

Научная статья
УДК 621.879

Программный комплекс расчета гидравлического экскаваторного оборудования

Петр Леонидович Кудряшов¹, Андрей Геннадьевич Савельев²,
Ольга Юрьевна Улитич³

^{1,2,3}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹techpostdm@yandex.ru

²prof.saveliev@yandex.ru

³natagie@mail.ru

Аннотация. В статье дано сравнение результатов расчета гидравлической мощности рабочего оборудования экскаватора с помощью возможностей разработанного программного комплекса и экспериментальными данными. Описывается математическая модель расчета, реализованная программными средствами. Представлено описание экспериментальной установки, состоящей из экскаватора, лазерного трекера, системы стабилизации отражателя, средств замера давления в линии нагнетания насосно-силовой установки, а также методика получения экспериментальных данных. Показано, что гидравлическая мощность, полученная теоретически, имеет близкие значения к экспериментальным данным. Сделан вывод о том, что точность результатов зависит от принятых допущений модели и является приемлемой в приведенном расчетном случае для применения на этапе проектирования либо модернизации экскаваторного оборудования.

Ключевые слова: экскаватор, гидравлическая мощность, программный комплекс, эксперимент, лазерный трекер, обратная задача кинематики, объемный расход.

Для цитирования: Кудряшов П.Л., Савельев А.Г., Улитич О.Ю. Программный комплекс расчета гидравлического экскаваторного оборудования // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 3 (41).

Original article

Software package for calculating hydraulic excavator equipment

Petr L. Kudryashov¹, Andrey G. Saveliev², Olga J. Ulitich³

^{1,2,3}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹techpostdm@yandex.ru

²prof.saveliev@yandex.ru

³natagie@mail.ru

Abstract. The article discusses the comparison of the results of calculating the hydraulic power of the excavator's working equipment using the capabilities of the developed software package and experimental data. A mathematical calculation model implemented using software is described. A description of the experimental setup consisting of an excavator, a laser tracker, a reflector stabilization system, means for measuring pressure in the pump-power unit discharge line, as well as a method for obtaining experimental data are presented. It is shown that the hydraulic power obtained theoretically has values close to the experimental ones. It is concluded that the accuracy of the results depends on the adopted assumptions of the model and is acceptable in the given calculation case for use at the design stage or modernization of excavator equipment.

Keywords: excavator, hydraulic power, software package, experiment, laser tracker, inverse kinematics problem, volumetric flow rate.

For citation: Kudryashov P.L., Saveliy A.G., Ulitich O.J. Software package for calculating hydraulic excavator equipment // *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. № 3 (41).

Введение

Математическая модель рабочего оборудования (далее РО) одноковшового гидравлического экскаватора, представленная дифференциальными уравнениями второго порядка, зависит от большого количества конструктивных параметров и значений обобщенных координат. Решение таких систем уравнений аналитически затруднительно и требует большого количества времени [1]. Растущие требования, предъявляемые к современным машинам, приводят к необходимости поиска конструкторами решений задач оптимизации одновременно по многим параметрам, что в случае натурных испытаний ведет к значительному росту затрат. Численное моделирование в данном случае является альтернативным решением, позволяющим на этапе проектирования с достаточной долей достоверности оценить эффективность принимаемых решений. Способность быстро и с максимальной производительностью выполнять технологические операции определяет эффективность экскаватора [2]. Увеличение скоростей РО сопровождается увеличением потребляемой мощности. Неравномерное распределение динамических нагрузок, вследствие различного

пространственного положения РО при неизменном режиме работы двигателя и гидропривода, может вызывать как повышение, так и понижение полезной мощности. Оценить затраты мощности при работе экскаватора на разных режимах работы двигателя, а также при различном положении РО можно относительно быстро с помощью численного моделирования движения.

Математическое моделирование и экспериментальные данные

В рамках данной работы был разработан программный комплекс, позволяющий решать задачи кинематики и динамики для одноковшового гидравлического экскаватора на языке программирования Python¹ с использованием библиотек Numpy², Sympy³, Matplotlib⁴, Scipy⁵. При проведении натурного эксперимента была произведена оценка сходимости результатов с численным экспериментом. Математическая модель системы включает в себя:

— кинематическая модель системы, описанная с помощью представления Денавита-Хартенберга [3]. Решение обратной задачи кинематики основано на аппроксимации матрицы Якоби [4]:

$$\Delta \vec{X} \approx J_a(\vec{q}_0) \Delta \vec{q},$$

где $\Delta \vec{X}$ – изменение вектора скоростей рассматриваемой системы в рабочем пространстве; $J_a(\vec{q}_0)$ – аналитический якобиан системы; $\Delta \vec{q}$ – вектор изменений обобщенных координат системы.

— динамическая модель системы, основанная на методе Эйлера-Лагранжа [5]:

¹ The official home of the Python Programming Language: official website. — URL: <https://www.python.org/> (дата обращения: 11.09.2024).

² The open source Numpy library for the Python programming language: official website. — URL: <https://numpy.org/> (дата обращения: 11.09.2024).

³ The open source SymPy library for the Python programming language: official website. — URL: <https://www.sympy.org/> (дата обращения: 11.09.2024).

⁴ The Matplotlib data visualization library for the Python programming language. official website. — URL: <https://matplotlib.org/> (дата обращения: 11.09.2024).

⁵ The open source SciPy library for the Python programming language: official website. — URL: <https://matplotlib.org/> (дата обращения: 11.09.2024).

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где n – число обобщенных координат; τ_i – вектор обобщенных сил; q_i – обобщенные координаты; L – лагранжиан системы.

– гидравлическая система разделена на отдельные контуры, относящиеся к соответствующим гидроцилиндрам (далее ГЦ) и гидромотору. Суммарные гидравлические сопротивления контуров рассчитываются согласно формулам, применяемым в инженерной практике [6, 7, 8].

При расчетах принят ряд допущений: звенья являются абсолютно жесткими, связи голономные, ходовая часть экскаватора неподвижна, люфтов в шарнирах нет, массы звеньев сосредоточены в центрах тяжести, моменты инерции звеньев выражены в локальных системах координат, потери мощности тепловые и в результате утечек равны нулю, жидкость несжимаема, не учитывается деформация ГЦ и гидролиний в результате действия давления.

Во время проведения натурного эксперимента ГЦ ковша заблокирован. Таким образом, система обладает тремя степенями свободы. Это означает, что любой точке в рабочем пространстве с тремя декартовыми координатами X , Y , Z соответствует единственная конфигурация системы. Такой подход позволил измерять координаты точек в пространстве, через которые проходит система, и определять необходимые для данных конфигураций системы линейные смещения штоков ГЦ, что в свою очередь дает информацию о суммарном объемном расходе гидросистемы. Одновременно с измерением координат точек проводился замер давления в линии нагнетания насоса. Данная информация позволяет оценить гидравлическую мощность системы, необходимую для совершения заданного движения. Стоит заметить, что при этом величина объемного расхода характеризует чистое результирующее смещение поршня ГЦ и не оценивает величину утечек, а

величина давления в линии нагнетания учитывает все сопротивления системы.

Экспериментальная установка состоит из:

- экскаватор LIUGONG E933, масса 33 т, двигатель Cummins QSB7, 156 кВт;
- лазерный трекер Leica Absolute Tracker AT500;
- электронный стабилизатор DJI RS 4 Pro;
- система передачи изображения RavenEye;
- камера GoPro HERO11 Black;
- гидротестер Parker Serviceman Plus;
- датчик давления и температуры Parker SensoControl SCPT-400-02-02.

Фото системы представлено на рис. 1.

Так как отражатель для лазерного трекера (2), обладает углом отражения около 60° , то жестко закрепленный на РО при повороте экскаватора он выходил бы из поля зрения трекера. Поэтому он был закреплен на стабилизаторе (3), с функцией активного трекинга. Видео сигнал с камеры (5), направленной на трекер (2), поступает на стабилизатор (3). При указании области нахождения трекера в кадре система передачи изображения (4) рассчитывает величины поворота двигателей стабилизатора так, чтобы камера постоянно была направлена на трекер. Система стабилизации с отражателем соединена с креплением, которое, в свою очередь, закреплено на РО. При измерениях не учитывается смещение отражателя в результате поворота системы в процессе активного трекинга. Для замера давления в линии нагнетания сдвоенного насоса применялся гидротестер (6), подключенный к датчику давления и температуры (7). Для подключения датчика применена схема с клапаном типа «ИЛИ», таким образом, гарантируется больший сигнал давления из двух секций насоса (см. рис. 2).

Экскаватор совершал движение из стартового положения (рис. 3) вверх с поворотом на различных режимах работы двигателя с разными скоростями, и различными траекториями в рабочем пространстве. Координаты точек траекторий выражены в системе, связанной с осью поворотного круга на уровне шарнира соединения стрелы с поворотной платформой. По полученным траекториям определялось значение угловых координат звеньев, угловые скорости и ускорения.

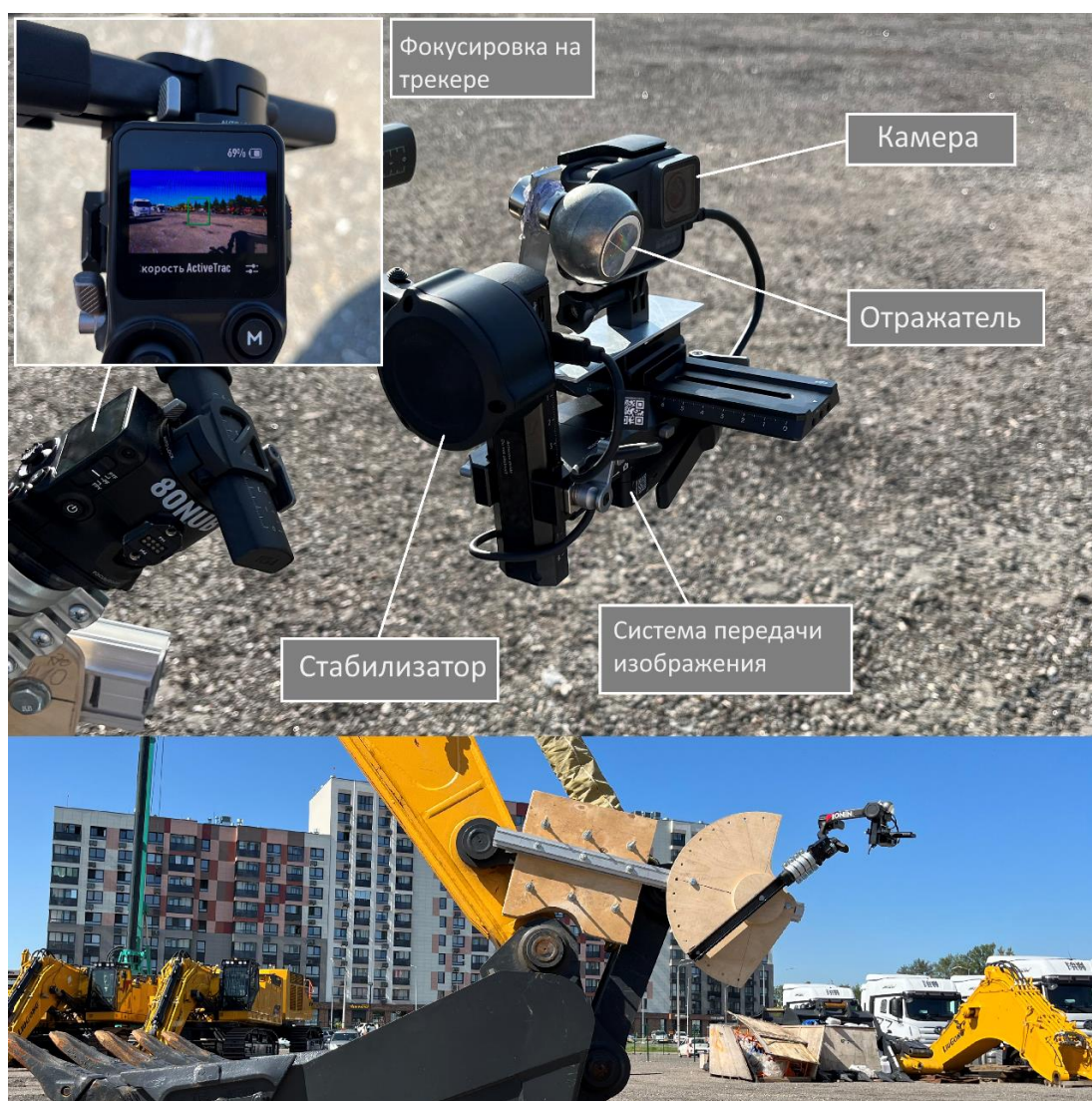


Рис. 1. Система активного трекинга

После приведения в соответствие точек траектории точкам на графике полученного давления по количеству, а также по времени, определялось значение суммарного объемного расхода. Заметим, что период между фиксацией точек трекером (2) составляет 0,05 с, запись значения давления

проходит через 0,002 с. Соответственно, из данных замера давления выбрана каждая 25 точка.

На рисунке 4 представлены результаты решения обратной задачи кинематики по экспериментальным данным и теоретического

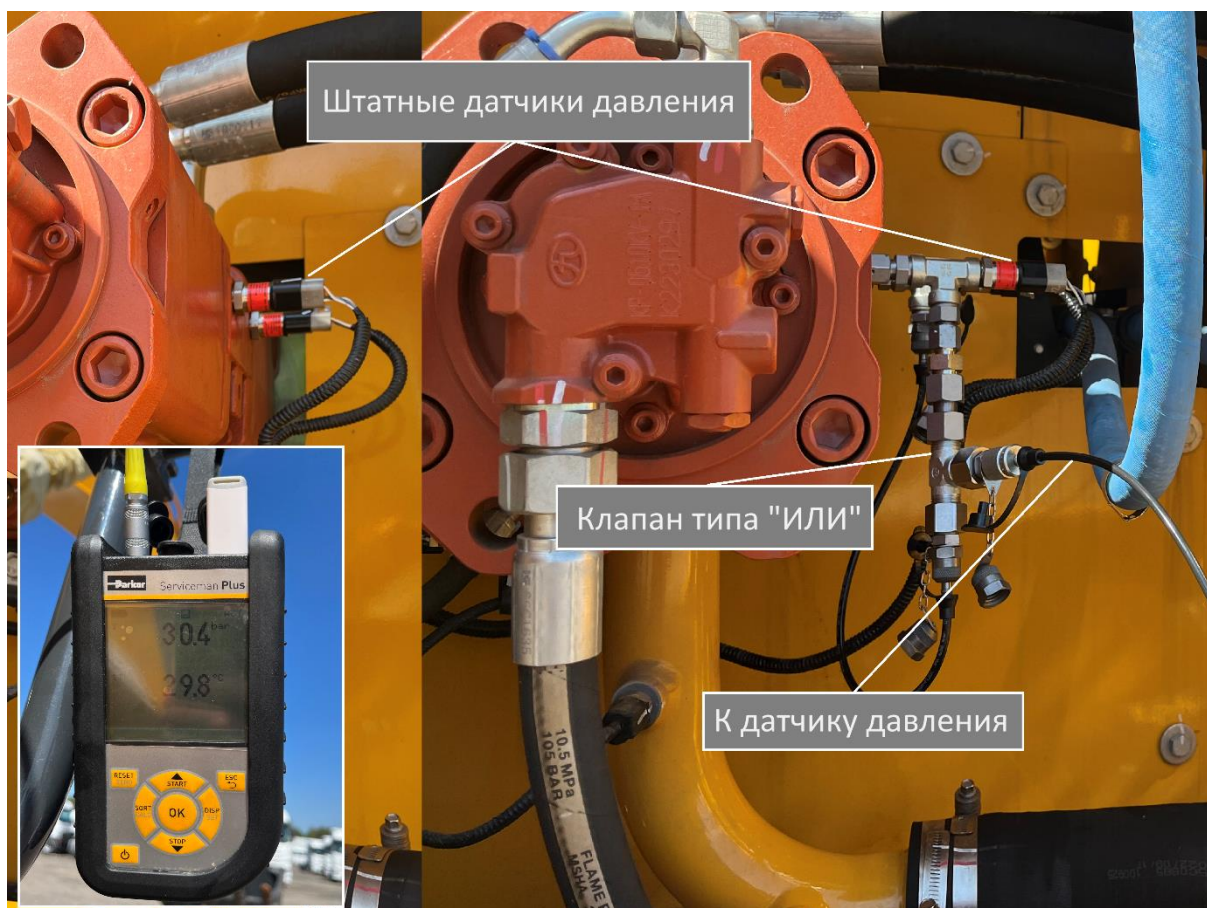


Рис. 2. Подключение датчика давления к насосам

моделирования методом Эйлера-Лагранжа. Координаты точек шарниров РО и точек крепления ГЦ рассчитываются на основе ориентации локальной системы координат отражателя относительно локальной системы координат рукояти.

По полученным экспериментальным данным рассчитана гидравлическая мощность, необходимая для совершения заданного движения, и сравнена с теоретическими результатами. Графики гидравлической мощности показаны на рис. 5. Ввиду наличия значительных колебаний значений давления, а также ввиду колебаний РО и системы

отражателя графики носят существенно не плавный характер, поэтому для их сглаживания применен цифровой фильтр Баттерворта.



Рис. 3. Расположение трекера и экскаватора

Данный фильтр отличается максимально гладкой амплитудно-частотной характеристикой на частотах полосы пропускания [9]. На протяжении длительности движения средний процент отклонения теоретических данных от экспериментальных составляет 26,78% за исключением отдельных участков, на которых данный процент принимает большие значения.

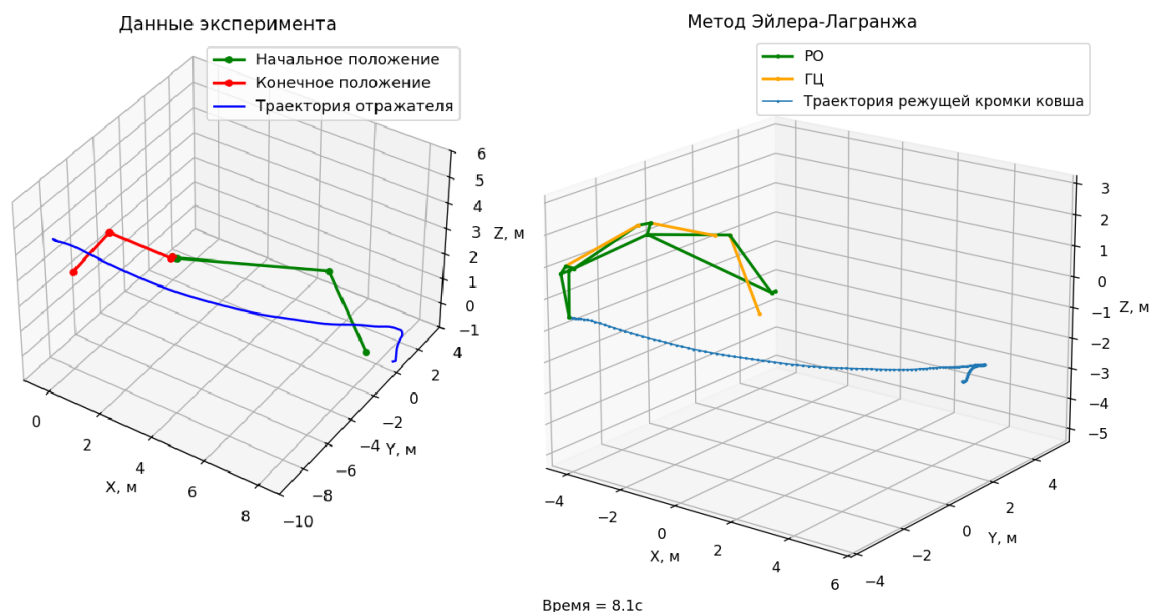


Рис. 4. Результаты моделирования по результатам эксперимента и методом Эйлера-Лагранжа

Ввиду того, что абсолютное значение экспериментальной мощности близко к нулю, а разница между экспериментальными данными и теоретическими составляет порядка 1 кВт, однако данные участки занимают около 10% длительности движения. Критерий корреляции Пирсона в данном случае составляет 0,925. Это указывает на положительную линейную корреляцию между представленными наборами данных.

Заключение

Проведенное сравнение результатов расчета теоретической гидравлической мощности при совершении заданного движения РО экскаватора с результатами эксперимента показывает, что программный расчетный комплекс позволяет получить значения с приемлемой долей приближения к экспериментальным. Степень приближения результатов расчета зависит от принятых допущений моделирования.

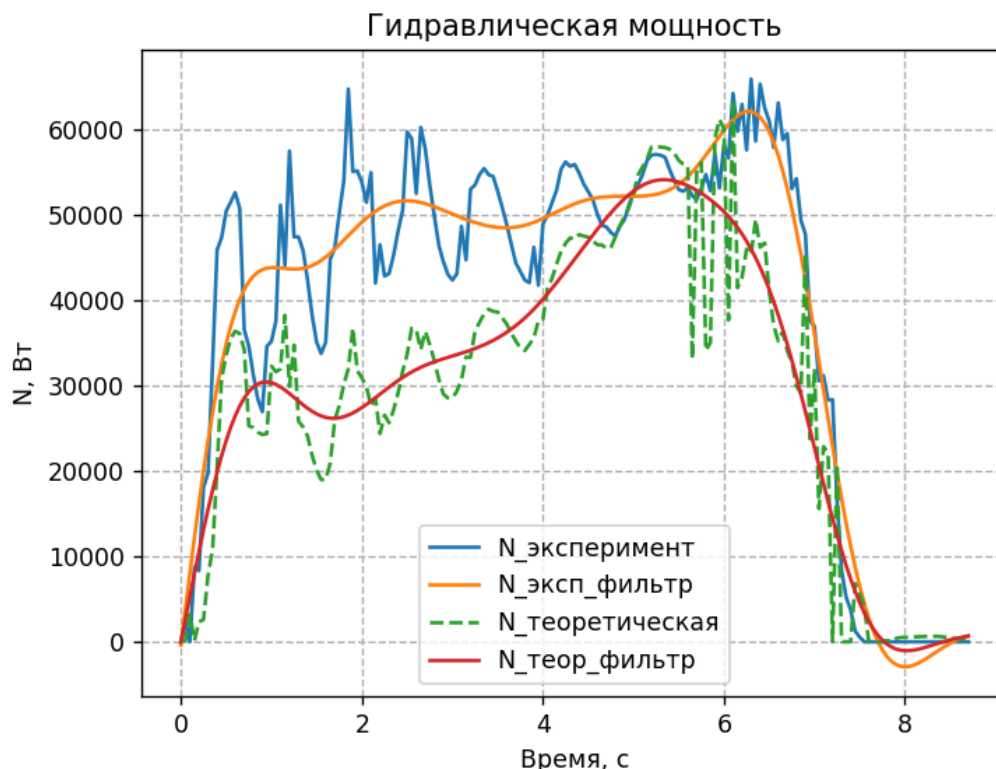


Рис. 5. Гидравлическая мощность теоретическая и экспериментальная

Более детальная проработка модели позволит увеличить точность расчетов. Таким образом, полученные данные могут найти применение на этапах проектирования и модернизации экскаваторов.

Список источников

1. Шеховцова, Д. А. Математическое моделирование динамической системы одноковшового экскаватора с гидроприводом в Matlab / Д. А. Шеховцова, Е. Д. Комаров // Омский научный вестник. – 2014. – № 3(133). – С. 147-151. – EDN TKDKDJ.
2. Якушев, А. Е. Исследование энергетических параметров одноковшовых гидравлических экскаваторов : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Якушев Александр Егорович. – Москва, 2004. – 179 с. – EDN NMTWZX..
3. Manipulator Control with Inverse Kinematics PD-Pseudoinverse Jacobian and Forward Kinematics Denavit Hartenberg / I. Agustian, N. Darath, F. Faurina, A. Suandi, S. Sulistyaningsih // Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi (JET). – 2021. – Vol. 21, No. 1. – P. 8-18. – DOI 10.14203/jet.v21.8-18.

4. Siziliano, B. Kinematic Control of Redundant Robot Manipulators: A Tutorial / B. Siziliano // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. – 1990. – Vol. 3. – P. 201-212.
5. Lynch, K. M. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control / K. M. Lynch, F. C. Park. – Cambridge, IL: Cambridge University Press, 2017. – 547 p.
6. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов, О. В. Байбаков, Ю. Л. Кирилловский – 4-е изд., стереотипное, перепечатка со второго издания 1982 г. – Москва : «Издательский дом Альянс», 2010. – 423 с.
7. Ухин, Б.В. Гидравлика / Б.В. Ухин. – Москва : ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – 464 с.
8. Сакович, Н.Е. Математическая модель параметров гидроцилиндра гидропривода сельскохозяйственной техники / Н.Е. Сакович, А.М. Никитин, А.С. Шилин // *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2021. – №6(88). – С. 43-49. – EDN BAAECX.
9. Гусев, Б. В. Фильтрация сигналов и согласование нагрузок: учебное пособие / Б. В. Гусев, Е. В. Лагунов, С. Н. Шабунин; Министерство науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. – 138 с.

References

1. Shekhovcova D.A, Komarov E.D. *Omskij nauchnij vestnik*, 2014, no. 3(133), pp. 147-151.
2. Yakushev A.E. *Issledovanie energeticheskikh parametrov odnokovshovih ekskavatorov* (Investigation of the energy parameters of single-bucket hydraulic excavators), Candidate's thesis, Moscow, MGSU, 2004, 179 p.
3. Agustian I., Darath N., Faurina F., Suandi A., Sulistyaningsih S. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi (JET)*, 2021, vol. 21, no. 1, p. 8-18, DOI 10.14203/jet.v21.8-18.
4. Siziliano B. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1990, vol. 3, pp. 201-212.
5. Lynch K. M., Park F. C. *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*, Cambridge, IL, Cambridge University Press, 2017, 547 p.
6. Bashta T.M, Rudnev S.S., Nekrasov B.B., Baibakov O.V., Kirillovskij J. V. *Gidravlika, gidromashini I gidroprivodi: uchebnik dlya mashinostroitel'nykh vusov* (Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives: Textbook for mechanical engineering universities), Moscow, "Izdatelskij dom alianz", 2010, 423 p.
7. Ukhin B.V *Gidravlika* (Hydraulics), Moscow, ID "FORUM": INFRA-M, 2009, 464 p.
8. Sakovitch N.E., Nikitin A.M., Shilin A.S. *Vestnik Bryanskoj selskohozyajstvennoj akademii*, 2021, no. 6(88), pp. 43-49.

9. Gusev B.V., Lagunov E.V., Shabunin S.N. *Filtracija signalov I soglasovanie nagruzok: uchebnoe posobie* (Signal Filtering and Load Matching: A Tutorial), Ekaterinburg, Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2022, 138 p.

Рецензент: Н.И. Баурова, д-р тех. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Кудряшов Петр Леонидович, соискатель уч. степени канд. техн. наук, МАДИ.

Савельев Андрей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., МАДИ.

Улитич Ольга Юрьевна, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

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.

Ulitich Olga J., candidate of sciences (technical), associated professor, MADI.

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена после рецензирования 19.09.2024; принята к публикации 20.09.2024.

The article was submitted 17.09.2024; approved after reviewing 19.09.2024; accepted for publication 20.09.2024.