysis of double-crank-lever mechanisms of the working equipment of open-pit excavators. *Technological Equipment for the Mining, Oil and Gas Industry: Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference "Readings in Memory of V.R. Kubachek"*. Yekaterinburg: USMU; 2017. Pp. 41–46.
16. Levitskiy N.I. Theory of mechanisms and machines. M.: Science; 1979. 576 p.
17. Gafuriyanov R.G., Komissarov A.P., Shestakov V.S. Modeling of the working process of open-pit excavators. *Mining equipment and electromechanics*. 2009; 6:40–45.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declares no conflict of interest.

About the author:

Anatoliy P. Komissarov, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Ural State Mining University, (620144, Russia, Yekaterinburg, Kuibyshev street, 30), Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira street, 19)

Olga A. Lukashuk, Associate Professor, C. Sc. in Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira street, 19), e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru

Rustem Sh. Nabiullin, Associate Professor, C. Sc. in Engineering, Ural State Mining University, (620144, Russia, Yekaterinburg, Kuibyshev street, 30)

Konstantin Yu. Letnev, Senior Lecturer, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira street, 19)

Contribution of the authors:

Anatoliy P. Komissarov – setting a research task; developing a concept; analyzing the results.

Olga A. Lukashuk – setting a research task; writing a text.

Rustem Sh. Nabiullin – processing of experimental results; review of relevant literature;

Konstantin Yu. Letnev – performing calculations, writing text.

Author have read and approved the final manuscript.

