

УДК 622.233.6.004.13.001.5

## АДАПТИВНЫЕ БУРОВЫЕ АГРЕГАТЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ. Часть 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ПРИВОДА

*А.Я. Пономарев, А.А. Мясников*

Представлены эмпирические соотношения вращательного бурения, которые могут быть положены в алгоритм управления для адаптивных приводов. Обоснованы типы двигателей приводов и электронных блоков управления ими.

*Ключевые слова:* вращательное бурение; крепость горной породы; адаптивный электромеханический привод.

Базовым показателем эффективности бурения является скорость бурения [1–5]. Скорость вращательного бурения зависит от ряда факторов: осевого усилия подачи, скорости вращения бурового инструмента, диаметра и геометрии инструмента, физико-механических свойств горных пород, способа удаления продуктов разрушения из шпура и др.

Основной зависимостью, описывающей сущность процесса вращательного бурения, является качественная характеристика, выведенная на основе многих экспериментальных данных бурильных машин вращательного действия [1, 2], работающих в условиях различных по физико-механическим свойствам пород и грунтов, есть зависимость между скоростью бурения  $V$  или удельной подачей инструмента  $h$  и осевым усилием  $P$  [3]. Так как скорость бурения и удельная подача бурового инструмента связаны зависимостью

$$V = hn, \quad (1)$$

то при постоянной, оптимально определенной скорости вращения инструмента ( $n_{opt} = \text{const}$ ) для разрушения данной среды качественные зависимости  $V$  и  $h$  от осевого усилия  $P$  будут аналогичны. Качественно зависимости, полученные для пород различной крепости, имеют один и тот же вид (рисунок 1), характеризуемый четырьмя зонами.

Зона I физически соответствует истиранию инструмента в забое. Зона II является переходной от истирания к началу объемному разрушению с увеличением усилия подачи. Зона III физически определяет объемное разрушение и характеризуется для пород любой крепости линейной зависимостью скорости бурения от усилия подачи. После достижения усилием некоторого предельного значения, зависящего от крепости буримой породы,

скорость бурения стабилизируется в зоне IV. Физически работа инструмента в этой зоне характеризуется интенсивным износом инструмента.

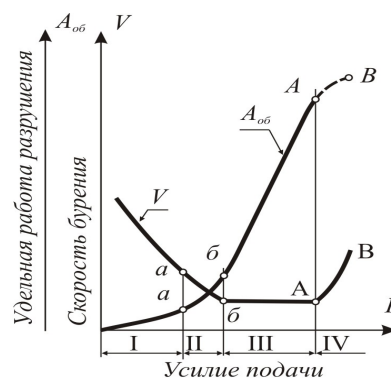


Рисунок 1 – Зависимости скорости бурения и удельной работы разрушения от усилия подачи

Экономически выгодно удерживать параметры режима бурения в зоне III. В этом случае обеспечивается скалывание частиц породы с максимально возможным объемом, что обеспечивает минимальные значения износа инструмента и энергоемкости разрушения. Энергоемкость,  $A_{об}$  – величина энергии, затраченной приводом на единицу объема или длины шпура.

Анализ данных показывает, что базовым параметром рациональных режимов вращательного бурения является усилие прижатия инструмента к забою  $P$ , зависящее от коэффициента крепости горной породы  $f$ . При выходе значений  $P$  из III зоны процесс вращательного бурения становится принципиально нерациональным. В этой зоне энергоемкость  $A_{об}$  разрушения минимальная и квазипостоянная величина.

Поскольку энергоёмкость – линейная функция частоты вращения и момента сопротивления породы бурению, то общий коэффициент полезного действия (КПД) процесса будет в случае, когда они соответствуют оптимальным значениям механических характеристик привода.

В основу алгоритма управления положены эмпирические зависимости, полученные Л.Т. Дворниковым [1] на основании статистической обработки известных в то время экспериментальных данных (1976 г.). Экспериментальные данные, полученные позже, достаточно корректно описываются этими зависимостями.

Основным аргументом в формулах является коэффициент крепости  $f$  по шкале проф. М.М. Протодьяконова, который определяется по формуле

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{100}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности породы на сжатие, кг/см<sup>2</sup>.

Рациональная частота вращения инструмента связана с коэффициентом крепости формулой (3)

$$n_p = \frac{2200}{f}, \text{ для } f \leq 5;$$

$$n_p = (700 \pm 30) - (50 \pm 7) f, \text{ для } 5 < f \leq 10;$$

$$n_p = (700 \pm 30) - (50 \pm 7) f, \text{ об/мин, для } f > 10. \quad (3)$$

Практически рациональные частоты вращения изменяются от 50 об/мин для пород крепостью  $f = 10$  [3] до 1500 для пород крепостью  $f = 2$  [4].

Для бурения шпуров диаметром 40...42 мм рациональные удельные подачи, подача на оборот инструмента, лежат в диапазоне

$$h_p = 3,0 \dots 3,5, \text{ мм/об.} \quad (4)$$

Практика вращательного бурения показывает, что эти значения близки к максимальным, гарантирующим безаварийную работу.

Данные о необходимых крутящих моментах  $M_{кр}$  для вращательного бурения пород по результатам экспериментальных данных (см. рисунок 1) представлены Л.Т. Дворниковым [1].

Анализ этих данных показывает, что удельные подачи  $h_p = 3,0 \dots 3,5$  мм/об рациональны для пород крепости  $f = 3 \dots 10$ , причем значения необходимых крутящих моментов в этом случае лежат в диапазоне  $M_{кр} = 4,5 \dots 13$  кг·м. Для пород крепости больше  $f > 10$  необходимо либо снижать удельную подачу до 1 мм при сохранении значений крутящих моментов на уровне  $M_{кр} \approx 10$  кг·м, либо резко увеличивать значение крутящего момента. Практически для бурения горных пород крепости  $f > 12$  рационально применять другие режимы бурения, в частности ударно-вращательный.

Для значений удельной подачи  $h = 3,5$  мм/об (рисунок 2) примерные значения крутящих моментов в зависимости от коэффициента крепости:

при  $f = 4$   $M_{кр} \approx 6,5$  кг·м;

при  $f = 7$   $M_{кр} \approx 8,5$  кг·м;

при  $f = 9$   $M_{кр} \approx 14,5$  кг·м.

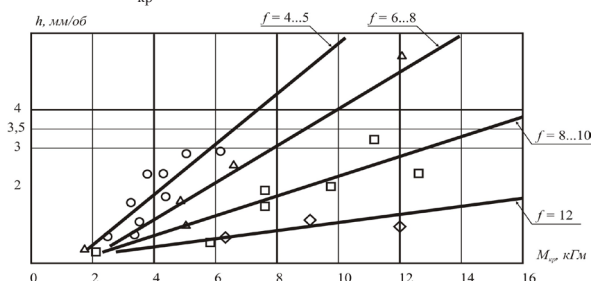


Рисунок 2 – Зависимости крутящего момента  $M_{кр}$  бурового инструмента от удельной подачи  $h$  и коэффициента крепости горной породы  $f$

По этим данным строим аппроксимирующую зависимость методом неопределенных коэффициентов. По трем точкам аппроксимирующей кривой будет парабола в виде

$$M_{кр} = A f^2 + B f + C, \quad (5)$$

где  $A, B, C$  – неопределенные коэффициенты, которые определяются из системы уравнений:

$$6,5 = 16 A + 4 B + C,$$

$$8,5 = 49 A + 7 B + C,$$

$$14,5 = 81 A + 9 B + C. \quad (6)$$

Формула крутящего момента, необходимого для вращательного бурения, принимает вид

$$M_{кр} = 0,467 f^2 - 4,467 f + 16,876, \quad (7)$$

при удельной глубине подачи  $h =$  мм/об и при коэффициенте крепости горных пород  $f = 3 \dots 10$ .

Согласно этой формуле, необходимый крутящий момент привода для вращательного бурения изменяется в диапазоне:

$$\text{для } f = 4 \quad M_{кр}^{f=4} = 0,467 \cdot 16 - 4,467 \cdot 4 + 16,876,$$

$$M_{кр}^{f=4} = 6,5, \text{ кг·м;}$$

$$\text{для } f = 10 \quad M_{кр}^{f=10} = 0,467 \cdot 100 - 4,467 \cdot 10 + 16,876,$$

$$M_{кр}^{f=10} = 19,0, \text{ кг·м.}$$

Минимальные значения усилия подачи инструмента  $P_0 \geq 35f$ , при котором начинается объемное разрушение, определяются по формуле

$$P_0 \geq 35f. \quad (8)$$

Данная формула, хорошо согласующаяся с практическими значениями  $P_0 = 100 \dots 450$  кг для коэффициента крепости  $f = 3 \dots 12$ , была получена Л.Т. Дворниковым [2].

Номинальное рабочее усилие прижатия инструмента  $P$  определяется по формуле

$$P = P_0 + \frac{h}{k} \quad (9)$$

где  $k = k_n \cdot k_c \cdot k_u \cdot k_b$  – коэффициент эффективности процесса бурения [2];

$k_n, \frac{MM/об}{кГ}$ , – коэффициент сопротивляемости горной породы бурению;

$$k_n = (9 - 0,5f) \cdot 10^{-3}; \quad (10)$$

$k_c$  – коэффициент геометрических особенностей инструмента, изменяется от 0,75 до 1,35; для инструмента РП-2  $k_c = 1$ . Судить о пригодности того или иного инструмента по величине коэффициента нельзя, поскольку имея низкое значение инструмент может обеспечивать большую износостойкость и давать в результате больший экономический эффект,

$k_u$  – коэффициент изношенности.

$$k_u = 1 + 0,03(5 - F_m), \quad (11)$$

где  $F_m, mm^2$  – площадь площадки притупления резца. Для технически острого резца  $F_m = 5$  мм. Формула пригодна до  $F_m = 25$  мм. Таким образом, значения коэффициента лежат в диапазоне от 1; для технически острого резца – до 0,4;  $k_b$  – коэффициент скорости вращения. Практика показывает, что скорость бурения и удельная подача инструмента существенно изменяются в зависимости от скорости вращения штанги. Коэффициент изменяется от 0,7 до 1,3. Алгоритм управления позволяет выдерживать номинальные частоты вращения инструмента для всех режимов, при которых значение коэффициента равно 1.

Объемная работа разрушения может быть вычислена по формуле [2]

$$A_{об} = 6,12 \frac{N}{\sqrt{S_m}}, \frac{кГ \cdot М}{см^3}, \quad (12)$$

где  $N, Вт$  – мощность расходуемая на бурение;

$V, см/мин$  – скорость бурения;

$S_m, см^2$  – площадь сечения шпура.

Практически объемная работа разрушения может вычисляться по формуле [2] при среднеквадратической ошибке  $\pm 0,3 \frac{кГ \cdot М}{см^3}$ :

$$A_{об} = 2,8f, \frac{кГ \cdot М}{см^3}. \quad (13)$$

Необходимая мощность привода на вращение инструмента при вращательном бурении определяется формулой [2]

$$N_{об} = 0,0022 n_p, f, кВт. \quad (14)$$

Практика показывает, что необходимая мощность привода подачи инструмента  $N_m$  составляет 10 % от мощности привода вращения.

С учетом формулы (3)  $n_p = (700 \pm 30) - (50 \pm 7)f$  мощность привода вращения функции коэффициента крепости горной определяется формулой

$$N_{сп} = (1,61 - 0,09f) f, кВт. \quad (15)$$

В частности, для  $f = 3$   $N_{сп} = 4$  кВт,  $N_{сп} = 4$ , для  $f = 10$   $N_{сп} = 7$  кВт.

Из литературы [1, 2] известно, что при вращательном бурении резцовыми коронками объемное разрушение возможно при только при определенных ограничениях на конструктивный задний угол режущей кромки инструмента:

$$\gamma_{к,мин} = \gamma - \arctg\left(\frac{V}{n}\right), \quad (16)$$

где  $\gamma_{к,мин}$  – кинематический задний угол режущей кромки;

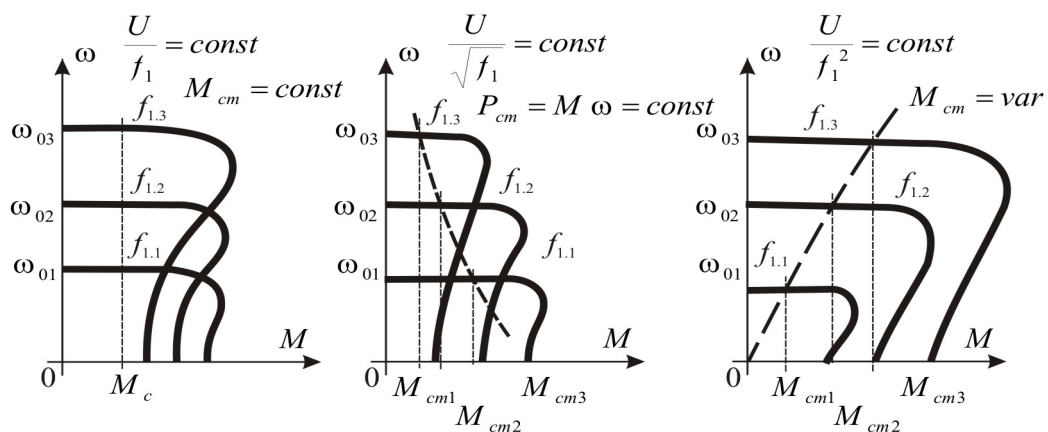


Рисунок 3 – Электромеханические характеристики асинхронных двигателей с тиристорными блоками управления

$\gamma$  – конструктивный задний угол режущей кромки;

$V$  – скорость подачи инструмента;

$n$  – частота вращения режущего инструмента.

Основой для создания адаптивных буровых агрегатов-роботов с элементами интеллекта служит имеющаяся на данный момент элементная база включающая в себя: двигатели, блоки управления, цифровые микропроцессоры и т. д. Параметрами элементной базы определяются ограничения на рабочие режимы буровых агрегатов и алгоритмы управления.

В качестве двигателей приводов в настоящее время наиболее перспективным следует считать асинхронный короткозамкнутый двигатель, регулируемый по частоте и напряжению силовым тиристорным блоком электропривода переменного тока [1]. Электромеханические характеристики таких двигателей управляемых тиристорным частотным блоком показаны на рисунке 3.

Электромеханический вращающий момент (Н·м) асинхронного двигателя

$$M = \frac{m_c U_{c\phi}^2 \frac{R'_p}{S}}{\omega_c \left[ \left( r_c + \frac{R'_p}{S} \right)^2 + (x_c + x'_p)^2 \right]}, \quad (17)$$

где  $m_c$  – число фаз статора;

$U_{c\phi}$  – напряжение статора фазное, В;

$R'_p$  – приведенное активное сопротивление всей цепи ротора, Ом;

$x'_p$  – приведенное реактивное сопротивление ротора, Ом;

$x_c, r_c$  – активное и реактивное сопротивление статора, Ом;

$\omega_c$  – синхронная скорость вращения ротора, рад/с;

$S$  – скольжение, рад/с.

$$S = \frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0}, \quad (18)$$

$\omega_0$  – номинальная угловая скорость вращения, рад/с.

Эмпирически коэффициент скольжения двигателей привода инструмента при вращательном бурении, который необходимо учитывать в управлении, лежит в диапазоне от 10 до 30; коэффициент полезного действия (КПД) – 0,6...0,8; коэффициент передачи активной мощности ( $\cos(\varphi)$ ) – 0,6...0,8.

Выпускаемые промышленностью, в частности японской компанией “Тошиба”, тиристорные цифровые блоки управления асинхронными двигателями рассчитаны для мощностей до 7 кВт, что по мощности, крутящему моменту и частотам вращения с запасом разрешает создание адаптивных систем с элементами интеллекта.

В свою очередь номинальные значения напряжений и токов в цепях управления позволяют применять стандартную элементную базу цифровых микровычислительных систем типа “Fattek” Компании “Toshiba” (Япония); PIC16F, Atmel, Atmega Компании AVR (США) и т. д.

Алгоритм управления оптимально настраивают на активное реагирование при изменении контролируемых параметров режима бурения на следующие величины:

➤ момент сопротивления примерно на величину 9 Н·м;

➤ угловая скорость инструмента – 50 об/мин;

➤ удельная подача – 0,2 мм/об.

Стандартными являются следующие значения параметров входящих в алгоритм управления:

➤ площади забоя  $S_{\text{ш}}$ , см<sup>2</sup> – 3,14; 12,56; 28; 26; 40; 24; 78,8; 10; 30;

➤ диаметр инструмента – от 2 до 6 см;

➤ задний угол заточки инструмента,  $\gamma_3$ ;

➤ стандартные значения 18°; 20°; 30°; 40°;

➤ площадка притупления резца,  $S_p$ , мм<sup>2</sup>;

➤ нормативные значения смены инструмента: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 м.

#### Литература

1. Алимов О.Д. Бурильные машины. Основы расчета и проектирования бурильных машин вращательного и вращательно-ударного действия / О.Д. Алимов, Л.Т. Дворников. М.: Машиностроение, 1976. 295 с.
2. Алимов О.Д. Закономерности вращательного бурения шпуров / О.Д. Алимов, Л.Т. Дворников. Фрунзе: Илим, 1975. 46 с.
3. Михайлов В.Г. Сверление шпуров / В.Г. Михайлов. М., 1947.
4. Рудавский И.Е. Некоторые итоги исследования электровращательного способа бурения шпуров / И.Е. Рудавский // Известия вузов. Горный журнал. 1969. № 4.
5. Дворников Л.Т. Влияние упругих свойств буровых штанг на скорость бурения / Л.Т. Дворников, Г.И. Яковлев // Горные машины и автоматика. 1969. № 11–12.