

Лемешко М.А., Трифонов А.В.

## 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 в соответствии с НИР по ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы». Ключевые слова: математическая модель, ограничения в управлении, адаптивные машины, вращательное бурение. Постановка проблемы. Для различных задач в геологии, горном деле, строительстве, при проходке туннелей и путепроводов используются бурильные машины. Одними из наиболее распространенных таких машин являются машины вращательного действия. Эффективность их эксплуатации зависит от соответствия режимов и параметров работы условиям эксплуатации. Относительно новым в решении такой задачи является разработка и применение адаптивного принципа управления процессом бурения, разработка адаптивных бурильных машин. Сложность решения задачи по управлению режимами работы бурильной машины можно проиллюстрировать 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  $M_{вр}$  (момент сопротивления вращению),  $V_b$  (скорость бурения) или скорость подачи-  $V_{под}$ , а также степень затупления  $F_z$  или стойкость  $T$  режущего инструмента, в реальном времени.

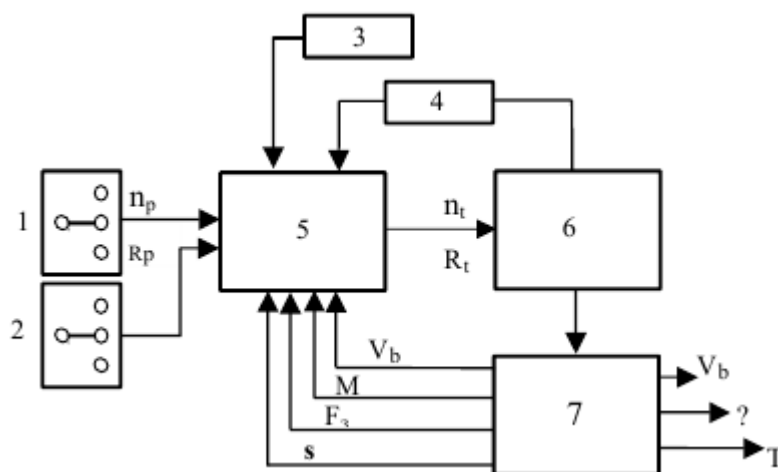


Рис. 1. Структурная схема процесса бурения: 1- условия рационального режима бурения, 2- выбор критерия оптимизации, 3 - влияние физико-механических свойств буримого материала, 4- условия ограничений, 5- устройство управления, 6- управляемые параметры бурения, 7- процесс бурения

На рисунке приняты следующие обозначения:  $n_t$  – регулируемая частота вращения штанги,  $R_t$  – регулируемое усилие подачи,  $V_b$  – скорость бурения,  $M_{вр}$  – момент сопротивления вращению,  $F_z$  – приведенная площадка затупления режущего инструмента,  $S$ – удельная подача (толщина

стружки),  $\eta$  – критерий эффективности (например себестоимость),  $T$  – стойкость режущего инструмента. Анализ последних исследований и публикаций. Как известно [1], условия оптимального бурения для бурильных машин вращательного типа – усилие подачи  $F_p$  и частота вращения  $n_p$  описываются зависимостями:

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

где  $P_k$  - контактная прочность буримого материала, МПа;  $k_1, k_2$  - эмпирические коэффициенты

(для  $P_k = 300...1400$ , МПа,  $k_1 = 100$ ,  $k_2 = 27,54103$ )

Управление режимами бурения осуществляется в пределах мощностных и прочностных ограничений, включая ограничение максимальной удельной подачи по условию заштыбовки зазора между штангой и стенкой шпура, ограничение максимального усилия подачи по жесткости штанги и допустимому её искривлению, ограничение максимального усилия подачи 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. Рабочий процесс бурильных машин характеризуется двумя связанными между собой движениями исполнительного органа: вращением бурильной штанги и подачей 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 регулируются частота вращения и усилие гидродомкратов подачи [3]. Однако диапазон адаптивного управления вращательным бурением (область управления) ограничены перечисленными выше факторами. При разработке и проектировании машин для бурения, наделенных адаптивными качествами, необходимо учитывать все ограничения в совокупности, а при разработке микропроцессорного управления требуется математическое описание этих ограничений, которые могут быть описаны совокупностью уравнений – математической моделью условий ограничения области управления.

Цель статьи. Составление математической модели ограничений адаптивного управления процессом вращательного бурения с учетом известных функциональных связей между режимами бурения и параметрами исполнительного органа. Материалы и результаты исследований. В статье изложен способ описания ограничений в их связи с основными режимными параметрами процесса бурения - скоростью подачи (скорости бурения) и частоты вращения штанги. За основу описания процесса вращательного бурения принята известная [1] эмпирическая зависимость:

$$R_{под} = p_k(C_3 F_{зат} + C_2 S),$$

где  $R_{под}$  – расчетное усилие подачи,  $p_k$  - контактная прочность породы,

$C_3$  – коэффициент, учитывающий давления по задней грани резца,

$C_2$  – геометрический параметр режущей кромки резца,

$S$  – удельная подача,

$F_{зат}$  – проекция площадки затупления

Откуда

$$S = \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}}{p_k} - C_3 \cdot F_{зат} \right),$$

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

$$V_{под} = \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}}{P_k} - C_3 \cdot F_{зам} \right) \cdot n_t$$

Составляем уравнения ограничений:

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

Принимая  $R_{min} = 350f$ , и  $p_k = 44 \cdot f^{1,5}$

$$V_{под} = \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}}{P_k} - C_3 \cdot F_{зам} \right) \cdot n_t ; \quad V_{под} = \left( \frac{7,95}{C_2 \cdot f^{0,5}} - \frac{C_3}{C_2} \cdot F_{зам} \right) n_t \quad (3)$$

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

$$S_{min} = \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}}{P_k} - C_3 \cdot F_{зам}^{пред} \right) \cdot n_t ; \quad V_{под} = \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}}{P_k} - C_3 \cdot F_{зам}^{пред} \right) \cdot n_t \quad (4)$$

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

Аналогично:

$$V_{под}^{max} = \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}^{max}}{P_k} - C_3 \cdot F_{зам}^{пред} \right) \cdot n_t \quad (5)$$

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

4. Ограничение по максимальной подаче.

а) по устойчивости буровой установки

$$S_{max}^1 = \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}^{max}}{P_k} - C_3 \cdot F_{зам}^0 \right)$$

Значения  $R_{max}$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – табулированы для наиболее часто применяемых буровых коронок [1];

$$V_{под}^{max} = \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}^{max}}{P_k} - C_3 \cdot F_{зам}^0 \right) \cdot n_t \quad (6)$$

б) по условию прочности армировки режущей части:

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

где  $K_{зп}$  – коэффициент запаса прочности;  $C$  – значения определяются конструкцией режущего инструмента [1]

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

в) по условию заклинивания штанги буровой мелочью:

$$S_{max}^3 = m \cdot \sin \tau \cdot \left( \sqrt{1,85 \cdot R_{ш}} - 0,85 R_p - 0,35 \cdot R_{ш} \right),$$

где  $m$  – число перьев резца,  $\tau$  – угол скола породы,  $R_{ш}$  – радиус шпура,  $R_p$  – радиус резца, табулировано [1].

$$V_{под}^{max} = [m \cdot \sin \tau \cdot n_t \cdot (\sqrt{1,85 \cdot R_{ш} - 0,85 R_p} - 0,35 \cdot R_{ш})] \quad (8)$$

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

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

6. Ограничение по мощности привода с учетом времени включения (В)

$$\begin{aligned} S_{пред} &= 5,85 \cdot 10^6 \cdot \frac{N \cdot \eta}{p_k \cdot B \cdot n_t} \\ V_{под}^{max} &= 5,85 \cdot 10^6 \cdot \frac{N \cdot \eta}{p_k \cdot B} \end{aligned} \quad (10)$$

Обобщая полученные функциональные связи ограничений по соотношению скорости подачи и частоты вращения, получаем систему, являющуюся математической моделью ограничений адаптивного управления машинами вращательного бурения:

$$\left\{ \begin{aligned} V_{под} &> \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}}{p_k} - C_3 \cdot F_{зам} \right) \cdot n_t \\ V_{под} &> \left( \frac{7,95}{C_2 \cdot f^{0,5}} - \frac{C_3}{C_2} \cdot F_{зам} \right) n_t \\ V_{под} &< \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}}{p_k} - C_3 \cdot F_{зам}^{пред} \right) n_t \\ V_{под}^{max} &\leq \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}^{max}}{p_k} - C_3 \cdot F_{зам}^{пред} \right) n_t \\ V_{под}^{max} &\leq \frac{1}{C_2} \left( \frac{R_{под}^{max}}{p_k} - C_3 \cdot F_{зам}^0 \right) n_t \\ V_{под}^{max} &\leq \frac{R_{под}^{крит}}{K_{зн} \cdot p_k \cdot C} n_t \\ V_{под}^{max} &\leq 5,85 \cdot 10^6 \cdot \frac{N \cdot \eta}{p_k \cdot B} \\ n_t &< 4 \cdot 10^5 / p_k; \quad n_t = n_{max} < 2200/f \quad (f < 4) \\ n_t &= n_{max} < 700 - 50f \quad (f > 4) \end{aligned} \right.$$

Выводы: 1. Полученные математические соотношения в совокупности составляют математическую модель процесса ограничений в управлении вращательным бурением с учетом износа режущего инструмента.

2. Каждое из условий ограничения определяет область регулирования значений и соотношения скорости подачи и частоты (скорости) вращения штанги на забой в соответствии с параметрами режущего инструмента и условиями работы.

3. 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.

4. Полученные функциональные связи относятся к основному условию, определяющему возможность расширения адаптивных качеств машин вращательного бурения, имеющих адаптивную структуру, а также исполнительных органов с адаптивными качествами при других способах оптимизации процесса резания, например, с использованием микропроцессорного управления.

#### Литература

1. Ленченко В. В. Основы выбора оптимальных режимов вращательного бурения / В.В. Левченко // 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. / А. Н. Дровников. – М., 1983. – 445 с. – Деп. в ВИНТИ 5.12.83. – № 3 6570 -83Д, № 6571 -83Д.
3. Водяник Г. М. Исследование и разработка бурильной машины с автоматическим регулированием скорости подачи для сверления вертикальных шпуров до 2,5 м / Г. М. Водяник, Э. В. Рылеев, А. Н. Дровников // Отчет по хоз. Дог. Работе №1340, ч.11, 111. – Новочеркасск: НПИ, 1968. – 266 с.