

**ӨЗГӨРҮЛМӨ ТҮЗҮЛҮШТҮҮ МЕХАНИЗМДИН
НЕГИЗИНДЕГИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКАЛЫК УРГУЛАМА
БАЛКАНЫН МАТЕМАТИКАЛЫК МОДЕЛИН ТҮЗҮП
ЧЫГУУ МАСЕЛЕСИНЕ**

**К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОТБОЙНОГО
МОЛОТКА НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕННОЙ
СТРУКТУРЫ**

**ON THE ISSUE OF DEVELOPING A MATHEMATICAL MODEL
OF AN ELECTROMECHANICAL JACKHAMMER BASED ON A
VARIABLE STRUCTURE MECHANISM**

А.О. Абидов, О.М. Исманов, Э.М. Болушев, М.А. Айтиев

A.O. Abidov, O.M. Ismanov, E.M. Bolushev, M.A. Aitiev

Изилдөө объектиси болуп өзгөрмө түзүлүшүү механизмдин негизиндеги электромеханикалык ургулама балка эсептелет. Бул жумушта ургулама балканын динамикасын изилдөөнүн актуалдуулугу белгиленет. Математикалык моделдөө ыкмалары электромеханикалык ургулама балкасынын динамикасын изилдөө үчүн колдонулган. Акыркы эсептөө сөлөкөтүн түзүү үчүн, анын негизинде изилденүүчү элементтердин кыймылынын теңдемелери жазылат, ал ургулама балканын мүнөздүү элементтеринин кыймылын изилдөө зарылдыгынан улам жөнөкөйлөштүрүлөт. Эсептөө сөлөкөтү жөнөкөйлөштүрүү жарым-жартылай тутумдардын, катуулукту ырааттуу туташтыруу жана ургулама балка элементтеринин күү ийин күчтөрүнүн айкалышынын негизинде ишке ашырылат. Жөнөкөйлөтүүлөрдөн кийин үч массалуу эсептөө сөлөкөтү алынган. Электромеханикалык ургулама балканын механикалык узаткычтын элементтеринин кыймылын жана ийри муунак согуу механизмдин сүрөттөө үчүн дифференциалдык теңдемелердин тутуму түзүлгөн. Алынган теңдемелерди чечүү Mathcad компьютердик программасынын жардамы менен Рунге-Кутта сандык ыкмасы аркылуу ишке ашырылат. Ургулама балканын элементтеринин кыймыл теңдемелерин чечүү жана аларды талдоо ургулама балка элементтеринин рационалдуу өлчөм мүнөздөмөлөрүн аныктоого мүмкүндүк берет.

Объектом исследования является электромеханический отбойный молоток на основе механизма переменной структуры. В работе отмечается актуальность исследования динамики отбойного молотка. При исследовании динамики электромеханического отбойного молотка использованы методы математического моделирования. Для составления окончательной расчетной схемы, на основе которой записываются уравнения движения исследуемых элементов, производится ее упрощение из соображений необходимости изучения движения характерных элементов отбойного молотка. Упрощение расчетной схемы производится на основе парциальных систем, последовательным соединением жесткостей и объединением моментов инерций элементов отбойного молотка. После произведенных упрощений получена трехмассовая расчетная схема. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающая движения элементов механической передачи и кривошипа ударного механизма электромеханического отбойного молотка. Решение полученных уравнений осуществляется численным методом Рунге-Кутты с использованием компьютерной программы Mathcad. Решение уравнений движения элементов отбойного молотка и их анализ позволит определить рациональные параметры элементов отбойного молотка.

The object of study is an electromechanical jackhammer based on a variable structure mechanism. The paper notes the relevance of studying the dynamics of a jackhammer. Mathematical modeling methods were used to study the dynamics of an electromechanical jackhammer. To compile the final calculation scheme, on the basis of which the equations of motion of the elements under study are written, it is simplified for reasons of the need to study the movement of the characteristic elements of the jackhammer. Simplification of the design scheme is carried out on the basis of partial systems, sequential connection of rigidities and combination of moments of inertia of the jackhammer elements. After the simplifications made, a three-mass design scheme was obtained. A system of differential equations has been compiled to describe the movements of the elements of the mechanical transmission and the crank of the impact mechanism of an electromechanical jackhammer. The solution of the resulting equations is carried out using the Runge-Kutta numerical method using the Mathcad computer program. Solving the equations of motion of the jackhammer elements and their analysis will allow us to determine the rational parameters of the jackhammer elements.

Түйүн сөздөр: математикалык модель, динамика, электромеханикалык ургулама балка, өзгөрмө түзүлүштөгү механизми, шайма-шай коллектордук кыймылдаткыч.

Ключевые слова: математическая модель, динамика, электромеханический отбойный молоток, механизм переменной структуры, универсальный коллекторный двигатель.

Key words: mathematical model, dynamics, electromechanical jackhammer, variable structure mechanism, universal commutator motor.

Ручные машины ударного действия нашли широкое применение в горной промышленности, строительстве и в машиностроении в виде перфораторов и отбойных молотков, где в качестве привода используются электрические двигатели.

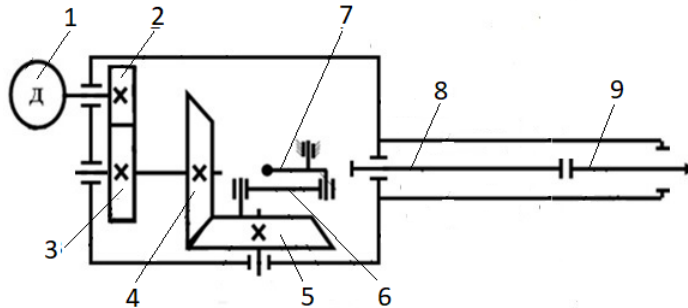
В Институте машиноведения и автоматики НАН КР разработан отбойный молоток с универсальным коллекторным электродвигателем. Разработанный отбойный молоток отличается от существующих простотой конструкции и обслуживания, высоким КПД и возможностью работать в любых условиях. Серийное производство таких молотков с предложенным приводом можно организовать в условиях нашей республики.

Согласно кинематической схеме электромеханического отбойного молотка (рис. 1), вращательное движение электродвигателя 1 (выходного вала) через шестерни 2,3 передается к кривошипу 5 ударного механизма. Вращательное движение кривошипа 5 через шатун 6 преобразовывается в качательное движение коромысла-бойка 7. В момент выстраивания звеньев в одну линию коромысло-боек 7 максимально разгоняется и наносит удар по торцу волновода 8, затем отходит обратно назад. Ударная волна, проходя через волновод 8, передается буровому инструменту 9 и от нее к обрабатываемой породе.

В процессе работы отбойного молотка на силовую трансмиссию действуют нагрузки со стороны двигателя (вращающий момент M_B), динамические нагрузки со стороны породы (момент сопротивления M_C) и ударные нагрузки, создаваемые ударной системой (M_U), которые, в свою очередь, приводят к появлению крутильных колебаний в элементах отбойного молотка [1, 2].

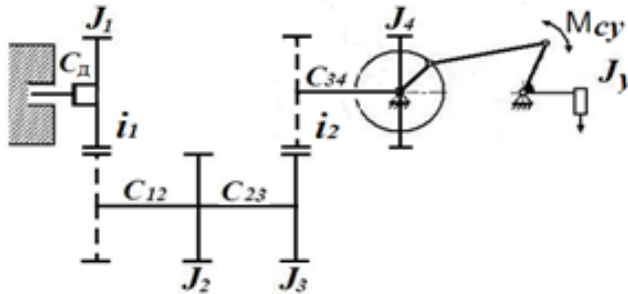
Для изучения крутильных колебаний элементов механической передачи, ударного механизма отбойного молотка необходимо составить расчетную схему, определяя моменты инерции движущихся элементов механизма, жесткости упругих связей между звеньями. Вращающиеся элементы механизма в расчетной схеме рассмотрим как элементы системы с сосредоточенной массой, а таких элементов, как вал двигателя, промежуточные валы – упругие элементы с

жесткостью C [1, 2]. В итоге расчетная схема элементов отбойного молотка для ударного механизма имеет вид, показанный на рисунке 2.



1 – универсальный коллекторный двигатель; 2 – 5 – зубчатые колеса; 6 – шатун ударного механизма; 7 – коромысло ударного механизма; 8 – волновод; 9 – инструмент.

Рисунок 1 – Кинематическая схема электроударного молотка



J_1 – момент инерции вала якоря двигателя; J_2 – момент инерции зубчатого колеса; J_3 – момент инерции зубчатого колеса; J_4 – момент инерции коромысла ударного механизма; J_y – момент инерции ударного механизма; M_{cy} – момент сопротивления ударного механизма; C_d – жесткость вала двигателя; C_{12} – суммарная жесткость зубчатых зацеплений; C_{23} – жесткость промежуточного вала на кручение; C_{34} – суммарная жесткость зубчатых зацеплений.

Рисунок 2 – Расчетная схема электроударного молотка

В этой схеме продольные отрезки прямых условно изображают упругие звенья, сплошные поперечные линии изображают мо-

менты инерции, пунктирные поперечные линии соответствуют невесомым зубчатым зацеплениям [2].

При упрощении расчетной схемы воспользуемся методикой, приведенной в работе [2]. Минимальное количество масс для расчетной схемы данной системы определим из соображений необходимости изучения движения характерных элементов и возможности упрощения расчетной схемы [1].

Для упрощения расчетной схемы отбойного молотка с ударным механизмом, согласно работам [1,2,3,4], все упругие и инерционные характеристики элементов приводим к произвольно выбранному звену, в данном случае к кривошипу.

Момент инерции якоря и жесткость вала двигателя для приведения умножим на квадрат передаточного отношения:

$$J_{1ПР} = J_1 \cdot (i_1 \cdot i_2)^2; \quad C_{ДПР} = C_D \cdot (i_1 \cdot i_2)^2. \quad (1)$$

Далее для ударного механизма отбойного молотка приведение к кривошипу осуществляется следующим образом [2,3]:

$$J_{2ПР} = J_2 \cdot i_2^2; \quad C_{12ПР} = C_{12} \cdot i_2^2. \quad (2)$$

При ударном режиме работы отбойного молотка расчетная схема имеет вид, показанный на рисунке 2.

Как видно на рисунке 2, после приведения жесткостей и моментов инерций элементов к кривошипу расчетная схема принимает сложную структуру. В этой многомассовой системе число подвижных масс определяется числом подвижных деталей в трансмиссии, откуда возникает целесообразность упрощения.

Для упрощения расчетной схемы элементов отбойного молотка выделим последовательно парциальные системы с наибольшей собственной частотой и исключим их из общей схемы при соблюдении условия (3):

$$K^2 \gg (2 \cdot \pi \cdot f)^2, \quad (3)$$

где K – парциальная круговая частота, определяемая в зависимости от типа преобразуемой системы; f – максимальная исследуемая частота.

Для системы, схема которой показана на рисунке 3а, парциальная круговая частота определяется по формуле [2, 3, 4]:

$$K^2 = \frac{C_i + C_{i+1}}{J_i}, \quad (4)$$

где: C_i, C_{i+1} – жесткости i -того и $i+1$ го участка.

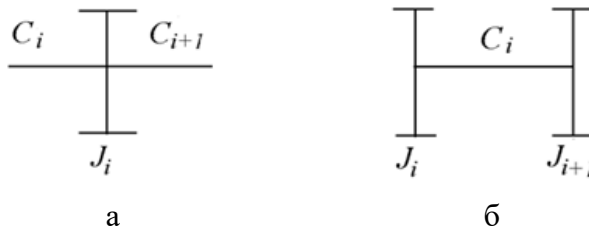


Рисунок 3 – Парциальная система: а – одномассовая; б – двухмассовая

Для парциальной системы, схема которой показана на рисунке 3б, парциальная круговая частота определяется по формуле:

$$K^2 = \frac{C_i \cdot (J_i + J_{i+1})}{J_i \cdot J_{i+1}}. \quad (5)$$

Так как условие (4) соблюдается для данной расчетной системы, преобразовываем ее путем замены совокупности масс и упругостей некоторыми эквивалентными массами и упругостями [2, 3, 4].

Причем при замене системы «а» системой «б» учитываем, что

$$J_i = \frac{C_i \cdot J_i}{C_i + C_{i+1}}; \quad J_{i+1} = \frac{C_{i+1} \cdot J_i}{C_i + C_{i+1}}; \quad C_i = \frac{C_i \cdot C_{i+1}}{C_i + C_{i+1}}. \quad (6)$$

Замена системы «б» системой «а» позволит последовательно соединить жесткости и объединить моменты инерций в соответствующей пропорции с моментом инерции:

$$C_{i+1} = \frac{J_i + J_{i+1}}{J_i} \cdot C_i; \quad C_i = \frac{J_i + J_{i+1}}{J_{i+1}} \cdot C_i; \quad J_i = J_{i+1} + J_i. \quad (7)$$

В конечном итоге получим окончательную упрощенную расчетную схему отбойного молотка (рис. 4).

Получив окончательную расчетную схему (рис. 4), переходим к составлению уравнений движения для каждой массы системы.

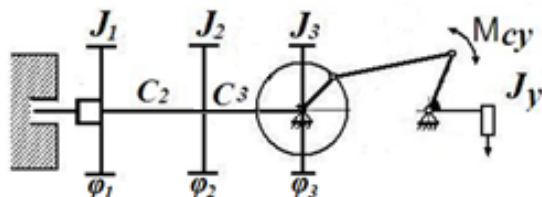


Рисунок 4 – Обобщенная упрощенная расчетная схема электромеханического отбойного молотка

Уравнение движения якоря универсального коллекторного двигателя, т.е. первой массы расчетной схемы, запишется следующим уравнением [1,4]:

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 = \left[k_1 \cdot i^{1-a1} \cdot U \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_c)^{a1} - k_2 \cdot i^{2-a1} \cdot \dot{\varphi}_1 \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_c)^{a2} - k_3 \cdot i^{1-a3} \cdot R \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_c)^{a3} - \frac{dM_c}{dt} \right], \quad (8)$$

где $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ – соответственно угловая скорость, ускорение и рывок якоря электродвигателя; k_1, k_2, k_3 – постоянные коэффициенты; J – момент инерции якоря электродвигателя; i – ток в цепи якоря; M_c – момент сопротивления механизма; U – напряжение в цепи якоря; R – сопротивление в цепи якоря; $a1, a2, a3$ – число пар параллельных ветвей.

С учетом (8) уравнения движения элементов отбойного молотка по данной расчетной схеме (рис. 4) записываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = k_1 \cdot U \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_C)^{a1} - k_2 \cdot \dot{\varphi}_1 \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_C)^{a2} - k_3 \cdot R \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_C)^{a3} - M'_C; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = C_2(\varphi_1 - \varphi_2) - C_3(\varphi_2 - \varphi_3); \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = C_3(\varphi_2 - \varphi_3) - M_{CV}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\varphi_1 - \varphi_3$ – угловое перемещение элементов отбойного молотка;

$\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3$ – угловая скорость элементов отбойного молотка; $\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3$ – угловое ускорение отдельных масс отбойного молотка; M_{CV} – момент сопротивления, действующий со стороны ударного механизма.

В данной системе уравнений момент сопротивления, действующий со стороны ударного механизма, определяется по формуле [1, 4]:

$$M_{CV} = J_y \cdot \ddot{\varphi}_y \cdot u_{32}, \quad (10)$$

где $\ddot{\varphi}_y$ – угловое ускорение коромысла ударного механизма; J_y – момент инерции коромысла ударного механизма; u_{32} – аналог угловой скорости коромысла ударного механизма.

$$\text{С учетом значения } \ddot{\varphi}_y = \ddot{\varphi}_3 \cdot u_{32} + \dot{\varphi}_3^2 \cdot \dot{u}_{32}, \quad (11)$$

$$\text{имеем: } M_{CV} = J_y \cdot u_{32} (\ddot{\varphi}_3 \cdot u_{32} + \dot{\varphi}_3^2 \cdot \dot{u}_{32}). \quad (12)$$

Систему дифференциальных уравнений (9) с учетом уравнений (10) – (12) перепишем в виде:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 = \frac{k_1 \cdot U \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_C)^{a1} - k_2 \cdot \dot{\varphi}_1 \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_C)^{a2} - k_3 \cdot R \cdot (J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + M_C)^{a3} - M'_C}{J_1}; \\ \ddot{\varphi}_2 = \frac{C_2(\varphi_1 - \varphi_2) - C_3(\varphi_2 - \varphi_3)}{J_2}; \\ \ddot{\varphi}_3 = \frac{C_3(\varphi_2 - \varphi_3)}{J_3 + J_y \cdot u_{32}^2} - \frac{J_y \cdot u_{32} \cdot \dot{\varphi}_3^2 \cdot \dot{u}_{32}}{J_3 + J_y \cdot u_{32}^2}. \end{cases} \quad (13)$$

Решение полученных дифференциальных уравнений (13) производится численным методом Рунге-Кутты с применением компьютерной программы Mathcad. Решение этих дифференциальных

уравнений позволяет сделать анализ зависимостей кинематических величин элементов отбойного молотка, определить рациональные конструктивные параметры ударного механизма и отбойного молотка в целом.

Выводы

1. Разработана обобщенная математическая модель отбойного молотка, решение которой позволит проанализировать основные кинематические параметры элементов, входящих в математическую модель.

2. Решение уравнений движения элементов отбойного молотка и их анализ позволит определить рациональные параметры элементов отбойного молотка.

Литература:

1. Абидов А. О. Математическая модель электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом [Текст] / А.О. Абидов, О.М. Исманов // Научный журнал. Бюллетень науки и практики. – Нижневартовск, 2019. – Т. 5, №5. – С. 233 – 240.
2. Манжосов В.К. Крутильные колебания в трансмиссиях буровых машин [Текст] / В.К. Манжосов, С. Абдраимов, Т.О. Невенчанная. – Фрунзе: Илим, 1982. – 166 с.
3. Абидов А.О. Научно-методические основы применения механизма переменной структуры для создания ударных машин [Текст]: дис.... д-ра техн. наук: 05.02.18 / А.О.Абидов// Бишкек, 2002. –304с.
4. Omurbek Ismanov. Development of a mathematical model and analysis of the dynamics of an electromechanical perforator with an impact-rotary mechanism // Jyldyz Turdubaeva, Abdykadyr Abidov, Ernis Bolushev, Alimakan Azimova / E3S Web of Conferences 525, eISSN: 2267-1242, Volume 525, 2024, IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources.