

**Набиуллин Рустем Шафкатович**, канд. техн. наук, доцент

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

E-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru

## **ПОДГОТОВКА К ПЛАНИРОВАНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА**



### **Информация о статье**

Поступила:

13 ноября 2021 г.

Рецензирование:

30 ноября 2021 г.

Принята к печати:

03 декабря 2021 г.

### **Ключевые слова:**

рычажно-гидравлический механизм, рабочее оборудование гидравлического экскаватора, передаточные функции, планирование эксперимента.

### **Аннотация.**

Статья является постановочной, в ней приведена математическая модель функционирования главных механизмов рабочего оборудования гидравлического экскаватора, полученная в результате проведения теоретических исследований, а именно выявления закономерностей формирования нагрузок на рабочем оборудовании гидравлического экскаватора. Однако этот метод не может помочь в полной мере оценить величину нагрузок, возникающих в приводных механизмах (поворота стрелы, поворота рукояти и поворота ковша) рабочего оборудования экскаватора, так как процесс этих механизмов связан с взаимодействием зубьев ковша экскаватора с горными породами и его следует рассматривать как сложную, плохо организованную систему. Так как характеристики этого процесса определяются множеством неконтролируемых факторов, которые не учитываются в предложенной модели, то для оценки точности полученной математической модели необходимо использовать экспериментальные методы, основанные на результатах, полученных при исследовании объекта в реальных условиях. При определении нагрузок, возникающих в рабочем оборудовании, целесообразно прибегнуть к помощи активного эксперимента, который, несмотря на сложность реализации в промышленных условиях, может обеспечить требуемое качество полученных результатов. Для этого предполагается использовать метод определения деформаций в металлоконструкциях рабочего оборудования, основанный на электротензометрии, измерении малых деформаций с помощью тензорезисторов, установленных в характерных точках.

**Для цитирования:** Набиуллин Р.Ш. Подготовка к планированию эксперимента на основе математической модели функционирования рабочего оборудования карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 6 (158). – С. 44-48 – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-44-48

### **Актуальность**

Гидравлический экскаватор есть техническая система. Рабочее оборудование карьерного экскаватора (стрела, рукоять и ковш) с главными механизмами (механизмы поворота стрелы, поворота рукояти и поворота ковша) является базовым элементом этой системы. Для упрощения анализа технической системы целесообразно использовать ее блочно-иерархическое представление, когда на определенном иерархическом уровне используется своя математическая модель.

### **Цель исследования**

Анализ математической модели функционирования рабочего оборудования карьерного экскаватора и выявление возможностей повышения ее точности и универсальности применения.

### **Задачи исследования**

- Определение метода создания главной математической модели функционирования рабочего оборудования карьерного экскаватора;

- Определение вида и схемы эксперимента с учетом требований точности и универсальности к математической модели;

### **Решение задач исследования**

Наиболее крупными и часто используемыми при анализе технических систем иерархическими уровнями являются уровни, которые принято называть микроуровень (уровень В), макроуровень (уровень Б), метауровень (уровень А).

В нашем случае, когда объектом исследования является рабочее оборудование гидравлического экскаватора, интерес представляют уровни В и Б, так как системам уровня А соответствуют сложные устройства и комплексы.

Элементами микроуровня являются, например, деформации, напряжения в элементах отдельных узлов, несущих конструкций и т.д. В качестве внутренних параметров рассматриваются геометрические размеры элементарных участков, их упругие и прочностные характеристики. Выходные параметры: деформации (напряжения), перемещения (усилия). Типичными математическими моделями данного уровня являются дифференциальные уравнения в частных производных.

На макроуровне в качестве элементов рассматриваются объекты, которые на микроуровне рассматривались как системы (скажем, оси, валы, подшипники, элементы металлоконструкций и т.п.). Параметры этих элементов, будучи на микроуровне выходными (напряжения, усилия и т.д.), на этом уровне становятся внутренними. Здесь в качестве выходных параметров рассматриваются усилия, моменты, скорости в механических системах; потоки, давления в гидравлических системах и т.д.

Такой принцип позволил провести теоретические исследования и выявить закономерности формирования нагрузок на рабочем оборудовании гидравлического экскаватора и получить математическую модель функционирования главных механизмов рабочего оборудования (механизмы поворота стрелы, поворота рукояти и поворота ковша) гидравлического экскаватора, которая позволяет определять нагрузки с учетом параметров конструктивных схем и вида динамических передаточных функций рычажно-гидравлических механизмов, это позволяет выявить дополнительные резервы для повышения надежности и эффективности функционирования рабочего оборудования гидравлических экскаваторов.

В основе полученной математической модели лежит выражение для кинематической передаточной функции рычажно-гидравлических механизмов, которое имеет вид [1]:

$$\Phi_v = \frac{V_{\text{вых.зв.}}}{V_{\text{шт}}} = f(l_i, \alpha_i, X_{\text{вых.зв.}}, Y_{\text{вых.зв.}}), \quad (1)$$

где  $V_{\text{вых.зв.}}$  – скорость движения характерной точки выходного звена (стрела, рукоять, ковш);  $V_{\text{шт}}$  – скорость движения штока;  $l_i$  – размеры (длины) звеньев механизмов (поворота стрелы, поворота рукояти, поворота ковша);  $\alpha_i$  – угловые расстояния между звеньями;  $X_{\text{вых.зв.}}$  и  $Y_{\text{вых.зв.}}$  – координаты характерной точки выходного звена.

Взаимодействие элементов рабочего оборудования гидравлических экскаваторов направлено на формирование необходимого усилия на режущей кромке ковша. Таким образом, главным (копающим) механизмом гидравлического экскаватора, формирующим данное усилие, является механизм поворота ковша, а усилия на режущей кромке ковша  $F_k$  определяются силовой передаточной функцией механизма поворота ковша, которая представляет собой соотношение между силовыми параметрами, реализуемыми на выходном и ведущем звеньях механизмов и имеет следующий вид:

$$\Phi_{F_{\text{цк}}} = \frac{F_k}{F_{\text{цк}}}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{цк}}$  – сила, действующая на штоке гидроцилиндра механизма поворота ковша;  $F_k$  – сила, действующая на режущей кромке (зубьях) ковша.

Для механизмов поворота стрелы и рукояти силовые передаточные функции имеют вид

$$\Phi_{M_{\text{цр}}} = \frac{M_p}{F_{\text{цр}}}, \quad (3)$$

$$\Phi_{M_{\text{цс}}} = \frac{M_c}{F_{\text{цс}}}, \quad (4)$$

где  $F_{\text{цр}}$ ,  $F_{\text{цс}}$  – силы, действующие на штоках гидроцилиндров механизмов поворота рукояти и стрелы;  $M_p$ ,  $M_c$  – вращающие моменты сил  $F_{\text{цр}}$  и  $F_{\text{цс}}$  относительно осей вращения рукояти и стрелы.

Предложенная математическая модель (1-4) получена с помощью теоретических методов, основанных на использовании физических закономерностей. Основу модели составляют уравнения, решением которых являются зависимости между переменными, определяющими функционирование механизмов рабочего оборудования. Однако данный метод не может помочь в полной мере оценить нагрузки, формирующиеся на элементах рабочего оборудования экскаватора, так как процесс работы главных механизмов рабочего оборудования связан со взаимодействием зубьев ковша экскаватора с горными породами и влиянием на процесс множества неконтролируемых факторов, поэтому для оценки точности полученной математической модели необходимо использовать экспериментальные методы, основанные на результатах, полученных при исследовании объекта в реальных условиях. В результате после проведения специальной математической обработки будут получены зависимости между параметрами и фазовыми переменными главных механизмов рабочего оборудования экскаватора.

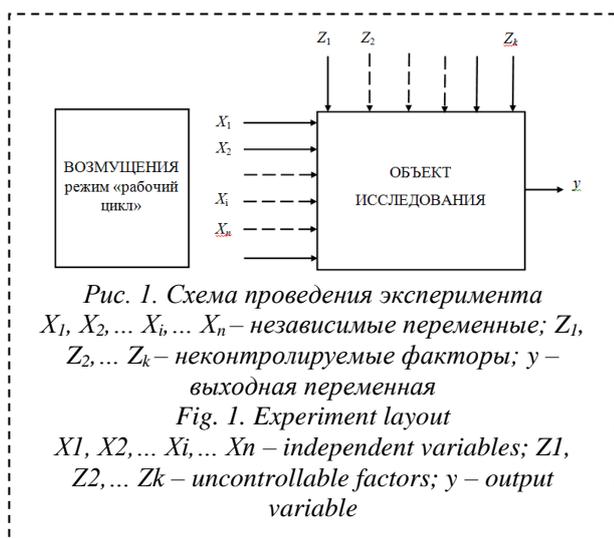
Процесс экскавации горной породы зависит от качества подготовки забоя, физико-механических свойств горной массы, паспорта ведения работ в забое, времени года, от общей организации работ на предприятии, от квалификации обслуживающего персонала, времени суток, степени износа экскаватора и его исполнительного органа и т.д. Все эти укрупненные факторы различаются по своей природе и, конечно же, влияют друг на друга. При изучении плохо организованных систем к нам на помощь приходит теория планирования эксперимента [2, 3, 4].

Математическая теория планирования эксперимента позволяет максимально правильно поставить эксперимент и при меньших затратах получить необходимую информацию.

Несмотря на сложность реализации в промышленных условиях, целесообразно прибегнуть к помощи активного эксперимента, который может обеспечить требуемое качество полученных результатов.

#### Экспериментальные исследования

При активном эксперименте в объект исследования по определенному режиму вводятся возмущения (рисунок 1).



Необходим режим «рабочий цикл», т.е. нужно осуществить  $100 \pm 10$  рабочих циклов экскавации с погрузкой в большегрузные самосвалы. Работа экскаватора в данном режиме должна соответствовать обычной практике экскавации породы в «среднестатистическом» забое [5, 6].

В этом режиме набирается статистика по нагруженности металлоконструкций рабочего оборудования в реальном цикле экскавации.

При этом важно обеспечить активную работу главных механизмов рабочего оборудования в крайних положениях в пределах всей рабочей зоны экскаватора, так как установлено, что скорости ведомых звеньев и усилия, действующие на ведомых звеньях, а также механические характеристики рычажных механизмов в целом изменяются в широком диапазоне в течение рабочего хода и зависят от относительных положений звеньев механизмов. При этом механические характеристики некоторых механизмов не соответствуют закономерностям изменения внешних нагрузок [7, 8]. Так, в механизме поворота ковша усилия на режущей кромке ковша возрастают при выдвигении штока гидроцилиндра примерно на половину рабочего хода, а затем уменьшаются. Следовательно, механическая характеристика рассматриваемого механизма поворота ковша не обеспечивает соответствия между значениями силовых параметров, реализуемых на ковше, и режимом нагружения механизма, характеризующимся ростом величины внешних нагрузок в процессе копания.

При постановке эксперимента важно обратить внимание на возможность того, что наряду с независимыми переменными  $X_1, \dots, X_n$  на результат эксперимента могут оказать влияние не регистрируемые, но случайно изменяющиеся переменные  $Z$  (рис. 1). Также может оказаться, что переменные  $Z_i, \dots, Z_k$  сильно коррелированы (взаимосвязаны) с переменными  $X_i$ , и тогда все оценки (если даже они получены на научно обоснованных методах) окажутся смещенными [9]. Такое часто возможно в исследованиях, когда результат во многом зависит от оператора т.к. нагрузка на рабочее оборудование экскаватора может сильно изменяться на фоне эмоционального состояния оператора и его манеры

управления. Для исключения смещения оценок необходимо рандомизировать эксперимент относительно контролируемых условий, т.е. сделать случайными те факторы, которые трудно поддаются учету и контролю, тогда их можно будет рассматривать как случайные величины и, следовательно, учитывать статистически [10].

Для экспериментального определения нагруженности рабочего оборудования предполагается использовать метод определения деформаций в металлоконструкциях рабочего оборудования, основанный на электротензометрии, измерении малых деформаций с помощью тензорезисторов, установленных в характерных точках и последующем переходе от деформаций к напряжениям, пользуясь законом Гука.

В качестве основных преимуществ метода электротензометрии можно отметить следующие:

- возможность дистанционного проведения измерений;
- точность измерений, которая достигается за счет безынерционности аппаратуры, что особенно важно при динамических испытаниях;
- небольшие размеры и простота закрепления тензодатчиков к деталям;
- возможность регистрации быстроизменяющихся процессов;
- возможность одновременного контроля нескольких точек измерения с одного пульта, что позволяет многосторонне исследовать напряженное состояние конструкции.

Для повышения эффективности измерений метод электротензометрии необходимо использовать в сочетании с таким методом неразрушающего контроля, как метод магнитной памяти металлов [11]. В экспериментальном исследовании метод магнитной памяти металлов можно использовать для предварительного установления зон концентрации напряжений в металлоконструкциях элементов рабочего оборудования экскаватора с последующим размещением в этих зонах тензодатчиков для количественного определения деформаций.

Элементы рабочего оборудования (стрела, рукоять) представляют собой сварные металлоконструкции коробчатого сечения, изготовленные из листовой высокопрочной стали. Данные конструкции в характерных точках находятся преимущественно в плоском напряженном состоянии.

Известно, что плоское напряженное состояние в каждой точке характеризуется тремя параметрами – это либо три компоненты тензора напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ , либо главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2$  и угол  $\alpha$ , определяющий ориентацию главных осей. Поэтому очевидно, что для полного описания плоского напряженного состояния необходимы как минимум три независимых измерения при различных ориентациях тензодатчиков. При экспериментальном решении подобной задачи используют трехэлементные «розетки» тензорезисторов – группу тензодатчиков, расположенных на единой подложке и определенным образом ориентированных относительно друг друга [12, 13].

Тензодатчики не могут передавать деформации сдвига, поэтому в характерных точках с помощью прямоугольных трехэлементных тензорозеток измеряются линейные деформации  $\varepsilon_\alpha$ ,  $\varepsilon_\beta$  и  $\varepsilon_\gamma$ .

Из решения системы уравнений, описывающих связь деформаций при повороте осей, находят искомые деформации  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\gamma_{xy}$

$$\begin{cases} \varepsilon_\alpha = \varepsilon_x \cos^2 \alpha + \varepsilon_y \sin^2 \alpha + \gamma_{xy} \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ \varepsilon_\beta = \varepsilon_x \cos^2 \beta + \varepsilon_y \sin^2 \beta + \gamma_{xy} \cos \beta \cdot \sin \beta \\ \varepsilon_\gamma = \varepsilon_x \cos^2 \gamma + \varepsilon_y \sin^2 \gamma + \gamma_{xy} \cos \gamma \cdot \sin \gamma \end{cases} \quad (5)$$

#### Выводы

В результате проведенного анализа установлено, что математическая модель, основанная на теоретических методах исследования, не позволяет в полной мере оценить нагрузки, формирующиеся на элементах рабочего оборудования экскаватора, так как процесс работы главных механизмов рабочего оборудования связан со взаимодействием зубьев ковша экскаватора с горными породами и влиянием на процесс множества неконтролируемых факторов.

Для повышения точности и универсальности применения полученной математической модели необходимо применить экспериментальное исследование с использованием метода электротензометрии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссаров А.П., Шестаков В.С., Набиуллин Р.Ш. Разработка цифровой модели рабочего процесса гидравлического экскаватора // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека» – Екатеринбург: УГГУ, 2020. – С. 242-247.
2. Комиссаров А.П., Шестаков В.С. Имитационная модель функционирования рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2013. – № 8. – С. 20-24.
3. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Взаимосвязи конструктивных и режимных

параметров гидрофицированного рабочего оборудования экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2014. – № 11. – С. 9-14.

4. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Набиуллин Р.Ш., Лукашук О.А. Цифровизация в горном машиностроении // Горное оборудование и электромеханика. – doi:10.26730/1816-4528-2020-5-34-38, №5, 2020. – с. 34-38.

5. Awuah-Offei K. Energy efficiency in the Minerals Industry: Best Practices and Research Directions, Springer, 2017. – 333 p.

6. Geu Flores F., Kecskemethy A., Pottker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers. 12th IFToMM World Congress, Besancon, June 18-21, 2017. – 6 pp.

7. Le Q.H., Jeong Y.M., Nguyen C.T., Yang S.Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and Sim Hydraulic // Journal of Drive and Control. 2018. Vol. 10 Iss. 1. P. 29-36.

8. 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, 2017. P. 716-719.

9. Stefanov Goce, KaradzinovLjupco. Гидравлический экскаватор. Control and data log of functions for protection in hydraulic excavator. Докл. Българ. АН. 2019. 63, № 6, с. 909-916.

10. 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.

11. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. Москва: ЗАО «Тиссо», 2004. 424 с.

12. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Интеллектуализация карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 11. С. 107-115.

13. 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.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-44-48

**Rustem Sh. Nabiullin**, С . Sc. in Engineering, assistant professor

Ural State Mining University, 620144, Russia, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30

E-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru

#### PREPARATION FOR PLANNING AN EXPERIMENT BASED ON A MATHEMATICAL MODEL OF OPERATING EQUIPMENT OF A MINING EXCAVATOR



#### Article info

Received:  
13 November 2021

Revised:  
30 November 2021

Accepted:  
03 December 2021

**Keywords:** lever-hydraulic mechanism, working equipment of a hydraulic excavator, transfer functions, experiment planning.

#### Abstract.

The work presents a mathematical model of the functioning of the main mechanisms of the working equipment of a hydraulic excavator, obtained as a result of theoretical research, namely, identifying the patterns of the formation of loads on the working equipment of a hydraulic excavator. However, this method cannot help to fully assess the magnitude of the loads arising in the drive mechanisms (boom rotation, handle rotation and bucket rotation) of the excavator working equipment, since the process of these mechanisms is associated with the interaction of the excavator bucket teeth with rocks and should be considered, as a complex, poorly organized system. Since the characteristics of this process are determined by many uncontrollable factors that are not taken into account in the proposed model. Therefore, to assess the accuracy of the obtained mathematical model, it is necessary to use experimental methods based on the results obtained in the study of the object in real conditions. When determining the loads arising in the working equipment, it is advisable to resort to the help of an active experiment, which, despite the complexity of implementation in an industrial environment, can provide the required quality of the results obtained. For this, it is proposed to use a method for determining deformations in metal structures of working equipment, based on electric strain gauge, measuring small deformations using strain gauges installed at characteristic points.

**For citation** R.Sh. Nabiullin Preparation for planning an experiment based on a mathematical model of operating equipment of a mining excavator. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.6 (158), pp. 44-48. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-44-48

#### REFERENCES

1. Komissarov A.P., Shestakov V.S., Nabiullin R.Sh. Razrabotka cifrovoj modeli rabocheho processa gidravlicheskogo ekskavatora // Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti: sbornik trudov XVIII mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Chteniya pamyati V.R. Kubacheka» – Ekaterinburg: UGGU, 2020.S. 242-247.
2. Komissarov A.P., Shestakov V.S. Imitacionnaya model' funkcionirovaniya rabocheho oborudovaniya gidravlicheskogo ekskavatora // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2013. № 8. – S. 20-24.
3. Komissarov A. P., Lagunova YU. A., SHestakov V. S. Vzaimosvyazi konstruktivnyh i rezhimnyh parametrov gidroficiovannogo rabocheho oborudovaniya ekskavatorov // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2014. № 11. S. 9-14.
4. Komissarov A.P., Lagunova YU.A., Nabiullin R.SH., Lukashuk O.A. Cifrovizaciya v gornom mashinostroenii // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – doi:10.26730/1816-4528-2020-5-34-38, №5,2020. S. 34-38.
5. Awuah-Offei K. Energy efficiency in the Minerals Industry: Best Practices and Research Directions, Springer, 2017. 333 p.
6. Geu Flores F., Kecskemethy A., Pottker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers. 12th IFToMM World Congress, Besancon, June 18-21, 2017. – 6 pp.
7. Le Q.H., Jeong Y.M., Nguyen C.T., Yang S.Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic // Journal of Drive and Control. 2018. Vol. 10 Iss. 1. P. 29-36.
8. 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, 2017. P. 716-719.
9. Stefanov Goce, Karadzinov Ljupco. Gidravlicheskij ekskavator. Control and data log of functions for protection in hydraulic excavator. Dokl. B"lg. AN. 2019. 63, № 6, s. 909-916.
10. 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.
11. Vlasov V.T., Dubov A.A. Fizicheskie osnovy metoda magnitnoj pamyati metalla. Moskva: ZAO «Tisso», 2004. 424 s.
12. Malafeev S.I., Tihonov Yu.V. Intellektualizaciya kar'ernogo ekskavatora // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2015. № 11. S. 107-115.
13. 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.