

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ГИДРОУДАРНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГОРНЫХ МАШИН

Ю.М. Смирнов¹, Б.М. Кенжин², Н.С. Смакова¹, М.А. Журунова¹

¹ Карагандинский государственный технический университет, Караганда, Казахстан,
e-mail: smirnov_y_m@mail.ru

² ТОО «Карагандинский машиностроительный консорциум», Караганда, Казахстан

Аннотация: Установлено, что основной причиной несоответствия выходных показателей гидравлических машин ударного действия, работающих в горнорудной промышленности, их расчетным значениям являются погрешности их органов управления в отработке управляющих сигналов. Для максимального приближения расчетных и действительных значений принят непрерывный метод формирования управляющего воздействия, использующий третью производную по времени от закона движения основного исполнительного элемента — резкость. Разработаны математические модели, осуществляющие управление с использованием перемещения, скорости и ускорения, установлены коэффициенты, определяющие технико-эксплуатационные условия использования машин. На основе теории управления и теории математической логики разработаны логические схемы формирования управляющих сигналов в каждой из фаз рабочего цикла. В качестве их основных элементов использованы преобразователи, интеграторы и сумматоры, обеспечивающие декомпозицию элементов логических схем и дальнейшее формирование соответствующего управляющего воздействия. Установлено, что наиболее просто может быть сформировано управляющее воздействие по ускорению основного исполнительного элемента. Для применения разработанных схем рекомендуются обобщенные диаграммы изменения управляющего воздействия, которые реализуются для определенного конструктивного исполнения гидроударных рабочих органов применительно к определенным условиям их использования.

Ключевые слова: горные машины, рабочий орган, гидравлика, ударное устройство, орган управления, управляющее воздействие, закон движения, перемещение скорость, ускорение, резкость, математическая модель, эксплуатационные коэффициенты, логические схемы, управляющий сигнал, рабочий цикл, обобщенная диаграмма.

Для цитирования: Смирнов Ю. М., Кенжин Б. М., Смакова Н. С., Журунова М. А. Оптимальное управление режимами гидроударных исполнительных органов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6. – С. 95–104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-95-104.

Optimized control over modes of hydraulic percussion cutting heads of mining machines

Yu.M. Smirnov¹, B.M. Kenzhin², N.S. Smakova¹, M.A. Zhurunova¹

¹ Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: smirnov_y_m@mail.ru

² Karaganda Machine-Building Consortium, Karaganda, Kazakhstan

Abstract: The main cause of the disagreement between the actual and calculated output data of hydraulic percussion mining machines is the erroneous feed of manipulation signals by the control units. For the maximal fitting of the calculated and actual figures, the continuous method of control action using the third time derivative of the law of motion of the main function element is accepted, namely, the accuracy. The mathematical models of control using displacement, velocity and acceleration are developed. The service factors of mining machines are found. Based on the theory of control and the mathematical logic theory, the logical circuits of formation of manipulation signals in each phase of the working cycle are developed. The main elements are converters, integrators and accumulators ensuring decomposition of elements of the logical circuits and further generation of appropriate control action. It is found that the simplest way is to generate the control action for acceleration of the key function element. For the developed circuits, it is recommended to use general charts of the control action change, implementable for a certain design of hydraulic percussion cutting heads in certain operating conditions.

Key words: mining machines, cutting head, hydraulics, impact unit, control unit, control action, law of motion, displacement, velocity, acceleration, accuracy, mathematical model, service factors, logical circuits, manipulation signal, working cycle, general chart.

For citation: Smirnov Yu.M., Kenzhin B.M., Smakova N.S., Zhurunova M.A. Optimized control over modes of hydraulic percussion cutting heads of mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(6):95-104. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-95-104.

Гидроударные исполнительные органы в настоящее время широко используются в импульсных технологиях горного производства. Это разрушение горных пород повышенной крепости, бурение шпуров и скважин, оборка бортов карьеров, разрушение негабаритов и т.п. В большинстве случаев при эксплуатации машин ударного действия наблюдаются несоответствия их выходных показателей расчетным значениям. Это обусловлено, в первую очередь, отсутствием надежных систем управления режимами движения основного исполнительного элемента.

Управление режимами движения гидроударных систем сводится к обеспечению заданного рабочего цикла и заданных параметров основного исполнительного элемента — бойка. Основные функции при этом выполняет орган управления, имеющий основной распределительный элемент, управляемые и управляющие гидравлические камеры, а также датчики состояния [1 — 4]. Анализ основополагающих в этой области работ [5 — 7] показывает значительное

разнообразие методов и способов управления, а также основных принципов их построения.

Наиболее приемлемыми для исполнительных органов горных машин, где реализуются значительные силовые воздействия при сравнительно малой частоте (до 12 Гц), являются непрерывные методы формирования и реализации управления. Они обеспечивают слежение за состоянием основного исполнительного элемента в течение всего рабочего цикла и осуществление оперативного воздействия на закон его движения в любой момент времени.

В качестве рабочей гипотезы при этом используется предположение о том, что наиболее полно изменение управляющего воздействия на основной исполнительный элемент во времени характеризует третья производная по времени от его закона движения [8, 9].

Действительно, если иметь в виду классическое выражение

$$m\ddot{a} = \bar{F},$$

где m — приведенная масса основного исполнительного элемента; \bar{F} — резуль-

тирующая всех действующих на него сил; $\bar{a} = \ddot{x}$ – ускорение; $x(t)$ – закон движения, то после некоторых преобразований получим:

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{m} \bar{F}.$$

Если принять во внимание, что движение основного исполнительного элемента осуществляется вдоль его оси, то

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{m} F; \quad \ddot{x}(t) = \frac{1}{m} \frac{dF}{dt} = \frac{1}{m} U(t),$$

где $U(t)$ – изменение управляющего воздействия.

Следует также отметить, что в классической литературе, посвященной теории колебаний [10], используется третья производная по времени от закона движения, которая называется резкость. В физическом отношении это интенсивность изменения ускорения по времени. Практическая реализация резкости в теории управления нашла применение при исследовании оптимального по быстродействию гидропривода, в частности, в работе [11]. Здесь убедительно доказано, что такой подход позволяет «обеспечить движение исполнительного органа привода с минимальными отклонениями от требуемого».

Таким образом, в качестве задающего воздействия для непрерывных методов формирования управляющего воздействия принимается резкость.

Принятый метод формирования управляющего воздействия определяет этапы создания органа автоматического управления гидроударной системы, отличные от ранее отмеченных. Отличие заключается в том, что до начала структурного синтеза органа управления производится установление закона движения основного исполнительного элемента системы на основании эксплуатационных требований и ограничений, предъявляемых к системе в целом, а также до-

пущений, принятых при исследовании движения основного исполнительного элемента. Найденный закон движения является исходным для установления закона изменения управляющего воздействия в аналитической форме с использованием третьей производной по времени.

В качестве исходных уравнений принимаются законы движения основного исполнительного элемента:

в фазе обратного хода:

$$X = \frac{P_0^* + C_H V_0 t}{C + C_H} + \left(x_0 - \frac{P_0^*}{C + C_H} \right) \cos kt + k^{-1} \left(\alpha V - \frac{C_H V_0}{C + C_H} \right) \sin kt;$$

в фазе рабочего хода:

$$x_1 = \frac{R_m}{k_1^2 m_6} (1 - \cos k_1 t).$$

Дифференцируя по времени каждое из уравнений, получим:

$$\dot{X} = \frac{C_H}{C + C_H} V_0 - \left(X_0 - \frac{P_0^*}{C + C_H} \right) k \sin kt + \left(\alpha V - \frac{C_H V_0}{C + C_H} \right) \cos kt; \quad (1)$$

$$\ddot{X} = - \left(X_0 - \frac{P_0^*}{C + C_H} \right) k^2 \cos kt - \left(\alpha V - \frac{C_H V_0}{C + C_H} \right) k \sin kt; \quad (2)$$

$$\ddot{\ddot{X}} = \left(X_0 - \frac{P_0^*}{C + C_H} \right) k^3 \sin kt - \left(\alpha V - \frac{C_H V_0}{C + C_H} \right) k^2 \cos kt; \quad (3)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{R_m}{k_1 m_6} \sin k_1 t; \quad (4)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{R_m}{m_6} \cos k_1 t; \quad (5)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{R_m}{m_6} k_1 \sin k_1 t \quad (6)$$

Сопоставление представленных выражений показывает, что управление движением основного исполнительного элемента может быть осуществлено в каждой из фаз с использованием перемещения, скорости или ускорения.

Введем для удобства некоторые коэффициенты, определяемые исходными данными и параметрами системы:

$$A^{(0)} = X_0 - \frac{P_0^*}{C + C_H}; \quad B^{(0)} = X_0 - A^{(0)};$$

$$D^{(0)} = \frac{C_H}{C + C_H} V_0; \quad E^{(0)} = \frac{R_m}{m_6}.$$

С учетом этого получим:

$$X = (B^{(0)} + D^{(0)}t) + A^{(0)} \cos kt + k^{-1} (\alpha V - D^{(0)}) \sin kt; \quad (7)$$

$$\dot{X} = D^{(0)} - A^{(0)} k \sin kt + (\alpha V - D^{(0)}) \cos kt; \quad (8)$$

$$\ddot{X} = -A^{(0)} k^2 \cos kt - (\alpha V - D^{(0)}) k \sin kt; \quad (9)$$

$$\ddot{X} = A^{(0)} k^3 \sin kt - (\alpha V - D^{(0)}) k^2 \cos kt; \quad (10)$$

$$X_1 = \frac{E^{(0)}}{k_1^2} (1 - \cos k_1 t); \quad (11)$$

$$\dot{X}_1 = \frac{E^{(0)}}{k_1} \sin k_1 t; \quad (12)$$

$$\ddot{X}_1 = E^{(0)} \cos k_1 t; \quad (13)$$

$$\ddot{X}_1 = -E^{(0)} k_1 \sin k_1 t. \quad (14)$$

На основании данных выражений можно установить порядок формирования сигналов, определяющих кинематические показатели основного исполнительного элемента.

Формирование сигнала $X(t)$ осуществляется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

В фазе обратного хода (рис. 1, а) обратная связь позволяет сформировать функции $\cos kt$ и $\sin kt$. Затем производится одновременное умножение функций соответственно на коэффициенты $A^{(0)}$ и $(\alpha V - D^{(0)})/k$ и сложение их между собой. Одновременно с этим вырабатывается сигнал $(B^{(0)} + D^{(0)}t)$ и производится его суммирование с полученным после преобразований сигналом от обратной связи.

В фазе рабочего хода (рис. 1, б) обратная связь формирует сигнал $\cos k_1 t$. В последующем сигнал умножается на коэффициент $(-E^{(0)}/k_1^2)$, и производится сложение с постоянным членом $E^{(0)}/k_1^2$, вырабатываемым независимо от обратной связи.

Формирование сигнала $\dot{X}(t)$ определяется схемой, приведенной на рис. 2. При совершении фазы обратного хода

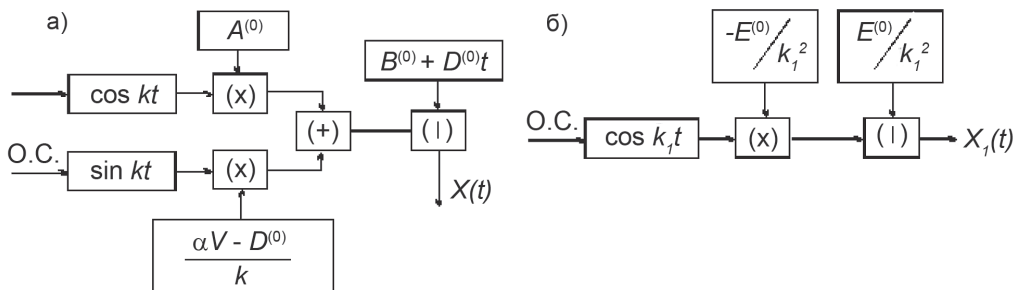


Рис. 1. Логическая схема формирования сигнала $X(t)$ в фазах обратного (а) и рабочего (б) хода

Fig. 1. Logical circuit of $X(t)$ signal generation in phases of backward (a) and power (b) strokes

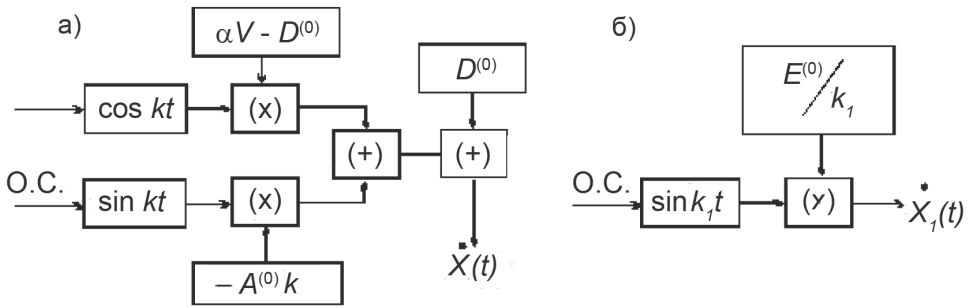


Рис. 2. Логическая схема формирования сигнала $\dot{X}(t)$ в фазах обратного (а) и рабочего (б) хода
 Fig. 2. Logical circuit of $\dot{X}(t)$ signal generation in phases of backward (a) and power (b) strokes

(рис. 2, а) формируются функции $\cos kt$ и $\sin kt$. Каждая из функций одновременно умножается соответственно на коэффициенты $(\alpha V - D^{(0)})$ и $(-A^{(0)}/k)$, затем преобразованные сигналы обратной связи суммируются между собой с добавлением постоянного члена $D^{(0)}$. В фазе рабочего хода (рис. 2, б) сформированная обратной связью функция $\sin k_1 t$ умножается на коэффициент $E^{(0)}/k_1$.

При формировании сигнала $\ddot{X}(t)$ необходимо выполнение операций в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3. Движение основного исполнительного элемента в фазе обратного хода (рис. 3, а) позволяет сформировать функции $\cos kt$ и $\sin kt$. В дальнейшем каждая из функций одновременно умножается соответственно на коэффициенты $(-A^{(0)} \cdot k^2)$ и $[-k(\alpha V - D^{(0)})]$ с последующим сложением преобразованных

сигналов обратной связи. При совершении рабочего хода формируется функция $\cos k_1 t$, которая в дальнейшем умножается на коэффициент $E^{(0)}$.

Как следует из анализа схем формирования различных управляющих сигналов, наиболее просто может быть осуществлено формирование $\dot{X}(t)$.

Из сопоставления выражений, определяющих кинематические показатели основного исполнительного элемента системы, а также логических схем формирования управляющих сигналов следует, что функция управляющего воздействия $U(t)$ может быть построена с помощью декомпозиции соответствующих сигналов и преобразования каждого составного элемента.

Логическая схема формирования управляющего воздействия с использованием перемещения и приведена на рис. 4.

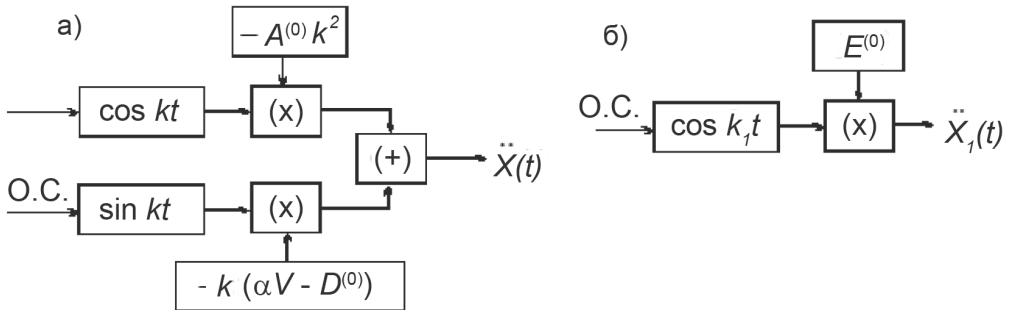


Рис. 3. Логическая схема формирования сигнала $\ddot{X}(t)$ в фазах обратного (а) и рабочего (б) хода
 Fig. 3. Logical circuit of $\ddot{X}(t)$ signal generation in phases of backward (a) and power (b) strokes

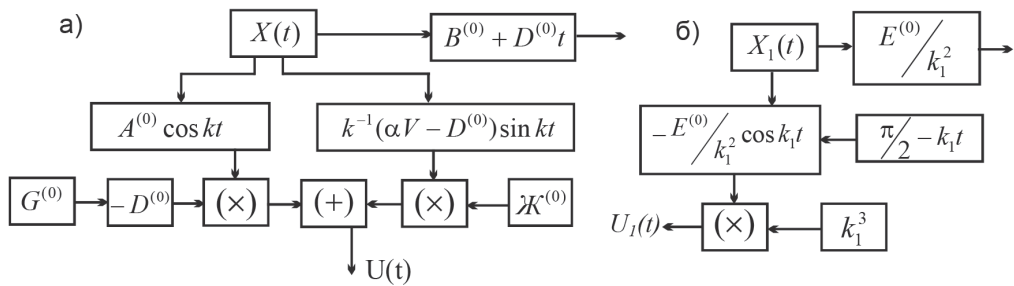


Рис. 4. Логическая схема формирования управляющего воздействия $U(t)$ с использованием перемещения $X(t)$ и $X_1(t)$: в фазе обратного хода (а); в фазе рабочего хода (б)

Fig. 4. Logical circuit of $U(t)$ control action generation using displacements $X(t)$ and $X_1(t)$: (a) in backward stroke phase; (b) in power stroke phase

При совершении обратного хода (рис. 4, а) сигнал $X(t)$ раскладывается на составляющие $(B^{(0)} + D^{(0)}t)$, $A^{(0)} \cos kt$ и $[k^{-1}(\alpha V - D^{(0)} \sin kt)]$. Для получения функции $U(t)$ следует одновременно умножить второе и третье составляющие на соответствующие коэффициенты:

$$D^{(0)} = \frac{k^2(\alpha V - D^{(0)})}{A^{(0)}};$$

$$\lambda K^{(0)} = \frac{A^{(0)} k^4}{\alpha V - D^{(0)}}$$

и сложить полученные после преобразования сигналы. Оставшийся после декомпозиции элемент $(B^{(0)} + D^{(0)}t)$ в сформированную функцию не входит. При совершении рабочего хода (рис. 4, б) сигнал $X_1(t)$ раскладывается на состав-

ляющие $E^{(0)}/k_1^2$ и $[-(E^{(0)}/k_1^2) \cos k_1 t]$. Функция $U_1(t)$ получается путем сдвига фаз сомножителя $\cos k_1 t$ на $\pi/2$ в сторону запаздывания и последующего умножения последнего элемента на коэффициент k_1^3 . Оставшийся элемент $E^{(0)}/k_1^2$ в сформированную функцию не входит.

На рис. 5 приведена логическая схема формирования управляющего воздействия с использованием скорости $\dot{X}(t)$ и $\dot{X}_1(t)$. В фазе обратного хода (рис. 5, а) сигнал $\dot{X}(t)$ необходимо разложить на составляющие $D^{(0)}$, $[(\alpha V - D^{(0)} \cos kt)]$ и $(-A^{(0)} k \sin kt)$. В дальнейшем два последних члена умножаются на коэффициент $-k^2$, и полученные преобразованные сигналы складываются. Член $D^{(0)}$, оставшийся после разложения, в функцию управляющего воздействия не входит.

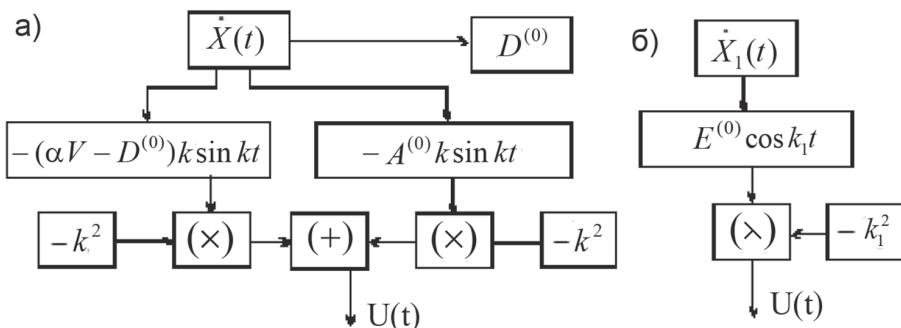


Рис. 5. Логическая схема формирования управляющего воздействия $U(t)$ с использованием скорости $\dot{X}(t)$ и $\dot{X}_1(t)$: в фазе обратного хода (а); в фазе рабочего хода (б)

Fig. 5. Logical circuit of $U(t)$ control action generation using displacements $\dot{X}(t)$ and $\dot{X}_1(t)$: (a) in backward stroke phase; (b) in power stroke phase

В фазе рабочего хода (рис. 5, б) сигнал $\dot{X}_1(t)$ определяется только членом $(E^{(0)}k_1) \sin k_1t$. Функция $U(t)$, таким образом, формируется за счет умножения этого члена на коэффициент $-k_1^2$.

Использование для формирования управляющего воздействия ускорения $\ddot{X}(t)$ и $\ddot{X}_1(t)$ предполагает логическая схема, приведенная на рис. 6. Движение основного исполнительного элемента в фазе обратного хода (рис. 6, а) дает возможность разложить сигнал $\ddot{X}(t)$ на составляющие $(-A^{(0)}k^2 \cos kt)$ и $[-(\alpha V - D^{(0)})k \sin kt]$. В дальнейшем производится одновременное умножение составляющих на соответствующие коэффициенты:

$$Z^{(0)} = -\frac{\alpha V - D^{(0)}}{A^{(0)}}; F^{(0)} = \frac{A^{(0)}k^2}{(\alpha V - D^{(0)})}$$

и сложение полученных после преобразования сигналов. При движении основного исполнительного элемента в фазе рабочего хода (рис. 6, б) сигнал $\dot{X}_1(t)$ определяется только членом $E^{(0)} \cos k_1t$. Функция $U(t)$ может быть получена путем сдвига фаз сомножителя $\cos k_1t$ на $\pi/2$ в сторону опережения с последующим умножением всего члена на коэффициент k_1 .

Анализ представленных логических схем показывает, что наиболее просто

может быть реализовано формирование управляющего воздействия с использованием скорости. Преобразование сигналов при этом сводится только к их умножению на постоянные коэффициенты.

Для завершения формирования исходных данных перед осуществлением структурного синтеза органа управления и последующих этапов строятся диаграммы изменения управляющего воздействия. Они могут быть получены с помощью графической интерпретации закона движения основного исполнительного элемента в каждой из фаз рабочего цикла и преобразования полученных кривых в соответствии с разработанными логическими схемами.

Диаграмма изменения управляющего воздействия для рассматриваемого движения без сопротивления приведена на рис. 7. Кривая 2 диаграммы находится выше оси абсцисс, поскольку коэффициент $k^2(\alpha V - D^{(0)})$ имеет отрицательную величину при найденных параметрах движения и определяется условием неразрывности потока жидкости в камере обратного хода.

Таким образом, изменение управляющего воздействия во времени характеризуется кривой *оавгд*. Отрезки *оа*, *бв* и *гд* определяют величины управляющего воздействия соответственно в на-

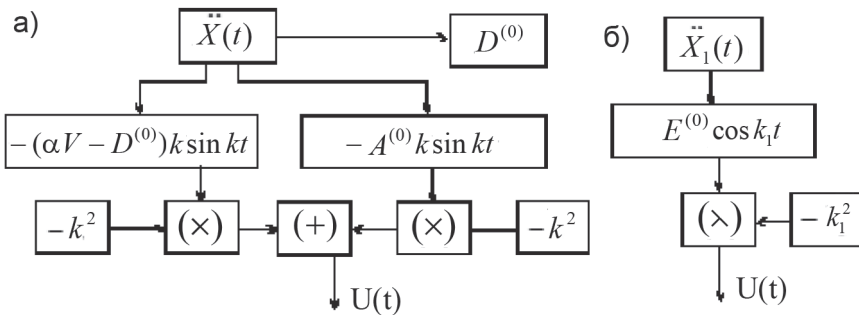


Рис. 6. Логическая схема формирования управляющего воздействия $U(t)$ с использованием ускорения $\ddot{X}(t)$ и $\ddot{X}_1(t)$: в фазе обратного хода (а); в фазе рабочего хода (б)

Fig. 4. Logical circuit of $U(t)$ control action generation using displacements $\ddot{X}(t)$ and $\ddot{X}_1(t)$: (a) in backward stroke phase; (b) in power stroke phase

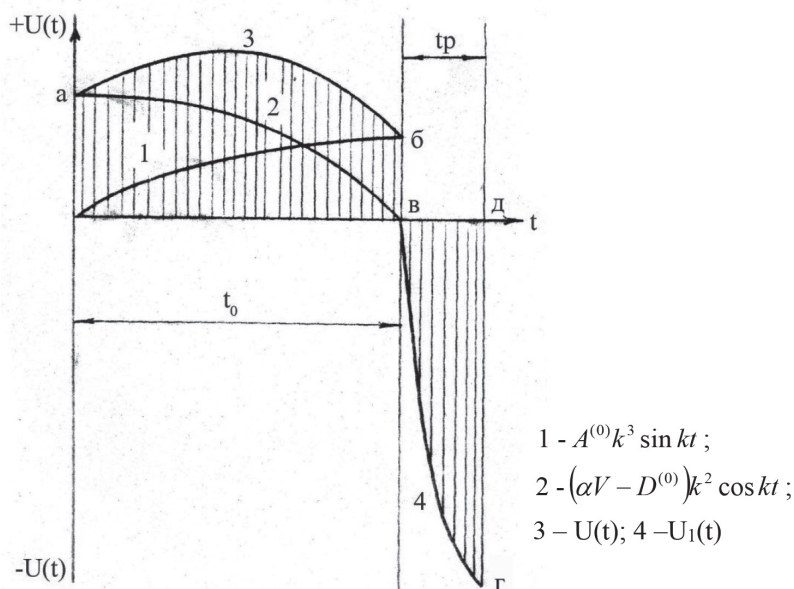


Рис. 7. Диаграмма изменения управляющего воздействия при движении без сопротивления
 Fig. 7. Chart of change in control action in motion without resistance

чале и конце фаз обратного и рабочего хода. При различных режимах движения эти отрезки, как и текущие значения диаграммы, изменяют свою величину в соответствии с величинами коэффициентов, определяющих параметры гидроударной системы. При этом характер составных элементов диаграммы и ее конечного вида не меняется.

Полученная диаграмма также показывает, что на ее основе могут быть получены частные случаи, базирующиеся на определенных допущениях и предположениях. Действительно, параметры движения основного исполнительного элемента могут быть подобраны таким

образом, чтобы кривая 3 обращалась в прямую, параллельную оси абсцисс и характеризующую постоянство управляющего воздействия в фазе обратного хода. При достаточно малой продолжительности фазы рабочего хода t_p нижняя часть диаграммы может быть с достаточной степенью приближения заменена прямоугольником, характеризующим постоянство управляющего воздействия в фазе рабочего хода. Эти обстоятельства согласуются с результатами исследований высокочастотных гидроударных систем [12, 13] являющимися, таким образом, частным случаем приведенных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smirnov Yu. M., Kenzhin B. M., Smakova N. S. Model of interaction vibration-seismic array module with carbon and the results of its research / International Conference: Science and Education in XXI century. December 1, 2014, Bozeman, Montana, USA, pp. 186–189.
2. Smirnov Yu. M., Kenzhin B. M. Special features of processing and interpreting mining seismic acoustic information / Modern Technologies of mineral resources development. Collection of articles. Lambert Academic Publishing, 2012, pp. 1124–128.

3. Smirnov Yu. M., Kenzhin B. M., Zhurunova M. A. The results of «vibration-seismic-module-solid massif-disturbance» system simulation modeling // *Eurasian Physical Technical Journal*, 2011, Vol. 8, No 1 (15). Pp. 42 – 48.

4. Городилов Л. В., Вагин Д. В., Пашина О. А. Разработка методики выбора параметров гидроударных систем объемного типа // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 1. – С. 87 – 94.

5. Lu X.-Y. The fatigue behavior study of intelligent tower crane by finite element theory // *International Journal of Control and Automation*. 2015. Vol. 8. Issue 10, pp. 125 – 134.

6. Fan X.-N., Zhi B. Design for a crane metallic structure based on imperialist competitive algorithm and inverse reliability strategy // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2017, Vol. 30, Issue 4, pp. 900 – 912.

7. Briot S., Goldsztejn A. Topology optimization of industrial robots: Application to a five-bar mechanism // *Mechanism and Machine Theory*. 2018, Vol. 120, pp. 30 – 56.

8. Бобцов А. А. Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу. – СПб.: Наука, 2011. – 173 с.

9. Томчина О. П., Горлатов Д. В., Томчин Д. А., Свенцицкая Т. А. Алгоритм адаптивного управления механическими системами с неявной эталонной моделью и фильтрацией // *Информатика и системы управления*. – 2018. – № 3(57). – С. 124 – 130.

10. Wand C., Lin Y. Decentralized adaptive tracking control for a class of interconnected nonlinear time-varying systems // *Automatika*. 2015. Vol. 54, pp. 16 – 24.

11. Томчина О. П., Поляхов Д. Н., Токарева О. И., Фрадков А. Л. Адаптивное управление нестационарными нелинейными объектами на основе алгоритмов скоростного градиента // *Информационно-управляющие системы*. – 2019. – № 3(100). – С. 37 – 44.

12. Actrom K. J., Willenmark K. B. Adaptive control. Courier Corporation, 2013, 574 p.

13. Рустамов Г. А., Фархадов В. Г., Рустамов Р. Г. Исследование K_{∞} -робастных систем при ограниченном управлении // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2018. – Т. 19. – № 11. – С. 699 – 706. **ПАБ**

REFERENCES

1. Smirnov Yu. M., Kenzhin B. M., Smakova N. S. Model of interaction vibration-seismic array module with carbon and the results of its research. *International Conference: Science and Education in XXI century*. December 1, 2014, Bozeman, Montana, USA, pp. 186 – 189.

2. Smirnov Yu. M., Kenzhin B. M. Special features of processing and interpreting mining seismic acoustic information. *Modern Technologies of mineral resources development. Collection of articles*. Lambert Academic Publishing, 2012, pp. 1124 – 128.

3. Smirnov Yu. M., Kenzhin B. M., Zhurunova M. A. The results of «vibration-seismic-module-solid massif-disturbance» system simulation modeling. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2011, Vol. 8, No 1 (15). Pp. 42 – 48.

4. Gorodilov L. V., Vagin D. V., Pashina O. A. Selection procedure of parameters for positive-displacement hydraulic percussion systems. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no 1, pp. 87 – 94. [In Russ].

5. Lu X.-Y. The fatigue behavior study of intelligent tower crane by finite element theory. *International Journal of Control and Automation*. 2015. Vol. 8. Issue 10, pp. 125 – 134.

6. Fan X.-N., Zhi B. Design for a crane metallic structure based on imperialist competitive algorithm and inverse reliability strategy. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2017, Vol. 30, Issue 4, pp. 900 – 912.

7. Briot S., Goldsztejn A. Topology optimization of industrial robots: Application to a five-bar mechanism. *Mechanism and Machine Theory*. 2018, Vol. 120, pp. 30 – 56.

8. Bobtsov A. A. *Adaptivnoe i robastnoe upravlenie neopredelennymi sistemami po vykhodu* [Adaptive and robust control over uncertain systems based on outputs], Saint-Petersburg, Nauka, 2011, 173 p.

9. Tomchina O.P., Gorlatov D.V., Tomchin D.A., Svetsitskaya T.A. Adaptive control algorithms for mechanical systems with fuzzy master model and filtration. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2018, no 3(57), pp. 124–130. [In Russ].

10. Wand C., Lin Y. Decentralized adaptive tracking control for a class of interconnected nonlinear time-varying systems. *Automatika*. 2015. Vol. 54, pp. 16–24.

11. Tomchina O.P., Polyakhov D.N., Tokareva O.I., Fradkov A.L. Adaptive control over dynamic linear objects based on velocity gradient algorithms. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2019, no 3(100), pp. 37–44. [In Russ].

12. Actrom K.J., Willenmark K.B. *Adaptive control*. Courier Corporation, 2013, 574 p.

13. Rustamov G.A., Farkhadov V.G., Rustamov R.G. Analysis of K-robust systems under limited control. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2018. Vol. 19, no 11, pp. 699–706. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смирнов Юрий Михайлович¹ — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: smirnov_y_m@mail.ru,

Кенжин Болат Маулетович — д-р техн. наук, профессор, директор, ТОО «Карагандинский машиностроительный консорциум», Казахстан, e-mail: kbmksz@mail.ru,

Смакова Нургуль Сериковна¹ — докторант, e-mail: nuri_5@mail.ru,

Журунова Майраш Ахмедиевна¹ — инженер, e-mail: mairashka@mail.ru,

¹ Карагандинский государственный технический университет, Казахстан.

Для контактов: Смирнов Ю.М., e-mail: smirnov_y_m@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.M. Smirnov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Head of Chair, e-mail: smirnov_y_m@mail.ru,

B.M. Kenzhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director, Karaganda Machine-Building Consortium,

Karaganda, Kazakhstan, e-mail: kbmksz@mail.ru,

N.S. Smakova¹, Doctoral Candidate, e-mail: nuri_5@mail.ru,

M.A. Zhurunova¹, Engineer, e-mail: mairashka@mail.ru,

¹ Karaganda State Technical University, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Corresponding author: Yu.M. Smirnov, e-mail: smirnov_y_m@mail.ru.

Получена редакцией 30.01.2020; получена после рецензии 06.03.2020; принята к печати 20.05.2020.

Received by the editors 30.01.2020; received after the review 06.03.2020; accepted for printing 20.05.2020.

