ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):229–238
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.271.4:681.518.2 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_229

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ПОРОДЫ В КОВШЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

П. А. Осипов

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Повышение производительности и энергоэффективности электрических одноковшовых экскаваторов связано с измерением основного показателя работы экскаватора – массы горной породы в ковше. В статье выполнен аналитический обзор исследований отечественных и зарубежных авторов в области измерения массы породы в ковше и промышленных серийных информационно-диагностических систем электрических карьерных экскаваторов и драглайнов с целью определения перспективного направления исследований. Технические решения измерения массы породы в ковше классифицированы на прямые и косвенные по методу измерения усилий в рабочем оборудовании. Показано, что прямое измерение усилий в рабочем оборудовании выполняется тензометрическим датчиком усилия в подъёмном канате, а косвенное – по сигналам главных электроприводов. Приведены основные характеристики и показатели точности методов измерения массы породы в ковше и промышленных серийных информационно-диагностических систем. В результате установлено: недостаточное количество работ по косвенному измерению массы породы в ковше для экскаваторов с главными электроприводами переменного тока; актуальна разработка стандартного критерия определения погрешности канала измерения массы породы в ковше экскаватора и методики поверки измерительного канала; целесообразно осуществлять оценку погрешности систем измерения с использованием экспериментальных исследований методом имитации рабочих операций с контрольными грузами и указывать доверительный интервал, для которого приведена погрешность системы измерения; перспективным направлением в области разработки новых методов следует считать интеллектуальные системы на основе фильтров Калмана и статистических методов обработки результатов измерений массы породы в ковше, а также усилий в рабочем оборудовании.

Ключевые слова: одноковшовый экскаватор, карьерный экскаватор, шагающий экскаватор, масса породы, усилие в рабочем оборудовании, прямое измерение, косвенное измерение, тензодатчик, главные электроприводы, информационно-диагностическая система.

Для цитирования: *Осипов П. А.* Обзор технических решений измерения массы породы в ковше электрических одноковшовых экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 229–238. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_229.

The technical solutions overview for rock mass measuring in the electric single-bucket excavators dipper

P. A. Osipov

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

© П. А. Осипов. 2021

Abstract: The productivity improving and energy efficiency of electric single-bucket excavators is associated with measuring the main indicator of excavator performance - the rock mass in the bucket. The article provides an analytical review of studies by domestic and foreign authors in the field of measuring the rock mass in the bucket and industrial serial information and diagnostic systems of the power shovels and draglines in order to determine a promising direction of research. The technical solutions for measuring the rock mass in the bucket are classified according to the method of measuring the forces in the working equipment into direct and indirect. It is shown that the direct measurement of the forces in the working equipment is performed by a strain gauge force sensor in the hoisting rope, and the indirect measurement is performed by the main electric drives signals. The main characteristics and accuracy indicators of methods for measuring the rock mass in the bucket and industrial serial information and diagnostic systems are presented. The study found that the: an insufficient amount of work on indirect measurement of the rock mass in a bucket for excavators with main AC drives; the development of a standard criterion for determining the error of the channel for measuring the rock mass in an excavator bucket and a method for verifying the measuring channel is relevant; it is advisable to assess the error of measurement systems using experimental studies by the method of simulating work operations with test weights and indicate the confidence interval for which the error of the measurement system is given; Intelligent systems based on Kalman filters and statistical methods for processing the results of measurements of rock mass in a bucket and efforts in working equipment should be considered a promising direction in the development of new methods.

Key words: electric single-bucket excavator, electric rope shovels, dragline, rock mass, forces in working equipment, direct measurement, indirect measurement, strain gauge, main electric drives, information-and-diagnostic system, dipper payload estimation.

For citation: Osipov P. A. The technical solutions overview for rock mass measuring in the electric single-bucket excavators dipper. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):229–238. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_229.

Введение

Общемировой рост потребления и добычи основных полезных ископаемых обусловливается динамикой энергопотребления, развитием металлургии и экономики. Прирост потребления угля в России по сравнению с 2008 годом составил 35%, в основном за счёт открытого способа добычи. Горнодобывающие предприятия России ведут разработку более 75% месторождений открытым способом с использованием карьерных и шагающих экскаваторов [1].

Экскаваторное оборудование отрасли отличается высоким физическим износом, свыше 60%, и нуждается в модернизации или замене. С увеличением добычи полезных ископаемых возникает необходимость увеличить производительность и энергоэффективность основных производственных средств горнодобывающих предприятий — одноковшовых экскаваторов.

Повысить производительность и энергоэффективность одноковшового экскаватора возможно путем организации в реальном времени обратной связи между машинистом и процессом экскавации. С этой целью экскаваторы оснащаются информационно-диагностической системой (ИДС), одним из основных показателей в которой является масса горной породы в ковше. Измерение массы породы в ковше одноковшового экскаватора основано на вычислении усилий в рабочем оборудовании. Для использования значений массы породы в ковше в ИДС необходимо решить задачи распознавания технологических операций и элементов рабочего цикла экскаватора, начала и окончания погрузки транспортного средства [2]. В данной работе рассма-

триваются методы вычисления массы породы в ковше на основе прямого и косвенного измерения усилий в рабочем оборудовании. Целью настоящей статьи является аналитический обзор исследований в области измерения массы породы в ковше одноковшовых экскаваторов и промышленных серийных ИДС для определения перспективного направления исследований.

Методы измерения массы породы в ковше одноковшового экскаватора на основе измерения усилий в рабочем оборудовании

Усилия в рабочем оборудовании вычисляются прямыми или косвенными методами. Прямые методы основаны на использовании тензометрических датчиков усилия в подъёмном канате [3—6]. Прямое измерение усилия в канате позволяет избавиться от необходимости учитывать коэффициенты полезного действия механических передач и параметры электроприводов главных механизмов, но требует установки тензометрических датчиков на ось головного блока стрелы и учета геометрии рабочего оборудования. Тензометрические датчики усилия требуют калибровки на многотонном гидравлическом прессе и обладают диапазоном измерения усилия, учитывающим ударные нагрузки при копании и, следовательно, пониженной точностью в диапазоне нагрузок, создаваемых массой горной породы в ковше при транспортировке ковша на разгрузку. В итоге прямые методы измерения предполагают наличие дополнительных датчиков, калибровку и учет геометрии рабочего оборудовании для выделения составляющей массы породы в ковше.

Коллектив зарубежных авторов D. Wauge, J. J. Slob под руководством профессора P. R. McAree из университета Квинсленда развивают в работах прямые методы измерения усилий в рабочем оборудовании [3, 4]. Работа J. J. Slob [4] является развитием диссертации D. Wauge [3], в которой погрешность метода измерения была снижена с ±20% до ±2%. Предложена оригинальная схема адаптивного оценивания нескольких моделей на основе параллельных фильтров Калмана и вычисление условной вероятности разных масс полезной нагрузки относительно реальной полезной нагрузки [6]. Исследовано влияние на показания тензометрического датчика температуры калибровки и окружающей среды, а также предложено изучить влияние усталости материалов оси и тензодатчика. Однако в работах используются существенные допущения, что угол наклона стрелы фиксированный, подъемный канат не имеет массы, а подвесной трос стрелы и подъемный канат нерастяжимы.

Косвенные методы определяют усилие в рабочем оборудовании посредством сигналов электроприводов, как правило, получаемых с использованием имеющихся датчиков системы управления электроприводом. Косвенные методы отличаются сложностью вычислительных алгоритмов и различными подходами к учёту параметров механических передач, электроприводов, геометрии рабочего оборудования, вычислению электромагнитного момента привода и выделению статической составляющей момента сопротивления, обусловленной массой горной породы в ковше.

Известны способы измерения массы грунта в ковше шагающего экскаватора, основанные на использовании тока якоря двигателя подъема и выделения статического усилия посредством решения основного уравнения динамики [7, 8]. В отличие от анало-

говой системы [7] способ реализован в микропроцессорном устройстве взвешивания [8] и основан на уравнениях:

$$F_{КГ} = k_1 \cdot \left(I_П - k_2 \frac{d\omega_П}{dt} \right);$$

$$m_Г = k(\rho, l) \cdot (F_{КГ} - F_К),$$

где $I_П$ — ток цепи якоря электропривода подъема; $\omega_П$ — угловая скорость двигателя подъема; k_1 , k_2 — коэффициенты пропорциональности; $F_{КГ}$, $F_К$ — статические усилия в подъемном канате при перемещении ковша с грунтом и при порожнем ковше и тех же координатах рабочего оборудования; $m_Г$ — оценка массы грунта в ковше экскаватора; $k(\rho, l)$ — нелинейный коэффициент положения ковша в плоскости стрелы; ρ, l — вылет рукояти и длина подъемного каната. Испытания на экскаваторе ЭШ 20.90 показали погрешность взвешивания ковша не более 2,5%.

Известен способ, основанный на разности статических усилий в подъемном и тяговом канате [9], определяемой как:

$$m_Г = k(\varphi_П, \varphi_Т) \cdot (F_П - F_Т),$$

где $F_П$, $F_Т$ — статические усилия в подъемном и тяговом канатах; $k(\varphi_П, \varphi_Т)$ — нелинейный коэффициент; $\varphi_П$, $\varphi_Т$ — углы между подъемным и тяговым канатом и осью стрелы. Нелинейный коэффициент принимается постоянным, и позиционирование ковша в плоскости стрелы определяется по отношению к усилиям в подъемном и тяговом канатах.

В работе [10] предложена регрессионная модель зависимости массы породы в ковше от натяжения, длины подъемного каната и вылета рукояти:

$$m_Г = B_1 + \sum_{i=1}^{2} B_{1+1} S^1 + \sum_{i=1}^{2} B_{3+1} \rho^1 +$$

$$+ \sum_{i=1}^{2} B_{5+1} l^1 + B_8 S\rho + B_9 l\rho + B_{10} Sl,$$

где S — натяжение подъемного каната; ρ, l — вылет рукояти и длина подъемного каната; $B_1 \ldots B_{10}$ — постоянные коэффициенты. Средняя квадратичная ошибка оценки массы горной породы в ковше с использованием регрессионной модели не превышает 3,5%.

В работе [11] предложен способ вычисления массы породы в ковше карьерных и шагающих экскаваторов на основе усилия в подъемном канате с учетом геометрии рабочего оборудования:

$$G_{ГР}\left(I_П, I_{Н(Т)}\right) = k_1\left(I_П, I_{Н(Т)}\right) \cdot$$

$$\cdot F_П - Q_{Р\,0}\left(I_П, I_{Н(Т)}\right),$$

где $F_П$ — усилие в подъемном канате; $G_{ГР}$ — вес горной породы в ковше; $l_П$, $l_{Н(Т)}$ — длина подъемного каната и вылета рукояти (длина тягового каната); $Q_{Р0}$ — вес рабочего оборудования. Недостатком данного метода является применение только при ограничении изменения фазовых координат привода подъема.

В работах А. Л. Карякина [2, 12] содержится решение комплекса задач для создания ИДС одноковшовых экскаваторов. В частности, предложен оригинальный способ [12] выделения статического тока электропривода подъема, составлены уравнения для измерения составляющей массы горной породы в ковше с учетом геометрии рабочего оборудования. Данные алгоритмы измерения массы горной породы использованы при создании информационно-измерительных систем экскаваторов ЭШ 20.90, ЭШ 25.90 (Монголия), ЭШ 40.85, ЭШ 100.100, ЭКГ-12, ЭКГ-5А. Под руководством А. Л. Карякина выполнено развитие расчётных схем механических нагрузок одноковшовых экскаваторов в различных системах координат в векторно-матричной форме с учётом наклона ходовой тележки

Таблица 1

Классификация промышленных серийных ИДС по методу измерения усилий в рабочем оборудовании экскаватора

Classification of series-manufactured information-and-diagnostic systems by the method of measuring forces in the excavator working equipment

Метод измерения усилия в рабочем оборудовании			**Промышленные серийные системы**	
Датчики	**Достоинства**	**Недостатки**	**Название и производитель**	**Погрешность измерения**
Прямой метод измерения усилий				
Тензодатчик усилия в подъёмном канате на оси головного блока стрелы	Нет необходимости учитывать коэффициенты полезного действия механических передач	Дополнительные датчики на рабочем оборудовании, ударные нагрузки процесса копания на датчики, учет геометрии рабочего оборудования	Payload Plus (P&H Mining Equipment Inc.)	Погрешность до 2% на автосамосвал по показаниям наземных автомобильных весов
Косвенный метод измерения усилий				
Системы управления электроприводом подъёма	Отсутствуют дополнительные датчики, высокая надёжность	Учёт геометрии рабочего оборудования, механических передач, электрического привода, сложность вычислительных алгоритмов	Payload (P&H Mining Equipment Inc.)	Погрешность до 2% на автосамосвал по показаниям наземных автомобильных весов
			AccuLoad (Caterpillar Inc.)	Погрешность ±4% для более чем 90% циклов погрузок
Комбинация прямого или косвенного метода измерения усилий				
Основной тензодатчик усилия в подъёмном канате на оси головного блока стрелы или в качестве резервного система управления электроприводом подъёма	Высокая надежность и точность измерения	Сложность системы	Payload 2 (P&H Mining Equipment Inc.)	Погрешность системы Payload-2 в пределах 5% от диапазона измерения массы породы в ковше

экскаватора [13] и измерения координат электроприводов переменного тока [14, 15].

Зарубежным автором Abdol Rasul Rasuli предложена система измерения массы породы в ковше карьерного экскаватора P&H 2100 с электроприводом постоянного тока на основе косвенного измерения усилий в рабочем оборудовании с использованием собственных датчиков [16]. Отличительной особенностью данной системы является независимость от сигналов из системы управления электроприводом и наличие нестандартного набора датчиков: датчики Холла токов якоря и возбуждения двигателей подъёма и напора, лазерный дальномер вылета рукояти, акселерометры, магнитометры, инклинометры для определения угла наклона стрелы и рукояти. Погрешность измерения массы породы ковше составила менее 2% с оценкой по показаниям автомобильных весов.

Промышленные серийные системы измерения массы породы в ковше одноковшовых экскаваторов

Промышленные серийные ИДС мировых производителей одноковшовых экскаваторов возможно классифицировать по методу вычисления усилий в рабочем оборудовании (табл. 1).

Компания P&H Mining Equipment Inc. (США) является мировым лидером по производству карьерных и шагающих экскаваторов [1] и предлагает в составе ИДС Centurion:

— косвенный метод измерения массы горной породы в ковше посредством сигналов электропривода подъема (система Payload) [5];

— прямой метод измерения массы горной породы в ковше на основе измерения усилия в подъемном канате тензометрическими датчиками на оси головного блока стрелы (система Payload Plus) [17].

Система Payload на основе косвенного метода измерения позиционируется компанией P&H как начальный вариант системы измерения массы породы в ковше или дублирующей системы в случае выхода из строя системы Payload Plus с прямым методом измерения. Система Payload использует сигналы датчиков системы управления электроприводов, не требует установки дополнительных датчиков, состоит из дополнительного промышленного контроллера, поэтому легко устанавливается, калибруется и модернизируется.

В системе Payload Plus используется прямой метод измерения усилия в подъемном канате с помощью тензодатчиков на оси головного блока стрелы. Данная система позволяет рассчитывать усилия в подъёмном канате непрерывно, даже при наложении механического тормоза на привод подъёма, когда система косвенного измерения Payload выдаёт ошибочный нулевой результат из-за отсутствия тока нагрузки в приводе подъёма. Тензодатчик расположен внутри оси головного блока, калибруется производителем по стандартам NIST Национального института стандартов и технологий министерства торговли США и не требует калибровки в процессе эксплуатации. Благодаря стандартизации средства измерения система Payload Plus может организовывать коммерческий или технический учет массы горной породы. В системе Payload Plus используется отношение для вычисления массы породы в ковше с учетом геометрии рабочего оборудования с погрешностью до 2% на автосамосвал по показаниям наземных автомобильных весов [5]:

$$W_s = \frac{T_y \cdot L_{bx} + T_x \cdot L_{by} - W_h \cdot L_{hx}}{L_{bx}} - W_d,$$

где T_x , T_y — проекции усилия в подъемном канате на оси *x* и *y* ортогональной системы координат; W_s , W_d , W_h — вес горной породы в ковше, порожнего ковша и рукояти; L_{bx} — проекция на ось *x* длины рукояти от точки опирания на кремальерную шестерню до точки крепления коромысла к ковшу; L_{by} — проекция на ось *y* расстояния от точки опирания рукояти на кремальерную шестерню до точки крепления коромысла к ковшу; L_{hx} — проекция на ось *x* длины рукояти от точки опирания на кремальерную шестерню до центра тяжести рукояти.

Сигнал силы натяжения в канате от тензометрического датчика системы Payload Plus имеет гладкую форму и меньше выбросов значений, чем сигнал тока якоря электропривода подъёма ковша системы Payload, и в данном случае предпочтительнее для вычисления массы породы в ковше [5].

В настоящее время компания P&H на новых экскаваторах предлагает систему измерения массы породы в ковше Payload 2 [17], которая сочетает в себе прямой и косвенный методы измерения. В качестве основного метода используется прямое измерение усилия в канате с помощью тензодатчика, а в случае выхода из строя основной системы применяется резервный метод косвенного измерения по сигналам электроприводов. Погрешность измерения массы породы в ковше системы Payload 2 составляет 5% от максимального значения шкалы измерения.

Компания Caterpillar Inc. (США, приобрела производителя карьерных и шагающих экскаваторов Bucyrus-Erie) разработала систему измерения массы породы в ковше карьерных и шагающих экскаваторов AccuLoad с косвенным методом вычисления нагрузок в рабочем оборудовании по сигналам электропривода подъема. Погрешность измерения массы горной породы в ковше системой AccuLoad составляет ±4% для более чем 90% циклов погрузок, что считается лучшим показателем в отрасли [18].

Заключение

Одной из основных задач разработки систем и методов измерения массы горной породы в ковше является оценка погрешности измерения горной массы на основе многократных измерений. Такая постановка задачи связана с тем, что при перемещении ковша выполняется не одно, а серия измерений. По этой причине возникает задача статистической обработки серии измеренных значений масс. Как правило, значение массы вычисляется по функции нескольких переменных, что требует доказательства независимости этих переменных и нормальности закона распределения случайной погрешности измерения каждой величины. Поскольку каждое измерение в серии выполняется с разной погрешностью, возникает задача определения средне-квадратичной погрешности серии измерений. В работах не представлены схемы проведения опытов по определению точности измерения массы породы в ковше и используются различные показатели точности, такие как загрузка транспортного средства по автомобильным весам или маркшейдерский замер отвалов.

В результате обзора известных работ в области измерения массы породы в ковше одноковшовых экскаваторов установлено:

1) недостаточное количество работ по косвенному измерению массы породы в ковше для экскаваторов с электроприводом переменного тока;

2) перспективным направлением в области разработки новых методов сле-

дует считать интеллектуальные системы на основе фильтров Калмана и статистических методов обработки результатов измерений массы породы в ковше и усилий в рабочем оборудовании;

3) актуальна разработка стандартного критерия определения погрешности канала измерения массы породы в ковше экскаватора и методики поверки измерительного канала;

4) целесообразно оценивать погрешности систем измерения с использованием экспериментальных исследований методом имитации рабочих операций с контрольными грузами [14, 15] и указывать доверительный интервал, для которого приведена погрешность системы измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Подэрни Р. Ю.* Мировой рынок поставок современного выемочно-погрузочного оборудования для открытых горных работ // ГИАБ. 2015. №2.
2. *Карякин А. Л.* Режимы работы, оптимизация и управление электромеханическими комплексами главных приводов одноковшовых экскаваторов: дисс. докт. техн. наук: 05.09.03. Екатеринбург, 2005. 276 с.
3. *Wauge D.*. Payload Estimation for Electric Mining Shovels: PhD Thesis. Mechanical Engineering, the University of Queensland, Australia, 2008, 246 p.
4. *Slob J. J.*, *McAree P. R.*, *Steinbuch M.* and *Siegrist P. M.* Payload Estimation for Electric Mining Shovels using a Load Sensing Pin: Traineeship report, Eindhoven University of Technology, 2007, 51 p.
5. Kalin C, Seibold J, *Miller P.* P&H Centurion System // Официальный сайт Western Mining Electrical Association [электронный ресурс] — режим доступа: https://wmea.net/product/june-2006-salt-lake-city-utah (дата обращения: 11.10.2021)
6. Peter Ross Mcaree, Pinjarra Hills, David Herman Wauge. Patent US 8,311,970 B2, 13.11.2012. Payload Estimation of Weight Bearng Machinery Using Multiple Model Adaptive Estmator System and Method.
7. *Хатагов А. Ч.*, *Кибизов К. В.*, *Бидеев Г. А.* Устройство непрерывного измерения загрузки ковша одноковшового экскаватора. Пат. А. С. 594262 СССР, МКИ: E02F9/20. — N 2328536/29—03; Заявл. 24.02.76: Опубл. 25.02.78; Бюл. N 7/ — 3 с
8. *Борисов А. М.*, *Беглецов Б. Н.* Микропроцессорное устройство взвешивания грунта в ковше экскаватора-драглайна // Тезисы докладов «IV Всесоюзная научно-техническая конференция по электроприводу экскаваторов». М.: Информэлектро, 1989. С. 13—14.
9. *Залесов О. А.*, *Мартынов А. М.*, *Филиппенко А. И.* Способ определения массы ковша экскаватора-драглайна. Пат. А. С. 861485 СССР, МКИ: E02F3/48.– N 2658784/29—03; Заявл. 10.05.78: Опубл. 07.09.81; Бюл. N 33/ — 4 с.
10. *Кибизов К. В.*, *Хатагов А. Ч.* Автоматизированное дозирование загрузки транспортных средств одноковшовым экскаватором // Известия вузов. Горный журнал. 1985. № 2. С. 94—97.
11. *Бабенко А. Г.*, *Полузадов В. Н.*, *Дружинин А. В.* Измерение массы полезного грунта, перемещаемого подъемно-транспортной машиной циклического действия // Известия вузов. Горный журнал. 1994. № 4. С. 106—114.
12. *Карякин А. Л.* Способ и устройство измерения статического тока электропривода. Пат. 2097495 Россия, МПК 6 E 02 F 9/20. N 95101925/03; Заявл. 8.2.95; Опубл. 27.11.97, Бюл. N 33 1999—01.
13. *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.

14. *Осипов П. А.*, *Карякин А. Л.* Метод измерения координат асинхронного электродвигателя в частотно-регулируемом электроприводе механизмов карьерного экскаватора // Электротехника. 2012. № 9. С. 18—21.

15. *Karyakin A.*, *Osipov P.* Increased productivity with performance monitoring of the key technological indicators for power shovels and dragline by means of electric drive // The 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining. Held in conjunction with the 23rd World Mining Congress & Expo (WMC 2013), 2013.

16. *Rasuli A.*. Dynamic Modeling, Parameter Identification, Payload Estimation, and Non-Contact Arm Geometry Sensing of Cable Shovels: A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of British Columbia, Vancouver, 2012, 128 p.

17. Карьерные экскаваторы // Официальный сайт компании P&H Mining Equipment Inc. [электронный ресурс] — режим доступа: http://www.phmining.com (дата обращения: 11.10.2021).

18. Канатные экскаваторы с электрическим приводом // Официальный сайт компании Caterpillar Inc. [электронный ресурс] — режим доступа: https://www.cat.com/ru_RU/products/new/equipment/electric-rope-shovels.html (дата обращения: 11.10.2021).
ГИАБ

REFERENCES

1. Poderni R. Yu. World market revue of the State-of-art excavating and Loading equipment for Open-pit mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. no. 2. [In Russ].

2. Karyakin A. L. *Rezhimy raboty, optimizacija i upravlenie jelektromehanicheskimi kompleksami glavnyh privodov odnokovshovyh jekskavatorov* [Modes of operation, optimization and control of electromechanical complexes of the main drives of single-bucket excavators], Doctor's thesis, Ekaterinburg, 2005, 276 p. [In Russ].

3. Wauge D. Payload Estimation for Electric Mining Shovels: PhD Thesis. Mechanical Engineering, the University of Queensland, Australia, 2008, 246 p.

4. Slob J. J., McAree P. R., Steinbuch M. and Siegrist P. M. Payload Estimation for Electric Mining Shovels using a Load Sensing Pin: Traineeship report, Eindhoven University of Technology, 2007, 51 p.

5. Kalin C, Seibold J, Miller P. P&H Centurion System. Official Site of The Western Mining Electrical Association, available at: https://wmea.net/product/june-2006-salt-lake-city-utah (accessed: 11.10.2021).

6. Peter Ross Mcaree, Pinjarra Hills, David Herman Wauge. Patent US 8,311,970 B2, 13.11.2012. Payload Estimation of Weight Bearng Machinery Using Multiple Model Adaptive Estmator System and Method.

7. Hatagov A.Ch., Kibizov K. V., Bideev G. A. *Ustrojstvo nepreryvnogo izmerenija zagruzki kovsha odnokovshovogo jekskavatora* [Device for continuous measurement of the loading of the bucket of a single-bucket excavator], Patent RU A. S. 594262 SSSR, MKI: E02F9/20. N 2328536/29—03; Zajavl. 24.02.76: Opubl. 25.02.78; Bjul. N 7/ 3 c. [In Russ].

8. Borisov A. M., Beglecov B. N. *Mikroprocessornoe ustrojstvo vzveshivanija grunta v kovshe jekskavatora-draglajna* [Microprocessor-based soil weighing device in the bucket of a dragline excavator], *Tezisy dokladov «IV Vsesojuznaja nauchno-tehnicheskaja konferencija po jelektroprivodu jekskavatorov»,* Moscow, Informelektro, 1989, pp. 13—14. [In Russ].

9. Zalesov O. A., Martynov A. M., Filippenko A. I. *Sposob opredelenija massy kovsha jekskavatora-draglajna* [Method for determining the mass of a dragline excavator bucket], Patent RU A. S. 861485 SSSR, MKI: E02F3/48. N 2658784/29—03; Zajavl. 10.05.78: Opubl. 07.09.81; Bjul. N 33/ 4 p. [In Russ]. [In Russ].

10. Kibizov K. V., Hatagov A. Ch. Automated dosing of loading vehicles with a single-bucket excavator, *Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal*, 1985, no. 2, pp. 94—97. [In Russ].

11. Babenko A. G., Poluzadov V. N., Druzhinin A. V. Measurement of the mass of useful soil moved by a cyclic transport vehicle, *Izvestija Vuzov. Gornyj zhurnal*, 1994, no. 4, pp. 106—114. [In Russ].

12. Karyakin A. L. *Sposob i ustrojstvo izmerenija staticheskogo toka jelektroprivoda* [Method and device for measuring static current of an electric drive], Patent RU 2097495 Rossija, MPK 6 E 02 F 9/20. N 95101925/03; Zajavl. 8.2.95; Opubl. 27.11.97, Bjul. N 33 1999—01. [In Russ].

13. Korjukov A. A. Geometric model of the working equipment of a mining excavator for calculating the loads of the electric drive and monitoring the position of the bucket, *Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal*, 2013, no. 3 pp. 106—113. [In Russ].

14. Osipov P. A., Karyakin A. L. Method for measuring the coordinates of an asynchronous electric motor in a frequency-controlled electric drive of mining excavator mechanisms, *Elektrotekhnika*, 2012, no. 9, pp. 18—21. [In Russ].

15. Karyakin A., Osipov P. Increased productivity with performance monitoring of the key technological indicators for power shovels and dragline by means of electric drive. The 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining. Held in conjunction with the 23rd World Mining Congress & Expo (WMC 2013), 2013. DOI: 10.22260/ISARC2013/0101.

16. Rasuli A. Dynamic Modeling, Parameter Identification, Payload Estimation, and Non-Contact Arm Geometry Sensing of Cable Shovels: A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of British Columbia, Vancouver, 2012, 128 p.

17. Mining machines, *Official site of P&H Mining Equipment Inc.*, available at: : http://www.phmining.com (accessed: 11.10.2021).

18. Rope excavators with electric drive, *Official site of Caterpillar Inc.*, available at: https://www.cat.com/ru_RU/products/new/equipment/electric-rope-shovels.html (accessed: 15.05.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Осипов Павел Андреевич — ст. преподаватель кафедры электрификации горных предприятий, e-mail: pavel.osipov@m.ursmu.ru, Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Osipov P. A., Senior Lecturer, Department of Mine Electrification, e-mail: pavel.osipov@m.ursmu.ru, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 21.09.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 25.05.2021; received after the review 21.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.