

УДК 622.23.05

**М.А. Лемешко, А.В. Трифонов**

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОГРАНИЧЕНИЙ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАШИНАМИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ**

*Приведены выражения для описания ограничений в управлении адаптивной машиной вращательного бурения, учитывающие прочностные, режимные и конструктивные особенности её исполнительного органа.*

*Ключевые слова: математическая модель, ограничения в управлении, адаптивные машины, вращательное бурение.*

**К**ак известно, условия оптимального бурения, для бурильных машин вращательного типа — усилие подачи  $F_p$  и частота вращения  $n_p$  описываются зависимостями [1]:

$$F_p = k_1 \times P_k^{2/3}, [\text{Н}]; n_p = k_2 / P_k^{2/3}, [\text{об/мин}]$$

Где  $P_k$  — контактная прочность, МПа;  $k_1, k_2$  — эмпирические коэффициенты (для  $P_k = 300 \dots 1400$ , МПа,  $k_1 = 100$ ,  $k_2 = 27,5 \cdot 10^3$ )

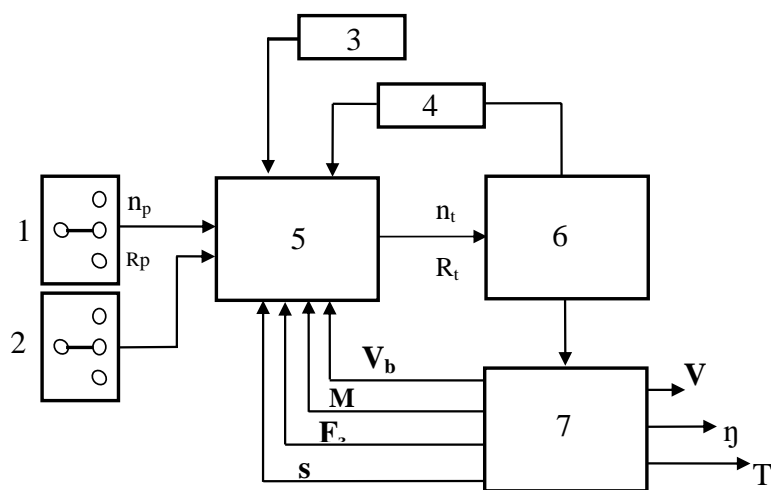
Управление режимами бурения осуществляется в пределах мощностных и прочностных ограничений, включая ограничение максимальной удельной подачи по условию заштыбовки зазора между штангой и стеной шпура, ограничение максимального усилия подачи по жесткости штанги и допустимому её искривлению, по прочности режущей части резца, по устойчивости манипулятора или буровой установки; ограничение на режимы бурения по температурной стойкости твердосплавной армировки резца, ограничение по скорости износа резцов до предельных площадок затупления, ограничение по мощности привода.

Сложность решения задачи по управлению режимами работы бурильной машины можно проиллюст-

рировать на структурной схеме процесса бурения, приведенной на рис. 1. Изменяющиеся физико — механические свойства буримого материала, износ режущей части обуславливают необходимость управления режимами бурения: частотой вращения штанги  $n_t$  и усилием подачи  $F_t$ , которые должны быть приближены к теоретически оптимальным  $n_p$  и  $F_p$  и учитывать показатели бурения  $M_{вп}$  (момент сопротивления вращению),  $V_б$  (скорость бурения) или скорость подачи  $V_{под}$ , а так же степень затупления  $F_з$  или стойкость  $T$  режущего инструмента, в реальном времени.

На рисунке приняты следующие обозначения:  $n_t$  — регулируемая частота вращения штанги,  $R_t$  — регулируемое усилие подачи,  $V_b$  — скорость бурения,  $M_R$  — момент сопротивления вращению,  $F_з$  — приведенная площадь затупления режущего инструмента,  $S$  — удельная подача (толщина стружки),  $\eta$  — критерий эффективности (например — себестоимость),  $T$  — стойкость режущего инструмента.

Рабочий процесс бурильных машин характеризуется двумя, связанными между собой, движениями исполнительного органа: вращением буриль-



**Рис. 1. Структурная схема процесса бурения:** 1 — условия рационального режима бурения, 2 — выбор критерия оптимизации, 3 — влияние физико-механических свойств буримого материала, 4 — условия ограничений, 5 — устройство управления, 6 — управляемые параметры бурения, 7 — процесс бурения

ной штанги и подачи её на буримый материал. Особенностью машин, имеющих адаптивный привод, является их способность автоматически поддерживать рациональные соотношения скоростей этих движений без дополнительных средств автоматики [2].

Для таких машин с гидравлической подачей в зависимости от крепости разрушаемого массива автоматически регулируется частота вращения и усилие гидродомкратов подачи [3].

Однако диапазон адаптивного управления вращательным бурением (область управления) ограничены рядом факторов, которые могут быть описаны совокупностью уравнений — математической моделью условий ограничения области управления.

Характерные для процесса бурения ограничения могут быть описаны уравнениями, связывающими соотношения скорости подачи (скорости бурения) и частоты вращения штанги.

За основу описания процесса вращательного бурения примем известное [1] уравнение:

$$R_{\text{под}} = p_k(C_3 F_{\text{зат}} + C_r S) \quad (1)$$

где  $R_{\text{под}}$  — расчетное усилие подачи,  $p_k$  — контактная прочность породы,  $C_3$  — коэффициент учитывающий давления по задней грани реза,  $C_r$  — геометрический параметр режущей кромки реза,  $S$  — удельная подача,  $F_{\text{зат}}$  — проекция площадки затупления.

$$\text{Откуда } S = \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}} \right),$$

Учитывая, что скорость подачи  $V_{\text{под}} = S \cdot n_t$ ,

$$V_{\text{под}} = \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}} \right) \cdot n_t \quad (2)$$

Составляем уравнения ограничений:

1. Ограничение по минимальному осевому усилию подачи  $R_{\text{мин}}$  (условие объёмного разрушения).

Принимая  $R_{\text{мин}} = 350f$ , и  $p_k = 44 \text{ ф}^{1,5}$

$$V_{\text{под}} = \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}} \right) \cdot n_t$$

$$V_{\text{под}} = \left( \frac{7,95}{C_r \cdot f^{0,5}} - \frac{C_3}{C_r} \cdot F_{\text{зат}} \right) n_t \quad (3)$$

2. Ограничение по минимальной подаче (по допустимому затуплению и условию устойчивости буровой машины).

$$S_{\min} = \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}}^{\text{пред}} \right) \cdot n_t$$

$$V_{\text{под}} = \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}}^{\text{пред}} \right) \cdot n_t \quad (4)$$

2. Ограничение по максимальному осевому усилию подачи (ограничение по условию ограничения жесткости штанги).

Аналогично:

$$V_{\text{под}}^{\max} = \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}^{\max}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}}^{\text{пред}} \right) \cdot n_t \quad (5)$$

При этом [1]:  $R_{\text{под}}^{\max} = 20 \text{ кН}$

3. Ограничение по максимальной подаче.

а. По устойчивости буровой установки

$$S_{\text{макс}}^1 = \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}^{\max}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}}^0 \right)$$

Значения  $R_{\text{макс}}$ ,  $C_r$ ,  $C_3$  — табулированы [1]

$$V_{\text{под}}^{\max} = \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}^{\max}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}}^0 \right) \cdot n_t \quad (6)$$

б. По условию прочности армировки режущей части

$$S_{\text{макс}}^2 = \frac{R_{\text{под}}^{\text{крит}}}{K_{\text{зп}} \cdot p_k \cdot C},$$

где  $K_{\text{зп}}$  — коэффициент запаса прочности;  $R_{\text{под}}^{\text{крит}}$ ,  $C$  — значения определяются конструкцией режущего инструмента [1]

$$V_{\text{под}}^{\max} = \frac{R_{\text{под}}^{\text{крит}}}{K_{\text{зп}} \cdot p_k \cdot C} \cdot n_t \quad (7)$$

в) По условию заклинивания штанги буровой мелочью[1]:

$$S_{\text{макс}} = m \cdot \sin \tau \times$$

$$\times (\sqrt{1,85 \cdot R_{\text{ш}} - 0,85 R_p} - 0,35 \cdot R_{\text{ш}}),$$

где  $m$  — число перьев реза,  $\tau$  — угол скола породы,  $R_{\text{ш}}$  — радиус шпура,  $R_p$  — радиус реза,  
 $\tau = f(p_k)$ , табулировано[1].

$$V_{\text{под}}^{\max} = [m \cdot \sin \tau \cdot n_t \times$$

$$\times (\sqrt{1,85 \cdot R_{\text{ш}} - 0,85 R_p} - 0,35 \cdot R_{\text{ш}})]. \quad (8)$$

4. Ограничение скорости вращения по условию сохранения температурной стойкости режущего инструмента):

$$\begin{cases} n_t \leq 4 \cdot 10^5 / p_k \text{ [']/мин} \\ n_t = n_{\text{макс}} < 2200/f ; f < 4 \\ n_t = n_{\text{макс}} < 700 - 50f ; f > 4 \end{cases} \quad (9)$$

б. Ограничение по мощности привода с учетом времени включения ( $B$ ):

$$S_{\text{пред}} = 5,85 \cdot 10^6 \cdot \frac{N \cdot \eta}{p_k \cdot B \cdot n_t}$$

$\eta$  — КПД привода.

$$V_{\text{под}}^{\max} = 5,85 \cdot 10^6 \cdot \frac{N \cdot \eta}{p_k \cdot B}. \quad (10)$$

Математические соотношения, выражающие эти ограничения, составляют математическую модель процесса ограничений в управлении вращательным бурением с учетом износа режущего инструмента.

Каждое из условий ограничивает соотношение скорости подачи и частоты (скорости) вращения штанги на забой в соответствии с параметрами режущего инструмента и условиями работы.

$$V_{\text{под}} > \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}} \right) \cdot n_t$$

$$V_{\text{под}} > \left( \frac{7,95}{C_r \cdot f^{0,5}} - \frac{C_3}{C_r} \cdot F_{\text{зат}} \right) n_t$$

$$V_{\text{под}} < \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}}^{\text{пред}} \right) \cdot n_t$$

$$V_{\text{под}}^{\text{max}} \leq \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}^{\text{max}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}}^{\text{пред}} \right) \cdot n_t$$

$$V_{\text{под}}^{\text{max}} \leq \frac{1}{C_r} \left( \frac{R_{\text{под}}^{\text{max}}}{p_k} - C_3 \cdot F_{\text{зат}}^0 \right) \cdot n_t$$

$$V_{\text{под}}^{\text{max}} \leq \frac{R_{\text{под}}^{\text{крит}}}{K_{\text{зп}} \cdot p_k \cdot C} n_t$$

$$V_{\text{под}}^{\text{max}} \leq 5,85 \cdot 10^6 \cdot \frac{N \cdot \eta}{p_k \cdot B}$$

$$n_t <= 4 \cdot 10^5 / p_k$$

$$n_t = n_{\text{max}} < 2200/f ; f < 4$$

$$n_t = n_{\text{max}} < 700 - 50f ; f > 4$$

Полученные зависимости являются основой для проектирования алгоритмов адаптивного управления или выбора критерия управления. Используя полученные связи можно определить границы рационального и возможного управления адаптивной машиной. Эти функциональные связи относятся к основному условию, определяющему возможность расширения адаптивных качеств горных машин, имеющих адаптивную структуру, а так же исполнительных органов с адаптивными качествами при других способах оптимизации процесса резания, например с использованием микропроцессорного управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ленченко В.В.* Основы выбора оптимальных режимов вращательного бурения // Механизация и электрификация горных работ: Сб. Науч. Тр. / Юж. — Рос. гос. техн. ун-т. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999. — с.21—31

2. *Дровников А.Н.* Теория и практика применения адаптивных механизмов. Ч.1, ч.2. / Новоч. политех. ин-т — Новочер-

касск. 1983. , деп. в ВИНТИ 5.12.83., 3 6570 -83Д и № 6571 -83Д, 445 с.

3. *Водяник Г.М., Рылеев Э.В., Дровников А.Н.* Исследование и разработка бурильной машины с автоматическим регулированием скорости подачи для сверления вертикальных шпуров до 2,5 м. Отчет по хоз. Дог. Работе №1340, ч.11, 111, 1968. Новочеркасск, НПИ.,266 с. **ПАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Лемешко М.А.* — кандидат технических наук, доцент, e-mail: lem-mikhail@ya.ru,

*Трифонов А.В.* — аспирант, e-mail: alexrulez-87@mail.ru,

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ).

