

## ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 51-74

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «БУРОВОЙ СТАНОК – ШАРОШЕЧНОЕ ДОЛОТО – ГОРНАЯ ПОРОДА» В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Пимонов Александр Григорьевич<sup>1,2</sup>,  
доктор техн. наук, профессор, научн. сотр., e-mail: pag\_vt@kuzstu.ru

Шигина Анна Александровна<sup>3</sup>,  
аспирант, ассистент, e-mail: shigina\_a@mail.ru

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>2</sup>Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 630000, Россия, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 17

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет, 660025, Россия, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3

**Аннотация:** Приведены результаты исследований процесса образования и наложения гармоник ударной нагрузки и взаимосвязей параметров функционирования системы при различных условиях нагружения с учетом адаптивного элемента, сглаживающего гармоники ударной нагрузки при прохождении пород с различными значениями показателя буримости. Определено, что адаптивный элемент необходим для своевременного реагирования системы на изменения свойств объекта воздействия и поддержания параметров модели в процессе ее функционирования в оптимальном соотношении.

Разработанная методика учитывает особенности, характер взаимосвязей параметров функционирования исследуемой системы с адаптивным элементом и их изменение в условиях неопределенности. С использованием разработанных параметрических алгоритмов получены зависимости стойкости долот, показателя буримости и свойств породы с учетом адаптивного элемента, что позволяет оценить математическую модель функционирования системы и определить ее оптимальные параметры.

Проведено исследование модели процесса функционирования системы на адаптивность с использованием параметрических алгоритмов с учетом априорной информации. Анализ установленных зависимостей показал, что исследуемая модель системы способна быстро подстраивать свои параметры и эффективно выполнять заданные функции в достаточно широком диапазоне непредсказуемо изменяющихся условий.

**Ключевые слова:** моделирование, техническая система, параметры функционирования, идентификация, неопределенность

#### Введение

В настоящее время отсутствуют методики построения, анализа и оценки математической модели системы «буровой станок – шарошечное долото – горная порода» (С – Д – П) с учетом адаптивного элемента, функционирующей в условиях неопределенности (недостаточного количества информации об изменении физико-механических свойств горных пород), что является научной проблемой, имеющей большое значение для народного хозяйства<sup>1</sup>.

Выбор модели, описывающей изменение показателей эффективности функционирования всей системы на основе исследуемых особенностей и характера взаимосвязей ее параметров функционирования, является наиболее ответственным и сложным этапом

моделирования [1 – 4]. Упрощение модели приводит к уменьшению степени ее адекватности.

Разработка методики расчёта, исследование особенностей и установление взаимосвязей параметров математической модели процесса бурения с учетом адаптивного элемента в системе позволяет существенно сократить время определения статических и динамических характеристик объекта, комплексно оценить область их применения и будущие состояния исследуемой технической системы, увеличить точность определения и поддержания оптимальных режимных параметров в условиях неопределенности. Таким образом, решение указанных задач будет способствовать повышению эффективности функционирования всей системы.

#### Методика исследования

В исследуемой системе особое влияние на эффективность ее функционирования в течение всего технологического процесса оказывают такие параметры, как усилие подачи, частота вращения, устройство и

<sup>1</sup> Статья подготовлена в рамках исследования, выполняемого при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-31-51007 мол\_нр)

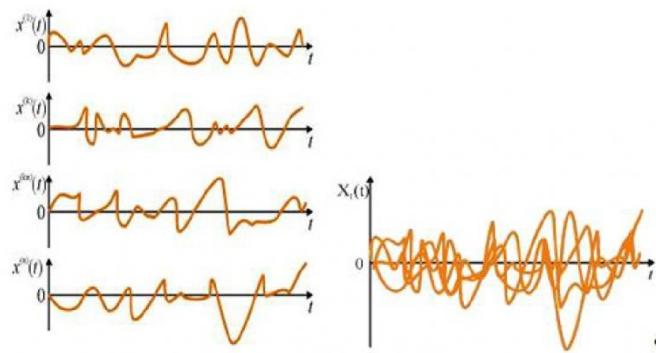


Рис. 1. Образование и наложение гармоник ударной нагрузки в ходе технологического процесса

свойства материалов рабочего органа и другие режимные параметры, а также непрогнозируемые ударные нагрузки, возникающие вследствие изменения свойств объекта воздействия (физико-механических свойств и прочностных характеристик горных пород, выраженных через показатель буримости) [5].

В условиях неопределенности и неполной информации о свойствах породы при моделировании процессов [6–8] необходимо использовать среднестатистические данные, включающие показатель буримости и его изменение, количество и размеры областей с изменяющимися физико-механическими свойствами. Максимально допустимое усилие подачи рабочего органа бурового станка является величиной переменной и изменяется соответственно показателю буримости и структуры массива вследствие модулирования напряжения в элементах технической системы [9]. Величина режимного параметра [10] определяется в зависимости от энергии, которая необходима для разрушения горной породы [11] в долю времени.

В качестве адаптивного элемента системы С–Д–П выступает адаптивный вращательно-поддающий механизм [12], сглаживающий все гармоники ударной нагрузки длительностью более 0,01 с при прохождении трещин и пограничных зон пород с различными значениями показателя буримости, отслеживающий изменения свойств объекта воздействия и поддерживающий параметры модели в процессе функционирования системы в оптимальном соотношении.

Напряжение в элементах технической конструкции без адаптивного элемента с учетом ударных нагрузок, возникающих при увеличении показателя буримости, находится из следующего выражения [13]:

$$\sigma_{i.l.r}^{\Sigma} = 600 \cdot 3 \sqrt{\frac{F_r}{z \cdot D_r \cdot L_r}} \cdot \frac{2(v_d + v_s/2)}{2(v_d + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2I_d^1 + 2\Delta I_d}{2I_d^1 + \Delta I_d} \cdot k_{ind}, \quad (1)$$

где  $F_r$  – радиальное усилие, прилагаемое к подшипнику, Н;  $z$  – количество тел качения в подшипнике;  $D_r$  – диаметр ролика, мм;  $L_r$  – длина ролика, мм;  $v_d$  – скорость бурения при заданных свойствах горной породы, усилии подачи и скорости вращения бурового органа, м/с;  $v_s$  – скорость опускания индентора

шарошки на забой, м/с;  $I_d$  – показатель буримости;  $k_{ind}$  – коэффициент формы индентора ( $k_{ind} = 0,79$  для индентора, имеющего форму закругленного цилиндра).

Процесс образования и наложения гармоник ударной нагрузки представлен на рис. 1.

Амплитуда сглаженной гармоники ударной нагрузки зависит от времени распространения импульса удара:

$$t = \sqrt{\frac{2l}{E/\rho}}, \quad (2)$$

где  $l$  – путь, пройденный ударным импульсом, м;  $E$  – модуль упругости материала, по которому распространяется ударный импульс, Па;  $\rho$  – плотность материала, по которому распространяется ударный импульс, кг/м<sup>3</sup>.

В определенном масштабе форма ударной волны может быть представлена в виде сегмента окружности, как показано на рис. 2. Тогда по оси ординат может быть отложена относительная величина мощности  $W$  энергии, преобразуемой в механическую в данный момент времени. А интеграл мощности за период времени  $t$  равен относительной величине работы или энергии, которая преимущественно направлена на разрушение опор качения долота. Данная работа может быть представлена в виде площади фигуры, ограниченной дугой окружности с центром  $O$ , радиусом  $R$  и хордой  $t_1$ , лежащей на оси абсцисс.

Энергия поглощается электромагнитной связью, и ударная волна сглаживается в течение 10 мкс. Таким образом, энергия, преобразованная в механическую, показана на рис. 2 в виде площади фигуры, ограниченной дугой окружности с центром  $O_1$ , радиусом  $R_1$  и хордой  $t_1$ , лежащей на оси абсцисс. Угол  $\phi$ , образованный касательной к дугам, исходящим из начала координат, и осью абсцисс, одинаковый для обоих описанных случаев, поскольку в начальный момент времени  $t = 0$  мощность ударной волны зависит только от усилия, скорости подачи и свойств объекта воздействия. Отсюда, выражение для относительной величины энергии ударной волны без адаптивного элемента:

$$E_{sh} = \frac{t^2}{8 \cdot (\sin \varphi)^2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi \right), \quad (3)$$

где  $E_{sh}$  – относительная величина энергии ударной волны при взаимодействии бурового инструмента с горной породой;  $t$  – время распространения ударной волны без аддитивного элемента, мкс.

Выражение для относительной величины энергии ударной волны с аддитивным элементом:

$$E_{sh}^a = \frac{t_1^2}{8 \cdot (\sin \varphi)^2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi \right), \quad (4)$$

где  $t_1$  – время распространения ударной волны с аддитивным элементом, мкс.

Таким образом, при подаче рабочего органа аддитивным элементом максимально допустимое усилие подачи определяется из допустимых нагрузок на элементы долот и отношения энергии ударной волны с аддитивным элементом и без него. Данный элемент позволяет оптимально использовать случайные возмущения, которые при отсутствии контроля приводят к неэффективным затратам энергии и снижают ресурс системы.

Для дальнейшего исследования идентификации параметров рассматриваемой модели на аддитивность в условиях неопределенности [14] приводится методика, учитывающая изменение статистических характеристик непрерывных случайных величин (показатели буримости, трещиноватость, слоистость горной породы), в основе которой лежат параметрические алгоритмы.

С учетом величины напряжения в элементах долот и выражений (3) и (4) допустимое максимальное усилие подачи аддитивным элементом определяется по формуле:

$$\left[ P_{ax}^a \right] = 6 \cdot z \cdot D_r \cdot L_r \cdot \frac{\left[ \sigma_{i.l.r}^\Sigma \right]}{600 \left( \left( \frac{2(v_d + v_s/2)}{2(v_d + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2I_d^1 + 2\Delta I_d}{2I_d^1 + \Delta I_d} - 2 \right) \cdot \frac{t_1^2}{t^2} + 2 \right) \cdot k_{ind}}. \quad (5)$$

Частота вращения с применением аддитивного элемента может быть найдена из выражения:

$$\left[ n_{rot} \right] = \frac{0,94 \cdot N}{10^8 \cdot \pi \cdot D_l^3 \cdot I_d \cdot h} \cdot \left( \left( \frac{2I_d^1 + 2\Delta I_d}{2I_d^1 + \Delta I_d} - 1 \right) \cdot \frac{t_1^2}{t^2} + 1 \right) \cdot k_{ind}, \quad (6)$$

где  $N$  – мощность, передаваемая для разрушения горной породы;  $h$  – выступающая высота индентора, м.

Исходя из представленных выражений, ударная составляющая уменьшится. Напряжение в элементах технической конструкции с учетом аддитивного элемента в системе определяется следующим образом:

$$\sigma_{i.l.r(ad)}^\Sigma = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_r \cdot L_r} \cdot k_{ind}} \cdot \left( \left( \frac{2(v_d + v_s/2)}{2(v_d + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2I_d^1 + 2\Delta I_d}{2I_d^1 + \Delta I_d} - 2 \right) \cdot \frac{t_1^2}{t^2} + 2 \right). \quad (7)$$

В случае применения аддитивного элемента максимально допустимое усилие подачи и скорость могут быть увеличены на 30 – 40 % в связи с большим временем прохождения ударной волны.

Представленные выражения для расчета напряжений позволяют определить число циклов до разрушения элементов при различных условиях нагружения.

При этом можно выделить три вида условий нагружения:

1. Бурение однородной породы с приблизительно одинаковыми свойствами или изменением показателя буримости в пределах  $\Delta I_d < 1$ . Технологический процесс сопровождается только циклической нагрузкой с максимальными напряжениями в элементах технической конструкции с учетом коэффициента формы инденторов  $k_{ind}$ .

2. Бурение слоистой породы характеризуется значительными ударными нагрузками. Чтобы определить количество циклов нагружения при переходе границы между слоями породы с разными физико-механическими свойствами, необходимо учитывать количество слоев породы на один погонный метр. Значение этого показателя варьируется от 0 до 20 и более. Максимальные напряжения для данных условий нагружения находятся из выражения (1).

3. Бурение трещиноватой породы характеризует-

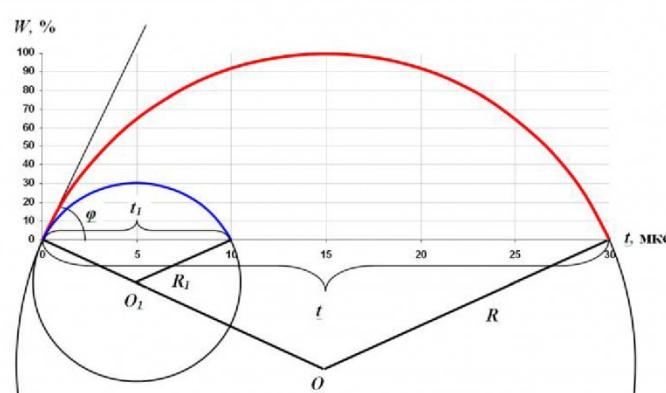


Рис. 2. Процесс распространения и сглаживание ударной волны при ее длительности более 0,01 с

ся значительными ударными нагрузками. Количество трещин на один погонный метр скважины приблизительно находится в пределах от 0 до 20. Однако в выражении для стойкости долота при бурении слоистых и трещиноватых пород должно учитываться абсолютное значение количества трещин или слоев. В данных условиях нагружения элементы конструкции испытывают суммарную циклическую нагрузку. Максимальные напряжения для данных условий нагружения также находятся из выражения (1). Условно можно принять, что в данный момент показатель буримости снижается до нуля и возрастает до прежнего значения. В то время как прохождение границы между слоями сопровождается скачком показателя буримости  $\Delta I_d < I_d$ .

Для определения стойкости долота, характеризующегося всеми тремя условиями нагружения, необходимо определить доли от общего количества циклов нагружения элементов долота [15], приходящиеся на бурение однородной  $\eta_h$ , слоистой  $\eta_{r,l}$  и трещиноватой породы  $\eta_{cr}$  соответственно:

$$\begin{aligned} \eta_h &= 1 - \eta_{r,l} - \eta_{cr}; \quad \eta_{r,l} = \frac{n_{r,l} \cdot n_t^{r,l}}{n_{rot} \cdot \frac{D_1}{D_{b,c}^{\max}}} \cdot v_d; \\ \eta_{cr} &= \frac{n_{cr} \cdot n_t^{cr}}{n_{rot} \cdot \frac{D_1}{D_{b,c}^{\max}}} \cdot v_d, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $n_{r,l}$  – количество границ между слоями породы с разными физико-механическими свойствами на один погонный метр, м<sup>-1</sup>;  $n_{cr}$  – количество трещин в горной породе на один погонный метр, м<sup>-1</sup>;  $n_t^{r,l}$  – число оборотов долота, необходимое для проходки границы между слоями породы;  $n_t^{cr}$  – число оборотов долота, необходимое для проходки трещины в массиве породы;  $v_d$  – скорость бурения при имеющихся свойствах горной породы, усилием подачи и скоростью вращения бурового органа, м/мин;  $n_{rot}$  – частота вращения шарошечного долота, об/мин;  $D_1$  – диаметр шарошечного долота, м;  $D_{b,c}^{\max}$  – максимальный диаметр долота, м.

Число оборотов долота, необходимое для проходки границы между слоями или трещины в массиве породы, определяется из следующих выражений:

$$n_t^{r,l} = \delta_{r,l} \cdot \frac{n_{rot}}{v_d}; \quad n_t^{cr} = \delta_{cr} \cdot \frac{n_{rot}}{v_d}, \quad (9)$$

где  $\delta_{r,l}$  – толщина пограничного слоя или его размер, м;  $\delta_{cr}$  – толщина трещины или ее размер, м.

Таким образом, суммарное количество циклов до разрушения элементов конструкции при различных условиях нагружения определяется из выражения:

$$L_{\Sigma} = L_h \cdot \eta_h + L_{fol} \cdot \eta_{fol} + L_{fis} \cdot \eta_{fis}, \quad (10)$$

где  $L_h$  – количество циклов до разрушения элементов

конструкции при бурении однородной породы;  $L_{fol}$  – количество циклов до разрушения элементов конструкции при бурении слоистой породы;  $L_{fis}$  – количество циклов до разрушения элементов конструкции при бурении трещиноватой породы.

Для условий бурения однородной породы выражение для ресурса элементов конструкции примет вид:

$$L_h = 10^6 \left( \frac{\sigma_{u,s}}{\sigma_{i,l,r}^{\max}} \right)^{10/3}, \quad \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{i,l,r}^{\max} - \sigma_r^{\max}}{2} + \frac{\sigma_{-1} \cdot \sigma_{i,l,r}^{\max} + \sigma_r^{\max}}{2}}, \quad (11)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости материала, МПа;  $\sigma_{u,s}$  – предел прочности материала, МПа;  $\sigma_{i,l,r}^{\max}$  – максимальное напряжение в элементах технической конструкции;  $\sigma_r^{\max}$  – максимальное напряжение, возникающее при ударах при увеличении крепости горной породы, МПа.

Для условий бурения слоистой породы выражение (11) примет вид:

$$L_{fol} = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{u,s}}{\sigma_{i,l,r}^{\Sigma}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{i,l,r}^{\Sigma} - \sigma_r^{\max}}{2} + \frac{\sigma_{-1} \cdot \sigma_{i,l,r}^{\Sigma} + \sigma_r^{\max}}{2}}, \quad (12)$$

Поскольку минимальное напряжение цикла  $\sigma_{\min} = 0$ , для условий бурения трещиноватой породы  $L_{fis}$  определяется по формуле:

$$L_{fis} = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{u,s}}{\sigma_{i,l,r}^{\Sigma}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{i,l,r}^{\Sigma} + \sigma_{-1} \cdot \sigma_{i,l,r}^{\Sigma}}{2} - \frac{\sigma_{u,s}}{2}}. \quad (13)$$

С учетом представленных уравнений определения ресурса элементов конструкции долота можно определить его расчетную стойкость:

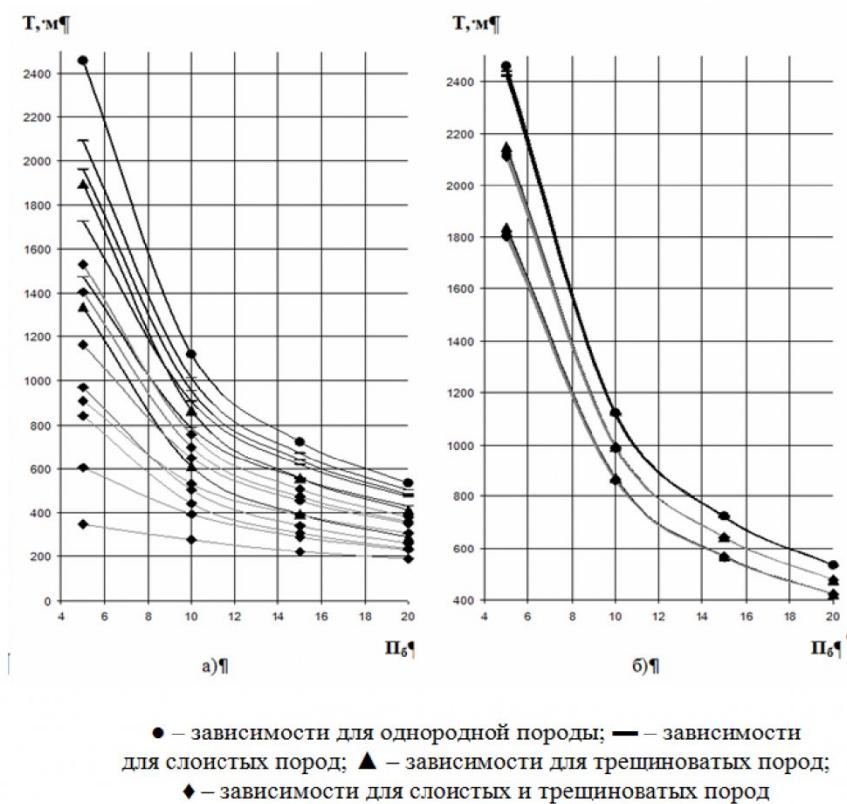
$$T = \frac{L_{\Sigma}}{2 \cdot n_{rot} \cdot 1,7} \cdot v_d. \quad (14)$$

С использованием разработанной методики получены зависимости стойкости долот и показателя буримости, слоистости и трещиноватости с учетом адаптивного элемента (рис. 3).

Необходимо отметить, что при бурении породных массивов со средней трещиноватостью и слоистостью с введенным в систему адаптивным элементом стойкость долот увеличивается более чем в 2 раза, с высокой слоистостью – до 65%, с высокой трещиноватостью – более чем в 5 раз.

#### Результаты и обсуждение

Выполнены исследования, позволившие установить принципы взаимосвязи параметров функционирования системы С–Д–П с учетом адаптивного элемента, на основе которой может быть выбран за-



*Rис. 3. Стойкость долота  $T$  в зависимости от значения показателя буримости  $P_6$ :*  
*а) – кривые для обычного жесткого (гидравлического) элемента системы;*  
*б) – кривые для аддитивного элемента системы С–Д–П*

кон управления, обеспечивающий заданное функционирование системы. Таким образом, установленные с помощью разработанных параметрических алгоритмов зависимости, учитывающие изменение статистических характеристик непрерывных случайных величин, и построенные по ним графики (рис. 3), показывают, что идентификация параметров модели функционирования системы «буровой станок – шарошечное долото – горная порода» в условиях неопределенности аддитивна. Своевременное изменение режимных параметров (скорости подачи, осевого усилия) за счет аддитивного элемента обеспечивает повышение скорости бурения на 30 – 40 % без снижения стойкости долота.

Представленная методика позволяет проанализировать и оценить математическую модель функционирования системы С – Д – П, в том числе соотношение таких критериев оптимальности, как производительность технологического процесса и ресурс долота, в условиях неопределенности. Разработанная методика учитывает установленные особенности, характер взаимосвязей параметров функционирования исследуемой системы с аддитивным элементом и изменение статистических характеристик непрерывных случайных величин.

### Заключение

В результате исследования проведен анализ взаимосвязей параметров функционирования системы С – Д – П с учетом аддитивного элемента. Проведены исследования процесса образования и наложения гармоник ударной нагрузки. Исследования позволили

установить, что амплитуда сглаженной гармоники ударной нагрузки зависит от времени распространения импульса удара, а максимально допустимое усилие подачи определяется из допустимых нагрузок на элементы долот и отношения энергии ударной волны с аддитивным элементом и без него.

Разработана методика расчета и установлены взаимосвязи параметров математической модели процесса бурения с учетом аддитивного элемента в системе. С использованием заложенных в данную методику разработанных параметрических алгоритмов получены зависимости стойкости долот, показателя буримости и свойств породы с учетом аддитивного элемента. Методика учитывает изменение статистических характеристик непрерывных случайных величин и предназначена для определения оптимальных параметров функционирования модели в условиях неопределенности.

Модель функционирования системы исследована на аддитивность с помощью параметрических алгоритмов. Анализ установленных зависимостей показал, что исследуемая модель системы способна быстро подстраивать свои параметры и эффективно выполнять заданные функции в достаточно широком диапазоне непредсказуемо изменяющихся условий. При этом многопараметрический расчет целесообразно производить при помощи специального программного обеспечения.

Применение приведенной методики позволит повысить эффективность функционирования системы С – Д – П и снизить эксплуатационные затраты при

оптимальной производительности в условиях неопределенности. Установленные параметры функционирования исследуемой системы и их взаимосвязи позво-

ляют в дальнейшем исследовать математическую модель системы на точность и адекватность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинов Ю. Ф. Методы математического моделирования [Электронный ресурс] / Ю. Ф. Блинов, В. В. Иванцов, П. В. Серба. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012. – 42 с. – Режим доступа: <http://sep.tti.sfu.edu.ru/russian/tmina/education/literatura/mmm1.pdf>.
2. Воронин А. В. Моделирование технических систем. – Томск: ТПУ, 2013. – 130 с.
3. Запорожцев А. В. Моделирование технических систем // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8 (6). – С. 1288-1294.
4. Vespignani A. Modelling dynamical processes in complex socio-technical systems // Nature Physics. – 2012. – No. 8. – P. 32-39.
5. Шубин Р. А. Надёжность технических систем и техногенный риск. – Тамбов: ТГТУ, 2012. – 80 с.
6. Щербатов И. А. Математическое моделирование сложных многокомпонентных систем / И. А. Щербатов, И. О. Проталинский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – № 1 (20). – С. 17-26.
7. Shcherbatov I. A. Classification of pure formalized complex multicomponent technical systems under conditions of uncertainty // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2012. – № 2. – С. 9-12.
8. Hiroki, S. Introduction to the modeling and analysis of complex systems // Milne Library State University of New York at Geneseo 14454. – New York: Open SUNY Textbooks, 2015. – 479 p.
9. Шигин А. О. Напряжения и стойкость шарошечных долот при бурении сложноструктурных массивов горных пород / А. О. Шигин, А. В. Гилёв, А. А. Шигина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 4. – С. 325-333.
10. Шигин А. О. Разработка идеализированной модели бурения горных пород с различными физико-механическими свойствами / А. О. Шигин, А. В. Гилёв // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3 (3). – С. 665-667.
11. Khan G. N. Discrete element modeling of rock failure dynamics // Journal of Mining Science. – 2012. – No. 48 (1). – P. 96-102.
12. Шигин А. О. Исследование режимов работы электромагнитного привода подачи бурового станка / А. О. Шигин, А. В. Гилёв // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 4. – С. 101-111.
13. Шигин А. О. Прогнозируемый ресурс шарошечных долот при бурении сложноструктурных горных массивов / А. О. Шигин, А. А. Шигина // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 2. – С. 29-33.
14. Gong W. Parameter identification of an SOFC model with an efficient, adaptive differential evolution algorithm / W. Gong, Z. Cai, J. Yang, X. Li, L. Jian // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – No. 39 (10). – P. 5083–5096.
15. Ступина А. А. Анализ эффективности функционирования многопараметрической системы / А. А. Ступина, А. А. Шигина, А. О. Шигин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2013. – № 2 (48). – С. 94-100.

Поступило в редакцию 27.06.2015

UDC 51-74

## MATHEMATICAL MODELING OF SYSTEM FUNCTIONING "BORING RIG – ROLLER BIT – ROCK" IN CONDITION OF UNCERTAINTY

Pimonov Aleksandr G.<sup>1,2</sup>,  
D.Sc (Engineering), Professor, Researcher, e-mail: pag\_vt@kuzstu.ru  
Shigina Anna A.<sup>3</sup>,  
post-graduate student (Engineering), assistant, e-mail: shigina\_a@mail.ru

<sup>1</sup>T. F. Gorbachev Kuzbass state technical university, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation.

<sup>2</sup>Institute of economics and industrial engineering, Siberian branch of the Russian academy of sciences, 17 avenue Lavrent'eva, Novosibirsk, 630000, Russian Federation.

<sup>3</sup>Siberian Federal University, 3 Vuzovsky Lane, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation.

**Abstract:** The investigation results of the generation process and harmonics superimposition of the impact and interrelations of system functioning parameters under different loading conditions taking into account the adaptive element, a smoothing harmonic shock during the boring of rocks with different drillability values. It is determined that adaptive element necessary for timely response of the system to changes in the working object properties and maintaining the model parameters in the functioning process in an optimum ratio.

The developed method takes into account the characteristics, nature of the interrelationships between the system functioning parameters with adaptive element and change under condition of uncertainty. Using the developed parametric algorithms, the resulting dependence of the bits endurance, indicator of drillability and rock properties based adaptive element that allows us to estimate the mathematical model of system functioning and to determine its optimal parameters.

Investigated the adaptability of system functioning process model using parametric algorithms taking into account a priori information. The analysis of the determinated dependencies showed that investigated system model is able to quickly adjust it parameters and effectively perform assigned functions in a wide range of unpredictable changing conditions.

**Keywords:** modeling, technical system, parameters of functioning, identification, uncertainty.

## REFERENCES

1. Blinov, Ju. F. Metody matematicheskogo modelirovaniya [Jelektronnyj resurs] [Methods of mathematical modeling [Electronic resource]] / Ju. F. Blinov, V. V. Ivancov, P. V. Serba. Taganrog: "Southern Federal University", 2012. 42 p. – Rezhim dostupa [Access mode]: <http://fep.tti.sfedu.ru/russian/tmina/education/literatura/mmm1.pdf>. (rus)
2. Voronin, A. V. Modelirovanie tehnicheskikh sistem [Modeling of technical systems] / Tomsk: "Tomsk Polytechnic University", 2013. 130 p. (rus)
3. Zaporozhcev, A. V. Modelirovanie tehnicheskikh sistem [Modeling of technical systems] // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. 2014. № 8 (6). P. 1288-1294. (rus)
4. Vespignani, A. Modeling dynamical processes in complex socio-technical systems // Nature Physics. 2012. No. 8. – P. 32-39. (eng)
5. Shubin, R. A. Nadjozhnost' tehnicheskikh sistem i tehnogennyj risk [Reliability of technical systems and technogenic risk]. Tambov: "Tambov State Technical University", 2012. 80 p. (rus)
6. Shherbatov, I. A. Matematicheskoe modelirovaniye slozhnyh mnogokomponent-nyh sistem [Mathematical modeling of complex multicomponent systems] / I. A. Shherbatov, I. O. Protalinskij // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2014. № 1 (20). P. 17-26. (rus)
7. Shcherbatov, I. A. Classification of pure formalized complex multicomponent technical systems under conditions of uncertainty // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Bulletin of Astrakhan State Technical University]. 2012. No. 2. P. 9-12. (eng)
8. Hiroki, S. Introduction to the modeling and analysis of complex systems // Milne Library State University of New York at Geneseo 14454. – New York: Open SUNY Text-books, 2015. – 479 p. (eng)
9. Shigin, A. O. Naprijazhenija i stojkost' sharoshechnyh dolot pri burenii slozh-nostrukturnyh massivov gornyh porod [Tension and durability of roller bits when drilling in complex rock massifs] / A. O. Shigin, A. V. Gilev, A. A. Shigina // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [nauchno-tehnicheskij zhurnal] [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2013. № 4. P. 325-333. (rus)
10. Shigin, A. O. Razrabotka idealizirovannoj modeli burenija gornyh porod s razlichnymi fiziko-mehanicheskimi svojstvami [Development of idealized model of rocks boring with different physical and mechanical characteristics] / A. O. Shigin, A. V. Gilev // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. 2012. № 3 (3). P. 665-667. (rus)
11. Khan, G. N. Discrete element modeling of rock failure dynamics // Journal of Mining Science. 2012. No. 48 (1). P. 96-102. (eng)
12. Shigin, A. O. Issledovanie rezhimov raboty jeklktromagnitnogo privoda podachi burovogo stanka [The research of an electromagnetic axis motor system boring rig operating modes] / A. O. Shigin, A. V. Gilev // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2013. № 4. P. 101-111. (rus)
13. Shigin, A. O. Prognoziruemij resurs sharoshechnyh dolot pri burenii slozh-nostrukturnyh gornyh massivov [Predicted endurance of roller bits during the drilling of complex massifs] / A. O. Shigin, A. A. Shigina // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2014. № 2. P. 29-33. (rus)
14. Gong, W. Parameter identification of an SOFC model with an efficient, adaptive differential evolution algorithm / W. Gong, Z. Cai, J. Yang, X. Li, L. Jian // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. No. 39 (10). P. 5083-5096. (eng)
15. Stupina, A. A. Analiz jeffektivnosti funkcionirovaniya mnogoparametricheskoy sistemy [Analysis of multivariable systems functioning efficiency] / A. A. Stupina, A. A. Shigina, A. O. Shigin // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva [Bulletin of Siberian State Aerospace University n. a. M. F. Reshetnev]. 2013. № 2 (48). P. 94-100. (rus)