

© В.С. Хілов¹

¹ ТОВ Технічний університет «Метінвест політехніка», Запоріжжя, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ СПОСОБУ КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ ПОСТАВУ КАР'ЄРНОГО БУРОВОГО ВЕРСТАТА

© V. Khilov¹

¹ Technical University “Metinvest Polytechnic” LLC, Zaporizhzhia, Ukraine

DETERMINATION OF METHOD CONTROLLING OF ROD DRIVES OPEN-PIT DRILLING RIG

Мета. Визначення раціонального способу керування автоматизованими приводними системами обертання і подачі поставу бурого верстату вибухових свердловин.

Методика. Дослідження здійснено на підставі аналізу балансу енергій з зони вибою. З метою збільшення стійкості шарошкового долота шляхом контролювання потоку енергії у зоні вибою розроблено спосіб керування процесом буріння з керуванням приводами механізмів подачі та обертання, при якому формуються жорсткі механічні характеристики на шарошковому долоті при проходці в породах з невеликою міцністю та м'які механічні характеристики – в більш міцних породах.

Результати. Проаналізовано способи керування при яких підтримується на постійному рівні один з параметрів: частота обертання поставу, момент опору на долоті, лінійна швидкість пересування поставу, осьовий тиск на постав, потужність, що споживається приводом обертання. Виходячи з енергетичного критерію стійкості долота розроблено раціональний спосіб управління приводом обертання поставу верстата шарошечного буріння. Найбільшою стійкістю долото буде мати при рівномірному його енергетичному навантаженні, тобто при підтримці лінійного зростання енергії руйнування породи чи при підтримці на постійному рівні потужності, яка виділяється у зоні контакту долото-вибій.

Наукова новизна. Встановлено, що найбільшу стійкість має долото при рівномірному енергетичному навантаженні, тобто при підтримці лінійного зростання енергії руйнування породи або при підтримці на постійному рівні потужності, яка виділяється в зоні контакту долото – вибій. Встановлений критерій працездатності долота узагальнює раніше запропоновані критерії (проходка на долото, моторесурс долота, умовна спрацьованість долота), оскільки автоматично враховує міцність і абразивність породи, яка руйнується долотом..

Практична значимість. Запропонований спосіб керування приводами подачі та обертання бурильної колони в процесі буріння забезпечує рівномірне енергетичне навантаження шарошкового долота шляхом формування на ньому жорстких механічних характеристик при проходці порід міцністю в межах 10-13 одиниць за шкалою професора М.М. Протодяконова та м'яких механічних характеристик в більш міцних породах. При бурінні змішаних порід з різними фізико-механічними властивостями спосіб керування забезпечує автоматичний підбір механічних характеристик в залежності від міцності породи.

Ключові слова: буровий верстат, привод обертання, привод подачі, спосіб керування.

Вступ. Створені ВАТ “Ново-Краматорський машинобудівний завод” бурові верстати СБШС-250Н та СБШ-250/270-32 обладнані двома регульованими системами обертання поставу і спускова-під'ємних операцій, у яких використані сучасні цифрові приводи постійного і змінного струмів. Такі електромеханічні

системи є цілком керованими і розширюють можливості автоматизації процесу буріння, дозволяють враховувати технологічні особливості роботи шарошкового верстата, чого неможливо було досягти при використанні нерегульованих приводів подачі поставу у верстатах СБШ-250МН-32 [1, 2].

Фізичне і моральне старіння гірничого устаткування, зокрема бурових верстатів є однією з основних проблем відкритого способу видобутку корисних копалин на кар'єрах України. Модернізація існуючого парку і створення нового покоління бурових верстатів є важливою науково-прикладною проблемою, від успішного вирішення якої залежить працездатність вітчизняного гірничорудного виробництва. Створенням вітчизняних верстатів шарошкового буріння займаються колективи спеціальних конструкторських бюро науково-дослідних інститутів України. Поряд з удосконалюванням гідромеханічного устаткування бурових верстатів необхідно покращувати і приводні системи, які повинні відповідати досягнутому рівню у світовій електротехнічній промисловості. Тільки в цьому випадку можна створити конкурентоспроможний буровий верстат у цілому. Розглядаються питання знаходження та вибору раціонального способу керування взаємопов'язаними приводними системами обертання та подачі поставу в зону вибою.

Основна частина. Істотним питанням при розробці системи керування приводами обертання та подачі – вибір способу керування. Відомі способи керування, що підтримують на постійному рівні один із параметрів: частоту обертання поставу, момент опору на долоті, лінійну швидкість переміщення поставу, осьовий тиск на став, потужність, що споживається приводом обертання. Виходячи з енергетичного критерію стійкості долота, виберемо раціональний спосіб керування приводом обертання поставу верстата шарошкового буріння.

Робота бурового верстата характеризується перетворенням електромагнітної енергії, що надходить від системи електропостачання, у механічну енергію, яка виділяється у вигляді непродуктивних втрат і перетворюється у корисну роботу, що йде на руйнування гірської породи та транспортування бурового дріб'язку до устя свердловини [3, 4]. Потоки енергії формуються та спрямовуються по каналах: осьове зусилля – потужність лінійного переміщення поставу; частота обертання – потужність руйнування породи; тиск і витрата стисненого повітря – потужність винесення бурового дріб'язку (шламу). У кожному каналі є індивідуальний перетворювач виду енергії, це: регульований електрогідро-механічний привід подачі бурового снаряда; регульований електромеханічний привід обертання шарошкового долота; нерегульований електромеханічний привід компресора для видалення бурового дріб'язку з поверхні вибою свердловини [5].

Енергетичні потоки спрямовані на поверхню вибою, причому осьове зусилля прагне зім'яти поверхню, створюючи напружений стан у гірському масиві; енергія обертання витрачається на проникнення штирів у поверхневий шар вибою, руйнування породи та її подрібнення, яка потім потоком повітря виноситься до устя свердловини.

Процес буріння відбувається за двома взаємовиключними напрямками: найбільшій кількості пробурених свердловин за найменший час роботи; найменшій спрацьованості бурового інструмента (штанг і доліт) у процесі буріння.

Найбільше спрацьовується шарошкове долото: його оснащення й опори. При роботі долото сприймає великі статичні й динамічні навантаження, а також піддається інтенсивному руйнуванню від утомленості матеріалу й абразивному зношуванню. Потік енергії обертання спрямований не тільки на руйнування породи, але й на руйнування самого долота.

Штирі шарошки отримують ударне циклічне навантаження, що призводить до накопичення енергії руйнування від стомлення матеріалу оснащення й опор долота. Проникнення штиря в шар гірської маси відбувається у разі удару, при цьому запасена кінетична енергія обертання поставу перетворюється у потенційну енергію руйнування породи. Створюється напружений стан на вибої з наступним руйнуванням його поверхневого шару. Зі збільшенням міцності породи зростає потенційна енергія при підтримці на постійному рівні інтенсивності процесу руйнування. Одночасно спостерігається суттєва спрацьованість долота, оскільки підвищується його руйнування від стомлення матеріалу шарошки.

Спрацьованість від стомленості матеріалу шарошки долота залежить від подоланого моменту опору, поточної частоти обертання поставу та потужності, що виділяється в зоні контакту шарошки з вибоєм у гірських породах, яка змінює свою міцність за невідомим законом. У разі нерівномірного виділення потужності в зоні вибою відбувається нерівномірний розподіл навантаження по поверхні шарошки, що є причиною появи зон з різною напруженістю. Наслідком цього є нерівномірність зношення оснащення й опор долота та зниження терміну його експлуатації, що негативно впливає на проходку долота в цілому.

Запропоновані такі критерії визначення стійкості долота: проходка на долото, моторесурс долота, умовна спрацьованість долота [6].

Критерій стійкості шарошкового долота, що об'єктивно контролює поточний режим роботи (спрацьованість), має враховувати як міцність породи, так і тривалість знаходження долота в контакті з масивом, якому притаманна міцність і абразивність, що змінюються. Міцність і абразивність породи можна об'єктивно оцінити за величиною моменту опору на шарошці (зі збільшенням міцності й абразивності породи момент опору зростає, зростає одночасно і спрацьованість оснащення і опор долота). Величину спрацьованості долота можливо оцінити за кутом повороту долота при поточному моменті опору, тобто як [7]

$$dW = M_c(\alpha) \cdot d\alpha,$$

де dW – диференціал потужності, що характеризує спрацьованість долота; $M_c(\alpha)$ – поточний момент опору на шарошці; $d\alpha$ – диференціал кута повороту долота.

Повна спрацьованість оснащення і опор долота, за пропонованим критерієм стійкості долота визначиться як

$$W = \int_0^{\alpha_k} M_c(\alpha) d\alpha,$$

де α_k – кут повороту долота, обумовлений повною (припустимою) спрацьованістю оснащення й опор.

Причому зі збільшенням міцності породи (моменту опору) припустимий кут повороту зменшується і, навпаки, при роботі шарошки в менш міцних породах

збільшується. Залежність припустимого кута повороту від моменту опору при обмеженому ресурсі працездатності долота носить гіперболічний характер.

Для переходу від припустимого кута повороту α_K долота до часу його працездатності T_K використаємо інтегральну залежність вигляду

$$W = \int_0^{\alpha_K} M_c(\alpha) \frac{d\alpha}{dt} dt = \int_0^{T_K} M_c(t) \omega \cdot dt,$$

де t, dt – поточний час та його диференціал; ω – частота обертання долота; T_K – час, що відповідає граничному зношуванню долота.

Врахуємо, що добуток моменту опору і частоти обертання є потужністю руйнування породи долотом $P(t)$, а інтеграл від поточної потужності за часом – це енергія E , тоді

$$W = \int_0^{T_K} M_c(t) \omega \cdot dt = \int_0^{T_K} P(t) dt = E,$$

тобто припустима спрацьованість долота однозначно визначається величиною енергії, потік якої перетворює шарошка в процесі буріння в зоні вибою. Чим більше енергії витрачається на буріння у зоні вибою, тим більша спрацьованість долота.

Тоді маємо, що для визначення рівномірної спрацьованості долота в часі необхідно, щоб потік енергії, який генерується за каналом частота обертання поставу – потужність руйнування породи, лінійно зростає у функції часу, тобто швидкість витрати енергії за цим каналом повинна бути постійною. Отже, для підтримки залежності швидкості руйнувань від стомленості матеріалу на постійному рівні слід регулювати швидкість уведення енергії в зону вибою. Слід змінювати частоту обертання поставу зворотно-пропорційно моменту опору на долоті. Це можливо тільки шляхом підтримки на постійному рівні потужності, що надходить за каналом частота обертання – потужність руйнування породи.

Регулювання характеристик приводів обертання і подачі слід виконувати відповідно до міцності порід [8]. Тому технологічні параметри буріння мають змінюватися за такими залежностями при збільшуванні міцності розбуриваної породи збільшується осевий тиск на постав, зменшується його частота обертання, що приведе до зменшення лінійної швидкості проходки бурової скважини, тобто:

$$G = G_0 + a \cdot f, \quad n = n_0 + b/f, \quad V_M = V_0 + c/f,$$

де G, n, V_M, G_0, n_0, V_0 – поточне і початкове осьове зусилля, частота обертання і механічна швидкість буріння; a, b, c – постійні коефіцієнти, що залежать від характеристик порід, які буряться, типу долота та ін.; f – міцність породи, яка буриться, за шкалою Протодьяконова.

Графічна інтерпретація наведених рівнянь має вигляд залежностей (рис. 1), що визначають закон керування під час розбурування перемезованих за міцністю гірських порід: чим міцніше порода, тим меншою має бути частота обертання шарошкового долота і тим більшим осьове зусилля на постав.

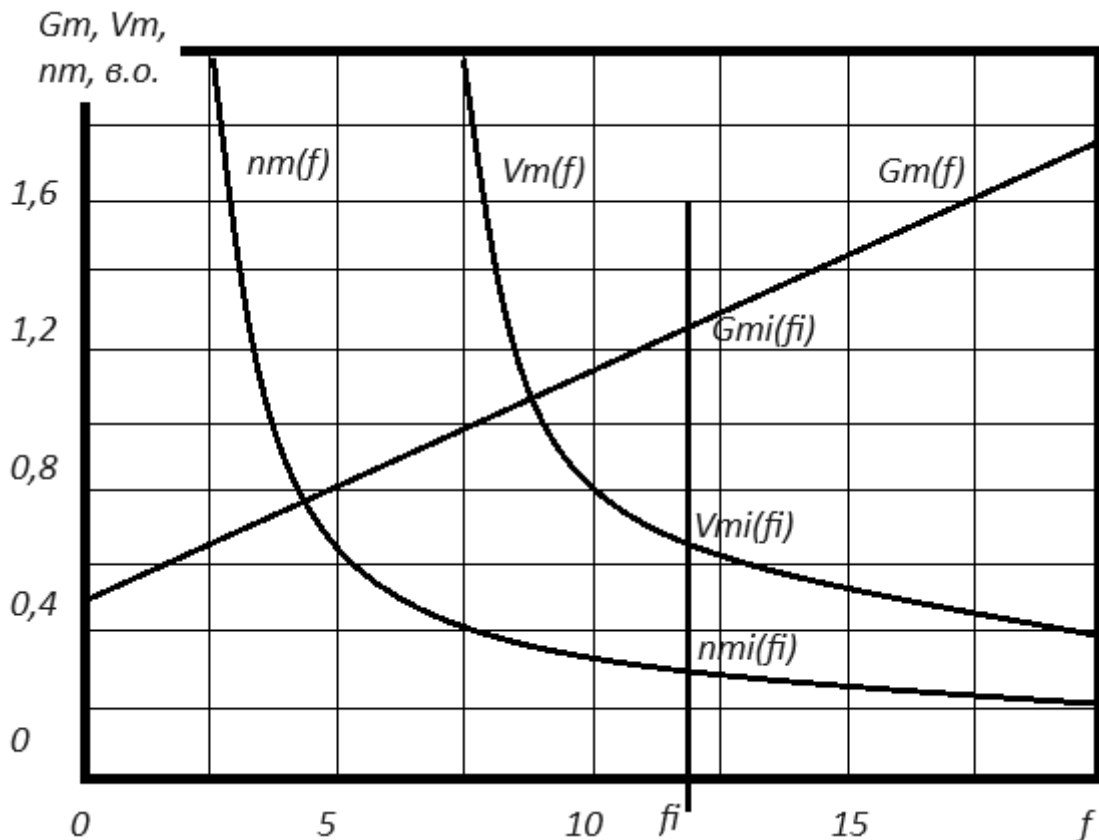


Рис.1. Статична механічна характеристика, що реалізується на долоті (n_m – частота обертання долота, V_m – лінійна швидкість пересування поставу, G_m – осьове зусилля на долото, f – коефіцієнт міцності породи)

Цей алгоритм роботи реалізується оператором у ручному режимі керування. Міцність породи не піддається прямому виміру, тому буровий майстер оцінює її за моментом опору на шарошці. Буріння ведеться за усередненими даними, оскільки оператор не в змозі опрацювати поточні значення зміни міцності породи.

В основі запропонованого способу керування привідними системами подачі й обертання лежить завдання збільшення стійкості долота за рахунок удосконалення способу керування процесом буріння шляхом формування “жорстких” механічних характеристик приводу обертання при бурінні у м’яких і зруйнованих породах і “м’яких” механічних характеристик при бурінні у міцних незруйнованих породах [9]. При бурінні перемежованих за фізико-механічними властивостями гірських порід автоматичний перехід від одного режиму роботи привідної системи до іншого дозволяє збільшити стійкість долота.

Поставлене завдання вирішується шляхом розподілу режимів роботи привідних систем бурового верстату відповідно до міцності породи, яка руйнується, що забезпечує раціональне навантаження на долото.

Крім того, у способі керування процесом буріння враховуємо можливість обмеження виникаючих вібраційних коливань бурового поставу, що збуджують автоколивання в електромеханічній системі. У разі збігу власних і вимушених частот виникають аварійні резонансні явища у верстаті. Зі збільшенням потужності, що витрачається на руйнування породи, при постійному моменті опору руйнування

зростають частота обертання поставу та його вібраційні коливання. Тому у запропонованому способі керування вібраційні коливання обмежуються шляхом впливу на задану потужність руйнування: при збільшенні вібраційних коливань потужність, що витрачається на руйнування породи, має зменшуватися.

Буріння твердих незруйнованих тріщинуватих гірських порід здійснюється зі значними піковими моментами опору на долоті. Величина моменту опору може перевищувати максимально можливе значення крутного моменту приводу обертання, що призводить до “прихоплення” долота на вибої. Оскільки момент опору залежить від осьового тиску, то при його перевищенні у процесі буріння межу заданих значень слід зменшувати до припустимої величини шляхом регулювання тиску на долото. Чим менший тиск на долото, тим менший момент опору.

Якщо поточне значення потужності, яке необхідне для руйнування породи, менше заданого, то буріння ведеться по неенергоємних гірських породах – зруйнованих чи м’яких. У цьому разі раціонально бурити у режимі з підтримкою постійної швидкості обертання і регулювати тиск на долото. При такому режимі буріння слід обмежувати лінійну швидкість переміщення долота для усунення динамічних ударів шарошок при переході з більшою міцністю породи.

При переході долота у більш міцні чи незруйновані породи зростає потужність, що необхідна для розбурювання гірського масиву. У цьому режимі руйнування гірської породи. Тому для підтримки більшої стійкості оснащення долота необхідно переходити до режиму буріння при постійному тиску на долото і регулювати його частоту обертання. Для покращення умов експлуатації долота в цьому режимі керування слід підтримувати постійний потік потужності у зоні вибою, тобто зі збільшенням моменту опору на долото його частота обертання має відповідно зменшуватися.

На рис. 2 наведена статична механічна характеристика, що реалізується на долоті при даному способі керування привідними системами подачі і обертання поставу.

При бурінні долотом зруйнованих або м’яких (неенергоємних) порід потрібна невелика потужність на руйнування. У такому режимі буріння раціонально обмежувати частоту обертання долота на максимально заданому рівні і контролювати осьове зусилля на долото таким чином, щоб лінійна швидкість переміщення долота не перевищувала максимально заданого значення (ділянка 1–3 на механічній характеристиці). Зі збільшенням осьового тиску потужність, що необхідна для руйнування породи, і статичний момент на долото зростають.

При переході долота у незруйновані міцні породи зростає споживана приводом обертання потужність, тобто буріння здійснюється у енергоємних породах. Продуктивність бурового верстату при цьому обмежується його енергооснащеністю. Верстат переходить працювати на ділянку механічної характеристики 3–4 (рис. 2), на якій керування енергоресурсами верстата відбувається з підтримкою постійного потоку потужності, необхідної для руйнування породи. При такому режимі буріння зі збільшенням міцності породи, що буриться, зростає статичний момент опору на долото і зменшується його частота обертання. Лінійна швидкість переміщення долота буде непостійною і залежить від фізико-механічних

властивостей породи, що буриться. На ділянці механічної характеристики 3–4 осьовий тиск на долото підтримується постійним.

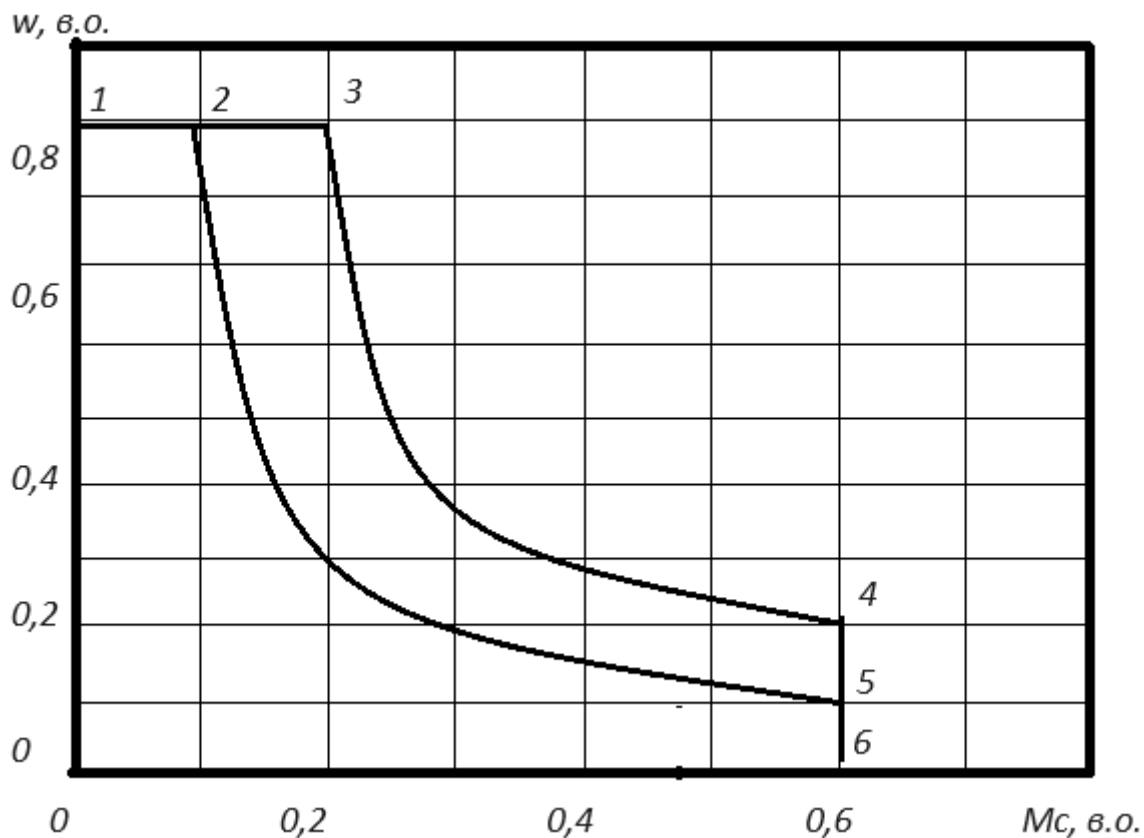


Рис.2. Статична механічна характеристика привідної системи, що реалізується при запропонованому способі керування привідними системами подачі і обертання поставу (ω – частота обертання долота, M_c – момент опору)

Перехід на ділянку механічної характеристики 4 – 6 відбувається при “прихопленні” долота у тріщинуватих породах і бурінні міцних порід з великими осьовими тисками. У цьому режимі роботи виникають статичні моменти на долото, що перевищують за значеннями межу припустимого крутного моменту привідної системи. При цьому необхідно знижувати осьове зусилля на долото, що призведе до зменшення статичного моменту і його стабілізації на припустимому постійному рівні.

На ділянці механічної характеристики 4–6 підтримуються постійними: статичний момент, потік потужності руйнування породи. Усунення вібраційних коливань при бурінні досягається шляхом зменшення заданої потужності руйнування. Статичні характеристики для режиму роботи зі зниженою потужністю руйнування на рис.2 зображені ділянкою 1–2–5–6.

Таким чином, виходячи з енергетичного критерію стійкості долота можна зробити висновок, що найбільшу стійкість буде мати долото при рівномірному енергетичному навантаженні, тобто при підтримці лінійного зростання енергії руйнування породи або при підтримці на постійному рівні потужності, яка виділяється в зоні контакту долото – вибій. Розглянутий критерій працездатності

долота узагальнює раніше запропоновані критерії (проходка на долото, моторе-сурс долота, умовна спрацьованість долота), оскільки автоматично враховує міцність і абразивність породи, яка руйнується долотом.

Висновки. У результаті аналізу стану шарошкового способу буріння підри-вних свердловин і проведених теоретичних і експериментальних досліджень шляхів удосконалювання приводних систем бурового верстату, упроваджених за рекомендаціями і при участі автора на відкритих гірничих роботах України, вста-новлено:

1. Зараз одна з основних проблем відкритого способу видобутку корисних копалин на кар'єрах України – це фізичне і моральне старіння гірничого устатку-вання, зокрема бурових верстатів. Тому модернізація існуючого парку і ство-рення нового покоління бурових верстатів є важливою науково-прикладною про-блемою, від успішного вирішення якої залежить конкурентоспроможність вітчиз-няного гірничорудного виробництва на світовому ринку.

2. Створенням вітчизняних верстатів шарошкового буріння займаються ко-лективи спеціальних конструкторських бюро інститутів ВАТ “Ново-Краматор-ський машинобудівний завод” (м. Краматорськ), ВАТ “КриворіжНІПрудмаш”, ВАТ “Криворізький завод гірничого машинобудування” (м. Кривий Ріг), які удо-сконалюють механічне і гідравлічне устаткування БВ, але продовжують вико-ристовувати традиційні тиристорні приводні системи з двигунами постійного струму.

3. Поряд з удосконалюванням гідромеханічного устаткування бурового ве-рстату необхідно покращувати і приводні системи, які повинні відповідати дося-гнутому рівню у світовій електротехнічній промисловості. Тільки в цьому випа-дку можна створити конкурентоспроможний буровий верстат у цілому.

4. З метою збільшення стійкості шарошкового долота шляхом підтримки по-току потужності у зоні вибою розроблено спосіб керування процесом буріння з керуванням приводами механізмів подачі та обертання, при якому формуються жорсткі механічні характеристики на шарошковому долоті при проходці в поро-дах з міцністю $f \leq 10 - 13$ за шкалою проф. М.М.Протодьяконова і м'які механічні характеристики – в більш міцних породах. При бурінні перемежованих за фі-зико-механічними властивостями гірських порід спосіб керування забезпечує ав-томатичний вибір механічних характеристик в залежності від міцності породи.

Перелік посилань

1. Хілов, В. (2003). Удосконалювання приводних систем бурових верстатів для кар'єрів Кри-вбасу. *Наук.-техн. зб.: Гірничі електромеханіка та автоматика*, 71, 121–127.
2. Pivnyak, G., Beshta, A., & Khilov, V. (2004). Upravlenie privodom vrashcheniya stava sharo-shechnogo bureniya na osnove asimptoticheskogo identifikatora sostoyaniya. *Elektrotehnika*, 6, 23–26.
3. Бешта, О., & Хілов, В. (2005). Підвищення рівня енерговикористання у гірничодобувній галузі засобами регульованого електроприводу. *Наук. Вісник НГУ*, 2, 54–56.
4. Khilov, V. (2006). Application of computer-aided drives in new generation boring rigs for open pits in Ukraine. *Наук. Вісник НГУ*, 5, 72–76.

5. Бешта, О. & Хілов, В. (2006). Застосування ресурсо- та енергозберігаючих приводних систем змінного струму в бурових верстатах нового покоління. *Наука та інновації*, 2(3), 38–43.
6. Pivnyak, G., Beshta, A., & Khilov, V. (2005). AC drive system for actuator's power control. *XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05*, 368–370.
7. Бешта, О., & Хілов, В. (2005). Приводна система для контролювання потужності на шарошковому долоті. *Вісник КДПУ*, 4(33), 85–88.
8. Півняк, Г., & Бешта, О., & Хілов, В. (2003). Принципи побудови системи керування електроприводом обертання ставу верстата шарошечного буріння. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 1(10), 141–143.
9. Хілов, В. (2003) Пат. 61548, Україна, МКИ Е21В45/00. «Спосіб керування процесом буріння». *Бюлетень державної системи правової охорони інтелектуальної власності*, 11.

ABSTRACT

Purpose. Rational method determination for controlling automated drive systems for rotation and feeding of explosive wells drilling rig.

The methods. The study is based on the analysis of the energy balance in the bottomhole zone. To increase the stability of the roller cutter bit by controlling the energy flow in the bottomhole zone, a method of controlling the drilling process with the control of the feed and rotation mechanisms drives was developed, which forms hard mechanical characteristics on the roller cutter bit when penetrating rocks with low strength and soft mechanical characteristics in more durable rocks.

Findings. The control methods for maintaining one of the following parameters at a constant level are analyzed: bit rotation frequency, bit resistance torque, bit linear speed, axial pressure on the bit, and power consumed by the rotation drive. Based on the energy criterion of bit stability, a rational method for controlling the rotary bit drive of a core drilling rig was developed. It has been established that the bit will have the greatest stability when its energy load is uniform, i.e., when the rock fracture energy is maintained at a linear increase or when the power generated in the contact zone of the bit with the bottom hole is maintained at a constant level.

The originality. It has been established that the bit has the greatest stability under a uniform energy load, i.e., when maintaining a linear increase in the energy of rock destruction or when maintaining a constant level of power released in the bit- face contact zone. The established bit efficiency criterion summarizes the previously proposed criteria (penetration per bit, bit motor life, conditional bit wear), as it automatically considers the strength and abrasiveness of the rock being destroyed by the bit.

Practical implementation. The proposed method of controlling the drives for feeding and rotating the drilling rod in the process of drilling ensures uniform energy loading of the core bit by forming hard mechanical characteristics on the core bit when penetrating rocks with a strength in the range of 10-13 units according to the scale of Prof. M.M. Protodyakonov and soft mechanical characteristics in stronger rocks. When drilling intermixed rocks with different physical and mechanical properties, the control method provides automatic selection of mechanical characteristics depending on the rock strength.

Keywords: *drilling rig, rotary drive, feed drive, control method.*