Научная статья УДК 621.879

Анализ энергозатрат при движении экскаваторного оборудования

Петр Леонидович Кудряшов¹, Андрей Геннадьевич Савельев²

^{1.2}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹techpostdm@yandex.ru ²prof.saveliev@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается проверка выдвигаемой гипотезы о том, что траектории с меньшими уровнями мощности характеризуются меньшим углом между вектором линейной скорости рассматриваемой системы координат с большей диагональю скоростного эллипсоида манипулятивности за время движения по данной траектории. Рассмотрены понятия конфигурационного и рабочего пространства и отображения между ними на основе матрицы Якоби экскаватора. Проведен анализ затрат мощности гидросистемы при формировании законов движения экскаваторного оборудования в рабочем пространстве по циклоидам, прямым, цепным линиям, пространственным кривым на базисе В-сплайнов, а также рассмотрено формирование закона движения в пространстве обобщенных координат на основе методики S-сшуе. Показаны основные используемые математические модели. Расчеты проведены с помощью разработанного программного комплекса. Приведен состав экспериментальной установки и методика проведения эксперимента. Сделаны выводы о характеристиках наименее энергозатратных траекторий на основе анализа теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: мощность гидросистемы, экскаваторное оборудование, рабочее пространство, конфигурационное пространство, эксперимент.

Для цитирования: Кудряшов П.Л., Савельев А.Г. Анализ энергозатрат при движении экскаваторного оборудования // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

Original article

Analysis of energy consumption during the movement of excavator equipment

Petr L. Kudryashov¹, Andrey G. Saveliev²

^{1,2}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia
 ²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹techpostdm@yandex.ru ²prof.saveliev@yandex.ru

> № 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

Abstract. The article examines the verification of the hypothesis that trajectories with lower power levels are characterized by a smaller angle between the linear velocity vector of the coordinate system and a larger diagonal of the manipulability ellipsoid during movement along this trajectory. The concepts of configuration and workspace and mapping between them based on the Jacobi matrix of the excavator are considered. The analysis of hydraulic system power costs in the formation of laws of motion of excavator equipment in the workspace using cycloids, straight lines, chain lines, spatial curves based on B-splines is carried out, and is also considered the formation of the law of motion in the space of generalized coordinates based on the S-curve technique. The main mathematical models used are shown. The calculations were carried out using the developed software package. The composition of the experimental setup and the methodology of the experiment are given. Based on the analysis of theoretical and experimental data, conclusions are drawn about the characteristics of the least energy-intensive trajectories.

Keywords: hydraulic system power, excavator equipment, workspace, configuration space, experiment.

For citation: Kudryashov P.L., Saveliev A.G. Analysis of energy consumption during the movement of excavator equipment. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2025. No 1 (43).

Введение

Широкое применение экскаваторов в строительстве и других отраслях народного хозяйства обусловлено универсальностью данных машин. В условиях развития экономики и увеличения объема строительных работ растут требования к эффективности экскаваторов, выражающиеся в увеличении производительности, безопасности, экологичности, надежности, снижении эксплуатационных затрат, уменьшении массы, энергоемкости процессов и расхода топлива. Доля полезной работы в энергетическом балансе гидравлического экскаватора относительно не велика [1]. Значительные затраты энергии приходятся на гидропривод, механические потери, а также на перемещение собственных масс рабочего оборудования (далее PO), элементы которого обладают большой массой, вызывающей высокие динамические нагрузки при совершении технологических операций [2, 3]. Это показывает наличие потенциала как для конструктивных усовершенствований, так и для поиска стратегий энергоэффективного

> № 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

управления гидроприводом экскаватора. Таким образом, уменьшение доли потерь энергии и их использование в технологическом процессе являются актуальными инженерными задачами и предметом современных исследований. Элементы РО экскаватора (стрела, рукоять, ковш, поворотная платформа) представляют из себя шарнирно-сочлененный многозвенник с кинематическими парами 5 класса и степенью свободы равной 4 [4]. Можно рассматривать РО экскаватора как шарнирный робот-манипулятор. Задача движения робота-манипулятора решается путем определения пути, после чего необходимо определить закон изменения во времени базовых переменных (углов в шарнирах, скоростей, ускорений и т.д.), обеспечивающих движение по заданному пути. Таким образом, понятие траектории в расширенном смысле описывает путь и изменение во времени переменных системы на этом пути [5]. Существующие работы по построению траектории РО экскаваторов в большинстве своем исследуют процесс копания грунта, перемещение РО при других операциях рассматривается в рамках заранее определенных траекторий, чаще упрощенных до прямых линий, вопросы энергопотребления при этом находятся не на первом плане, и внимание сосредотачивается на кинематических и динамических ограничениях, таким образом, исследованию движения рабочего оборудования экскаватора вне процесса копания уделено не достаточное количество внимания.

Снижение энергопотребления привода может быть достигнуто различными способами, начиная от упрощения механической системы до внедрения регенеративных приводов и оптимального позиционирования рабочего оборудования относительно требуемой задачи. Другой подход к снижению энергопотребления основан на применении упругих элементов, которые работают параллельно с основными исполнительными механизмами и обеспечивают непрерывное преобразование потенциальной и кинетической энергии, следуя концепции естественного движения. Еще одной стратегией

> № 1(43) март 2025

минимизации энергопотребления в промышленных роботах-манипуляторах является оптимальное планирование траекторий для снижения расхода энергии или крутящего момента двигателей. Подход к планированию движения для повышения энергоэффективности имеет то преимущество, что для его реализации не требуется заменять или вводить в механическую систему дополнительные физические компоненты. В этих рамках оптимальное планирование маршрута можно считать одним из основных программных подходов к повышению энергоэффективности [6]. В настоящей работе рассматривается применение концепции планирования движения PO экскаватора с оценкой затрат мощности по траекториям различного типа.

Математическое моделирование

Набор значений параметров, однозначно определяющих положение точек манипулятора в операционном пространстве, называется его конфигурацией. Операционное пространство W (иначе называется рабочее пространство) – это физическое евклидово пространство $W \in E^N$, $N \in \{3\}$. Конфигурационное пространство C – это пространство всех возможных конфигураций – пространство обобщенных координат $c_i = q_i = (q_1; q_2; q_3; q_4)^T$ для i = 1, ..., n, где q_1, q_2, q_3, q_4 – обобщенные координаты. Понятие траектории можно также представить как последовательность конфигураций. Выбор закона изменения обобщенной координаты во времени исключительно важен, так как это определяет значения крутящего момента для вращательного шарнира. Задание траектории в конфигурационном пространстве не требует решения обратной задачи кинематики и позволяет избежать сингулярных конфигураций (таких, при которых теряются степени свободы системы [7]). При этом форма пути между точками произвольная, результирующее движение в рабочем пространстве не предсказуемо, что особенно важно для пространства с препятствиями, поэтому данный способ лучше подходит для движения в свободном рабочем пространстве. Для задания траектории в пространстве обобщенных координат применим

> № 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

методику S-curve или LSPB - Linear segments with parabolic blends, при которой профиль угловой скорости описывается прямыми с сегментами параболы [8]. Такой подход позволяет гибко задавать параметры ускорения/торможения и равномерного движения на всей протяженности времени движения.

Задание траекторий в рабочем пространстве более наглядно и прогнозируемо, но может создать сингулярные конфигурации, при этом могут быть превышены кинематические ограничения. В данном случае для определения закона изменения обобщенных координат, а также для расчета управляющего воздействия двигателей необходимо решение обратной задачи кинематики. Рассмотрим следующие формы кривых для задания пути в рабочем пространстве: циклоида, прямая, цепная линия, кривые на базисе В-сплайнов. Для построения последних применим алгоритм Кокса-де Бура [9]. Решим обратную задачу кинематики аппроксимацией матрицы Якоби [10].

$$\Delta \vec{X} \approx J_{\alpha}(\vec{q}_0) \Delta \vec{q}, \qquad (1)$$

где $\Delta \vec{X}$ – вектор скоростей системы; \vec{q}_0 – начальная конфигурация системы; J_{α} – аналитический Якобиан системы; $\Delta \vec{q}$ – вектор изменения обобщенных координат.

Якобиан системы является отображением между пространством скоростей шарниров и пространством скоростей системы координат (звена). Якобиан вырождается в сингулярностях (детерминант равен нулю). В расчете также применим концепцию управляемости манипулятора (манипулятивности), которая показывает направления наиболее быстрого возможного изменения скорости, оценивает конфигурацию системы с точки зрения близости к точкам сингулярности, а также позволяет оценить способность системы воспринимать нагрузки в данной конфигурации. В основе данного подхода лежит так называемый индекс управляемости Йошикавы, показывающий возможности системы для позиционирования и ориентации конечного эффектора [8] и определяемый согласно выражению:

> № 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

$$\mu = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n = \sqrt{\det J J^T}, \qquad (2)$$

где σ_i – сингулярные значения матрицы *J* в случае, если матрица *J* размерности $n \times m$. $\mu = |det J| - если J$ квадратная.

В свою очередь

$$\sigma_i = \sqrt{k_i}, \qquad (3)$$

где λ_i – собственные значения матрицы JJ^T .

Управляемость в рабочем пространстве изображается в виде эллипсоида с главными диагоналями, величина которых составляет $\sqrt{k_i}$, а направление определяют собственные вектора \vec{v}_i матрицы JJ^T (рис. 1).

На основе данной концепции выдвинем гипотезу о том, что для траекторий с меньшими уровнями потребной мощности для движения вектор линейной скорости рассматриваемой системы координат может иметь меньшее отклонение от большей оси скоростного эллипсоида за время движения, чем для траекторий с большими уровнями потребной мощности.



Рис. 1. Эллипсоиды управляемости

№ 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

Для определения потребной мощности гидросистемы на осуществление движения по заданным траекториям решим обратную задачу динамики методом Эйлера-Лагража [11]:

$$\tau_{i} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_{i}} - \frac{\partial L}{\partial q_{i}}, \qquad i=1,\dots,n.$$
(4)

Описанные математические модели являются составной частью разработанного расчетного программного комплекса [12], позволяющего осуществлять задание траекторий PO экскаватора в рабочем и конфигурационном пространстве и рассчитывать угловые скорости и ускорения звеньев, линейные скорости штоков гидроцилиндров, давление жидкости и объемный расход в полостях нагнетания и слива, уровни кинетической и потенциальной энергии системы, значения мощности и работы гидросистемы.

Имитационное моделирование

В качестве расчетного примера выбран экскаватор 4-й размерной группы с вместимостью ковша 0,95 м³, массой 23 т и двигателем ЯМЗ-53416. Между контрольными точками построены циклоиды, прямые, цепные линии GH, JK, LM, а также пространственные кривые на базисе В-сплайн функций типов 1 – 6. Также между данными контрольными точками сформированы законы движения в пространстве обобщенных координат, результатом движения по которым является пространственная кривая в рабочем пространстве (рис. 2).



Рис. 2. Траектории в рабочем пространстве между точками GH, JK, LM

Движение по всем типам траекторий осуществлялось за фиксированное время. Результаты расчета максимальной потребной мощности и расхода топлива представлены на рис. 3.

Наибольшие уровни мощности характерны для циклоиды, это связано в больше степени с тем, что ее длина в среднем больше остальных траекторий. Меньший уровень мощности требует движение, сформированное в пространстве обобщенных координат и, в данном случае, с ним сравнимо движение по прямой в рабочем пространстве, у этих же траекторий также наблюдаются минимальные затраты топлива.



Рис. 3. Максимальная мощность и расход топлива

Уровень мощности при движении по цепной линии может сильно зависеть от принятой величины ее длины при построениях, поэтому для уменьшения длины такой траектории следует увеличивать ее «натяжение».

Затраты мощности при движении по В-сплайнам сильно зависят от их формы, и минимальные значения наблюдаются, если эти кривые близки к формам траекторий, сформированным по закону в пространстве обобщенных координат. Расход топлива за время движения по некоторым формам Всплайнов также соизмерим либо меньше минимальных значений,

рассмотренных ранее траекторий. В-сплайны позволяют в большей степени использовать конкретную конфигурацию оборудования в пространстве.

Натурный эксперимент

Экспериментальная установка состоит из:

- 1. Экскаватор LIUGONG E933, масса 33 т., двигатель Cummins QSB6.7.
- 2. Лазерный трекер Leica Absolute Tracker AT500.
- 3. Электронный стабилизатор DJI RS 4 Pro.
- 4. Система передачи изображения RavenEye.
- 5. Камера GoPro HERO11 Black.
- 6. Гидротестер Parker Serviceman Plus.
- 7. Датчик давления и температуры Parker SensoControlSCPT-400-02-02.

В рамках проведения натурных испытаний ковш заблокирован, и система включает три обобщенные координаты. Такой подход позволил однозначно определить конфигурацию системы на основе значения координат точек рабочего пространства. Иными словами, если n - множество степеней свободы системы, т.е. множество скоростей шарниров $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$, r – количество переменных, необходимых для описания задачи или множество скоростей системы координат $v_c \in \mathbb{R}^n$, то при n = r, определив скорость такой системы в рабочем пространстве, можно определить угловые скорость гидромотора. На основе этого и с учетом геометрических характеристик гидродвигателей рас считывается суммарный объемный расход гидросистемы без установки датчиков расхода или иного оборудования на каждый гидродвигатель.

Система стабилизации отражателя и взаимное расположение лазерного трекера и экскаватора представлены на рис. 4, 5.



Рис. 4. Система стабилизации отражателя



Рис. 5. Взаимное расположение лазерного трекера и экскаватора

№ 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

Для набора статистических данных оператор осуществлял многократные повторения движения снизу-вверх с поворотом на угол 90° на различных режимах работы двигателя. В результате был получен набор траекторий различного типа в рабочем пространстве. Для классификации полученных пространственных кривых принята следующая методика:

1. Начальная и конечная точки каждой траектории соединяются прямой.

2. Данная прямая является результатом пересечения вертикальной плоскости, в которой лежат упомянутые выше точки, и перпендикулярной ей плоскости, которой также принадлежат данные точки. Таким образом, пространство делится на 4 четверти.

3. Определяется длина траектории и площадь фигуры, ограниченной траекторией и прямой (п.п. 1), находящаяся в каждой четверти.

4. Из каждой точки траектории проведем прямую перпендикулярную прямой, соединяющей начальную и конечную точку траектории. Таким образом, данные перпендикуляры ориентированы в пространстве под некоторыми углами. Установим значение отсчета угла ориентации перпендикуляров 0° на вертикальной плоскости между IV и I четвертями, отсчет угла по часовой стрелке при виде от конечной точки траектории. Введем понятие средневзвешенного значения данных углов для каждой траектории, весами для которого являются длины перпендикуляров. Такой подход подразумевает одновременный учет в среднем нахождения точек траектории в какой-либо четверти и их удаленность от оси — направления между начальной и конечной точками. Описанная схема классификации показана на рис. 6.

№ 1(43) март 2025



Рис. 6. Разделение рабочего пространства на четверти

Между начальными и конечными точками траекторий в эксперименте сформируем законы движения системы в пространстве обобщенных координат с учетом времени движения, определенного по экспериментальным данным. Для полученных таким образом кривым в рабочем пространстве определим значения средневзвешенного угла. На диаграмме (рис. 7) наибольшая плотность точек эксперимента с минимальными значениями потребной мощности находится в диапазоне 0,5 – 2,3 рад, при этом для траекторий, сформированным в пространстве обобщенных координат (отмечены «Х»), также характерны минимальные значения мощности. Данные точки располагаются вблизи значения средневзвешенного угла 1,57 рад.

№ 1(43) март 2025



Рис. 7. Диаграмма «средневзвешенный угол – максимальная мощность»

Рассчитаем среднее значение удаленности каждой точки траектории от плоскости между I и II четвертью. Наибольшая плотность точек со значением мощности до 100 кВт наблюдается вблизи плоскости между I и II четвертью и убывает интенсивнее при удалении от нее во II четверти, чем в I четверти (рис. 8).



Рис. 8. Распределение значений максимальной мощности а – от среднего расстояния точек траектории до плоскости сравнения в I четверти; б – от среднего расстояния точек траектории до плоскости сравнения во II четверти

№ 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

Таким образом, с определенной долей уверенности можно сказать, что траектория движения PO, обеспечиваемая оператором в рабочем пространстве, приближается по форме к той, которая формируется также в рабочем пространстве, но является результатом закона движения системы, сформированного в пространстве обобщенных координат, уровень мощности гидросистемы стремится к минимальным значениям в рассматриваемых случаях. Это также согласуется с результатами, полученными в ходе имитационного моделирования.

Проверка гипотезы

Для проверки выдвинутой ранее гипотезы проведем оценку по критерию Стьюдента на основе выборки значений максимальной мощности, а также работы гидросистемы по вариантам траекторий, представленных на рис. 2. Для проверки распределения данных на нормальность применим тест Шапиро-Уилка, сравнение дисперсий выборок проведем с помощью теста Левена. В случае не равенства дисперсий проведем расчет по критерию Уэлча, являющимся модификацией критерия Стьюдента. Данные для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

Перемещение между точками GH			% времени движения, при котором \vec{V} составляет меньший угол с главными диагоналями эллипсоида манипулятивности		
Тип траектории	Nmax, кВт	Суммарная работа гидросистемы, кДж	Мах. диагональ	Средняя диагональ	Min. диагональ
Циклоида	155,22	220,49	18,9	79,5	1,6
Цепная линия	88,97	165,96	23,1	76,9	0
Прямая	21,34	49,41	96	4	0
Обобщ. коорд.	23,48	43,99	88,2	11,8	0
В-сплайн 1	23,96	44,36	97	3	0
В-сплайн 2	69,68	97,05	97	3	0

Исходные данные для расчета

№ 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

В-сплайн 3	93,32	133,61	70,3	29,7	0
В-сплайн 4	33,05	64,83	77,9	3,3	18,8
В-сплайн 5	52,86	108,48	81,4	7	11,6
В-сплайн 6	50,79	87,24	97	3	0
Перемещение между точками ЈК					
Циклоида	107,55	229,39	47,6	52,4	0
Цепная линия	69,21	198,8	41,1	58,9	0
Прямая	67,51	203,62	45,5	54,5	0
Обобщ. коорд.	45,12	177,97	63,6	36,4	0
В-сплайн 1	54,59	182,84	22,3	77,7	0
В-сплайн 2	67,61	183,79	39,1	60,9	0
В-сплайн 3	82,13	198,05	33,8	66,2	0
В-сплайн 4	77,52	185,74	28,3	71,7	0
В-сплайн 5	101,2	215,69	15,8	84,1	0
В-сплайн 6	83,92	220,85	30,5	69,5	0
Перемещение между точками LM					
Циклоида	102,32	285,68	47,4	52,6	0
Цепная линия	58,08	270,7	38,8	61,1	0
Прямая	76,77	267,64	22	77,3	0,7
Обобщ. коорд.	54,21	244,23	72,3	27,7	0
В-сплайн 1	70,61	246,66	57	43	0
В-сплайн 2	92,55	247,33	32,4	67,6	0
В-сплайн 3	98,99	254,18	24,4	75,6	0
В-сплайн 4	119,68	289,56	45,6	29,4	25
В-сплайн 5	88,34	255,83	59	41	0
В-сплайн 6	81,03	284,44	33,6	49	17,4

Выборки сформируем по следующей схеме:

выборка 1: значения мощности либо работы, при которых «Мах.

диагональ» > 50%;

выборка 2: значения мощности либо работы, при которых («Средняя диагональ» + «Міп. диагональ») > 50%, т. е. НЕ «Мах. диагональ» > 50%;

В результате расчетов получаем:

Принятая доверительная вероятность p = 0,05;

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

для максимальной мощности:

значение t = 3,93459;

 при двустороннем распределении значение p-value = 0,00064, что говорит о том, что выборочные средние отличаются статистически достоверно;

- при одностороннем распределении значение p-value = 0,00032 – выборочное среднее первой выборки больше выборочного среднего второй выборки;

для работы гидросистемы:

значение t = 3,87766;

 при двустороннем распределении значение p-value = 0,00157, что так же говорит о том, что выборочные средние отличаются статистически достоверно;

- при одностороннем распределении значение p-value = 0,000786 – выборочное среднее первой выборки больше выборочного среднего второй выборки.

Полученные данные позволяют сказать, что с определенной статистически значимой вероятностью выдвинутая гипотеза верна. Минимальные значения максимальной мощности и работы гидросистемы наблюдаются для траекторий, при движении по которым вектор линейной скорости рассматриваемой системы координат составляет более длительное время меньший угол с максимальной диагональю скоростного эллипсоида манипулятивности.

Проведем проверку данной гипотезы также по полученным экспериментальным данным. Исходные данные для оценки по критерию Стьюдента приведены в таблице 2.

> № 1(43) март 2025

Таблица 2

№ расчета		% времени движения, при котором $ec{V}$ составляет			
		меньший угол с гл	авными диагоналями эллипсоида		
		М	анипулятивности		
Расчет №1		Время движения 10,6 с; координаты конечных точек X є [-1,8;			
		+1,8], Z € [5; 6,5]			
N _{max} , B _T		Мах диагональ	Min + средняя диагональ		
Выборка 1	82343,81	84,58	15,42		
	84843,34	50,97	49,03		
	90000,46	63,76	36,24		
	83188,38	67,27	32,73		
Выборка 2	116904,87	26,42	73,58		
	87680,65	47,6	52,4		
	108232,27	40,39	59,61		
	85917,87	23,44	76,56		
	104528,78	33,8	66,2		
	159912,54	35,48	64,52		
Расчет №2		Время движения 13,5 с; координаты конечных точек Х є [-1,8;			
		+1,8], Z € [3,5; 5]			
Выборка 1	71506,31	54,12	45,88		
	51863,19	69,73	30,27		
	79644,39	67,39	32,41		
Выборка 2	138170,43	39,93	60,07		
	81365,15	24,81	75,19		
	87090,48	34,12	65,88		
	97406,42	16,03	83,97		

Исходные данные для расчета

Принятая доверительная вероятность p = 0,05.

Расчет №1:

значение t = 2,279051;

№ 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

 при одностороннем распределении значение p-value = 0,03460 – выборочное среднее второй выборки больше выборочного среднего первой выборки;

Расчет №2:

значение t = 2,186521;

 при одностороннем распределении значение p-value = 0,041533 – выборочное среднее второй выборки больше выборочного среднего первой выборки.

В данном случае также, как и по результатам теоретических расчетов, можно сказать, что с определенной статистически значимой вероятностью выдвинутая гипотеза верна, однако, для уточнения желательно наличие более широких выборок данных.

Заключение

По результатам проведенного имитационного моделирования с помощью разработанного программного комплекса, а также натурного эксперимента проведена проверка и подтверждение выдвинутой гипотезы о том, что траектории с меньшими уровнями мощности характеризуются меньшим углом между вектором линейной скорости рассматриваемой системы координат с большей диагональю скоростного эллипсоида манипулятивности за время движения по данной траектории. При движении системы по траекториям, сформированным в рабочем пространстве наибольшие уровни мощности наблюдаются для циклоид. Меньший уровень мощности из рассмотренных траекторий в рабочем пространстве характерен для движения по закону, сформированному в пространстве обобщенных координат. Анализ экспериментальных данных показал, что в случаях, когда траектория движения РО, обеспечиваемая оператором в рабочем пространстве, приближается по форме к той, которая формируется также в рабочем пространстве, но является результатом закона движения системы, сформированным в пространстве обобщенных координат, уровень мощности

> № 1(43) март 2025

гидросистемы стремится к минимальным значениям в рассматриваемых случаях. Полученные данные могут являться основой для построения методик планирования движения экскаваторного оборудования и формирования алгоритмов энергоэффективного траекторного управления.

Список источников

1. Energy Flow Analysis of Excavator System Based on Typical Working Condition Load / D. Su, L. Hou, Sh. Wang [et al.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11, No. 13. – P. 1987. – DOI 10.3390/electronics11131987. – EDN UXRIOS.

 Савинкин, В. В. Развитие теории энергоэффективности одноковшовых экскаваторов: специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемнотранспортные машины": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Савинкин Виталий Владимирович; СибАДИ. – Омск, 2016. – 390 с. – EDN LUUSJU.

 Кузнецова, В. Н. Анализ эффективности гидросистемы одноковшового экскаватора при рекуперации энергии потока рабочей жидкости / В. Н. Кузнецова, В. В. Савинкин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 5(39). – С. 21-28. – EDN TCSKCX.

4. Подчасов, Е. О. Анализ точности работ, производимых рабочим механизмом одноковшового экскаватора / Е. О. Подчасов, А. Д. Терентьева // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 8(68). – С. 4. – DOI 10.18698/2308-6033-2017-8-1654. – EDN YUPNLV.

Dombre, E. Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators /
 E. Dombre, W. Khalil. – Newport Beach, CA: Wiley-ISTE Ltd, 2007. – 504 p.

 Scalera, L. Minimum-Energy Trajectory Planning for Industrial Robotic
 Applications: Analytical Model and Experimental Results / L. Scalera, G. Carabin, R. Vidoni, A.
 Gasparetto // Proceedings of the 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD. – 2017. – P. 334-342. – DOI 10.1007/978-3-030-48989-2_36.

Craig, J. J. Introduction to Robotics. Mechanics and Control. Third Edition. / J. J.
 Craig, M. J. Horton, A. Dworkin, C. Snyder and others. – Upper Saddle River, NJ 07458:
 Pearson Education, Inc., 2005. – 408 p.

Lynch, K. M. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control / K. M. Lynch,
 F. C. Park. – Cambridge, IL: Cambridge University Press, 2017. – 547 p.

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

9. De Boor, C. A practical guide to splines / C. De Boor. – New York: Springer Verlag, 2001. – 346 p.

Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, L. Sciavicco and others.
 Springer Publishing Company, Inc., 2010. – 632 p. –ISBN 978-1-84996-634-4.

11. Колюбин, С. А. Динамика робототехнических систем / С. А. Колюбин. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. – 117 с. – EDN VBSMAH.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024667696 Российская Федерация. Программа для динамического и кинематического расчета гидравлического экскаваторного оборудования: №2024666458: заявл. 11.07.2024: опубл. (зарег) 29.07.2024 / П.Л. Кудряшов.

References

 Su D., Hou L., Wang Sh. Energy Flow Analysis of Excavator System Based on Typical Working Condition Load, *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 13, pp. 1987, DOI 10.3390/electronics11131987.

Savinkin V.V. *Razvitie teorii energoeffektivnosti odnokovshovikh exkavatorov* (Development of the Theory of Energy Efficiency of Single-Bucket Excavators), Doctor's thesis,
 Omsk, SIBADI, 2016, 390 p.

3. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. Vestnik sibirskoj gosudarstvennoj avtomobilnodorognoj akademii, 2014, no. 5(39), pp. 21-28.

4. Podchasov E.O., Terentjeva A.D. *Ingenernij jurnal: nauka i innovatzii*, 2017, no. 8(68), pp. 4, DOI 10.18698/2308-6033-2017-8-1654.

5. Dombre E., Khalil W. *Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators,* Newport Beach, CA, Wiley-ISTE Ltd, 2007, 504 p.

6. Scalera L., Carabin G., Vidoni R., Gasparetto A. Minimum-Energy Trajectory Planning for Industrial Robotic Applications: Analytical Model and Experimental Results, *Proceedings of the 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD*, 2017, pp. 334-342. 10.1007/978-3-030-48989-2_36.

7. Craig J. J., Horton M. J., Dworkin A., Snyder C. *Introduction to Robotics. Mechanics and Control. Third Edition*, Upper Saddle River, NJ 07458, Pearson Education, Inc., 2005, 408 p.

8. Lynch K. M., Park F. C. *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control,* Cambridge, IL, Cambridge University Press, 2017, 547 p.

9. De Boor C. A practical guide to splines, New York: Springer Verlag, 2001, 346 p.

10. Siciliano B., Sciavicco L. *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer Publishing Company, Inc., 2010, 632 p. ISBN 978-1-84996-634-4.

№ 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

11. Koljubin S.A. *Dinamika robototechnicheskih sistem* (Dynamics of robotic systems), Sankt-Peterburg, Sankt-Peterburgskij nazionalnij issledovatelskij universitet informatzionnih technologij, mekhaniki i optiki, 2017, 117 p.

12. Kudryashov P.L. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registrazii programmi dlya EVM RU 2024667696, 29.07.2024.

Рецензент: Л.А. Сладкова, д-р тех. наук, проф., РУТ (МИИТ)

Информация об авторах

Кудряшов Петр Леонидович, соискатель уч. степени канд. техн. наук, МАДИ. Савельев Андрей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., МАДИ; МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Information about the authors

Kudryashov Petr L., applicant for a degree candidate of technical sciences, MADI. Saveliev Andrey G., doctor of sciences (technical), professor, MADI; BMSTU.

Статья поступила в редакцию 21.01.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принята к публикации 19.03.2025. The article was submitted 21.01.2025; approved after reviewing 10.02.2025; accepted for publication 19.03.2025.

> № 1(43) март 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА