

ІДЕНТИФІКАЦІЯ БУРИМОСТІ ПОРІД ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИН

Н.В. Сабат, Г.Н. Семенцов

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 46067,
e-mail: kafatp@ukr.net

Статтю присвячено розроблянню методу ідентифікації та автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин роторним способом, що дозволяє контролювати координатні збурення (буримість породи) незалежно від типорозмірів породоруйнівного інструменту та геолого-технологічних умов і вносити корективи в керувальні дії.

Ключові слова: автоматизований контроль, математичне моделювання, ідентифікація, координатне збурення, буримість, поглиблення свердловин.

Статья посвящена разработке метода идентификации и автоматизированного бесконтактного контроля буримости горных пород при углублении скважин роторным способом, позволяющим контролировать координатные возмущения (буримость породы) независимо от типоразмеров породоразрушающего инструмента и геолого-технологических условий и вносить коррективы в управляющие действия.

Ключевые слова: автоматизированный контроль, математическое моделирование, идентификация, координатное возмущения, буримость, углубление скважин.

The article deals with the development of the identification method and automated noncontact control over the rock drillability in the process of deepening the oil and gas wells by rotary system, which enables to monitor the coordinate drilling (rock drillability) regardless of the rock destruction tool standard size and geological conditions, and to amend control actions.

Key words: automated control, mathematical design, identification, coordinate drilling, drillability, well deepening

Вступ

В нафтової і газової промисловості України спостерігається тенденція до збільшення глибин свердловин, буріння яких ведеться, головним чином, роторним способом. Для буріння нафтових і газових свердловин використовуються нове покоління тришарошкових доліт, які забезпечують проходку на одне долото до 2000 м, а також алмазні долота з проходкою до 600 м. У результаті одним долотом розбурюються декілька різнорідних шарів порід, буримість яких треба знати, щоб уточнити параметри математичної моделі і визначити оптимальні керувальні дії. Проте, відомі методи контролю буримості порід як координатного збурення не відповідають сучасному рівню автоматизації та інформаційної забезпеченості бурових підприємств нафтогазовидобувної галузі. Вони мають істотні обмеження, серед яких неможливість отримання інформації для автоматизовані системи керування про головне координатне збурення в реальному часі. Це обумовлено тим, що технологічний процес поглиблення свердловини є нелінійним стохастично-хаотичним процесом, який розвивається в часі і здійснюється за умов апріорної та поточної невизначеності і перебуває під впливом різного типу адитивних і мультиплікативних завад. Головними збурювальними впливами, що діють на об'єкт керування, є фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід, зокрема такий комплексний чинник, як буримість гірських порід. Контактними методами цей показник визначити неможливо. Тому автоматизований контроль буримості гірських порід, який відбувається в умо-

вах неповної інформації, нестационарності та невизначеності процесу поглиблення свердловини, у теперішній час набуває важливого значення. У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення ефективного методу ідентифікації буримості гірських порід в реальному часі і програмно-технічних засобів, здатних функціонувати в складі адаптивної системи керування за умов апріорної та поточної невизначеності структури і параметрів об'єкта керування.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Формування інформації про буримість гірських порід має орієнтуватися на on-line методи сигнальної ідентифікації та програмно-технічні засоби, що здатні функціонувати за умов невизначеності процесу буріння. Зауважимо, що у галузі технологій буріння нафтових і газових свердловин проблеми визначення буримості гірських порід були вперше розглянуті М.Г.Бінгхемом (Bingham) [1], який запропонував метод визначення буримості на основі інформації про механічну швидкість буріння. Актуальність даної наукової проблеми зумовлює інтерес до неї зарубіжних учених, які формують і розвивають методи класифікації гірських порід за їх буримістю (M.Wilton, B.Calhoun, V.P.Perrin [2], S.H.Hoseinie, H.Aghababaei, Y.Pourrahim [3], T.Olgay, K.Sair [6], N.Bilim [7], H.Y..Zhu [11]), розробляють методи ідентифікації на основі енергетичної теорії (H.Tian [10], Z-Y Tan [9]), досліджують можливість використання автоматичного моніторингу на основі застосування систем телеконтролю типу

LWD/MWD (S.Prensky, Z.Q.Yue [4], T.V.Singh, R.Sain [8].)

Окремі аспекти проблеми буримості гірських порід знайшли відображення в роботах таких видатних українських вчених, як М.І.Горбійчук [12], М.А.Мислюк, Ю.О.Зарубін [13], О.Т.Драганчук, Т.О.Пригородська [14], Р.С.Яремійчук [15] та ін. Можна назвати чимало інших учених, які доводять необхідність використання в процесі поглиблення свердловин поточної інформації про буримість гірських порід.

Водночас, недостатньо досліджені наукові проблеми ідентифікації буримості гірських порід в режимі on-line, зокрема проблема ідентифікації буримості порід для задач оптимізації управління процесом поглиблення нафтових і газових свердловин в умовах апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта керування. Слід відзначити, що труднощі ідентифікації буримості гірських порід обумовлені різноманіттям підходів до її оцінки, недостатністю інформації і недоліками технічних засобів сучасних систем автоматичного контролю.

Мета роботи полягає в розробленні методу ідентифікації та автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин роторним способом.

Досягнення вказаної мети забезпечується шляхом розв'язання таких взаємозв'язаних задач:

- аналіз сучасних методів і систем ідентифікації та контролю буримості гірських порід;
- проведення досліджень взаємозв'язків основних факторів, що визначають буримість гірської породи, та обґрунтування найбільш інформативного параметру для оцінювання буримості порід в реальному часі;
- розроблення математичної моделі буримості гірських порід, динамічної інформаційної моделі і методу визначення базових значень показника буримості;
- вибір оптимальної частоти дискретного контролю відхилень показника буримості гірських порід за межі порогового значення, яка забезпечує визначення меж залягання гірських порід різної буримості за заданим критерієм вірогідності контролю;
- розроблення та дослідження автоматизованої системи безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин.

Об'єктом дослідження є технологічний процес поглиблення нафтових і газових свердловин роторним способом.

Предметом дослідження є методи моделювання та ідентифікації буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин як головного збудуючого впливу, що діє на об'єкт керування.

Досліджуваним об'єктом є процес поглиблення нафтових і газових свердловин роторним способом, який розвивається в часі і функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта під впливом завад. В експериментах використана серійна система керування процесом буріння SKUБ-М2 та її прилади.

Результати дослідження

З метою розроблення математичної моделі буримості гірських порід, інформація про яку є необхідною передумовою вибору раціонального типу бурового долота і оптимізації процесу буріння нафтових і газових свердловин, розглянуто особливості кількісних мір оцінювання буримості гірських порід (початкової механічної швидкості буріння v_0 ; тривалості буріння фіксованого значення проходки долота t_ϕ ; величини проходки за фіксований час h_ϕ ; енергоємності буріння одиниці ствола E ; питомої енергії руйнування породи E_n) і взаємозв'язків її з абразивністю порід [16].

Показано, що лише для доліт, зношування озброєння яких для певних інтервалів глибин незначне, оцінювати буримість можна за механічною швидкістю буріння

$$v_t = v_0 \varphi(t), \quad (1)$$

де $\varphi(t)$ – функція зношування долота.

Для опису зміни механічної швидкості буріння запропоновано використати залежність

$$\frac{dv_t}{dt} = -K_v v_t^m, \quad (2)$$

де K_v – коефіцієнт, який характеризує інтенсивність зношення долота і залежить від абразивних властивостей породи;

m – ціле додатне число, яке належить множині $N: N = \{0,1,2,3\}$.

Отримано рівняння

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = -K_v v_0^{m-1} \varphi^m(t), \quad (3)$$

яке дало змогу визначити функцію зношування долота $\varphi(t)$ для різних значень m і при початковій умові $\varphi(0)=1$. Розв'язки рівняння (3) зведені до таблиці 1.

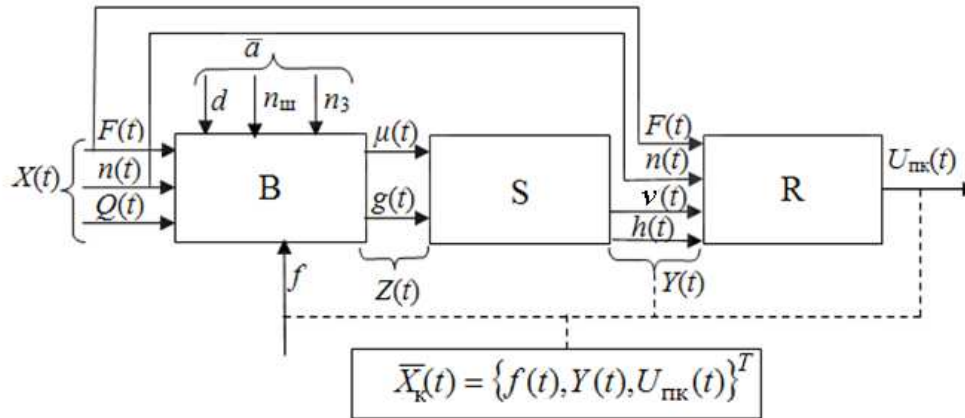
Показано, що оцінкою буримості гірської породи може слугувати початкова швидкість буріння v_0 за умови, що відомі певні базові режимні параметри.

Запропоновано розглядати сукупність «долото – порода» як єдиний об'єкт ідентифікації та контролю (рис. 1), стан якого характеризується параметрами стану долота $\bar{Z}^T(t) = [\mu(t), g(t)]$, де t – поточний час основного періоду роботи долота; $\mu(t), g(t)$ – оцінки зношування озброєння і опор долота відповідно, а також оцінкою міцності гірських порід, якою обрали такий показник, як буримість порід f .

З множини зовнішніх впливів, які діють на об'єкт ідентифікації та контролю, вибрані лише ті, що суттєво впливають на ефективність руйнування породи: вхідні керувальні дії

Таблиця 1 – Значення оцінок буримості гірських порід для різних значень m

Оцінка буримості гірських порід	Значення m			
	0	1	2	3
Функція зношування $\varphi(t)$	$1 - K_R t$, $K_R = \frac{K_v}{v_0}$	$e^{-K_v t}$	$\frac{1}{1 + K_\varepsilon t}$, $K_\varepsilon = v_0 K_v$	$\frac{1}{\sqrt{1 + K_q t}}$, $K_q = 2K_v v_0^2$
Час буріння t_Φ	$\frac{v_0}{K_v} \left(1 - \sqrt{1 - h_\Phi \frac{2K_v}{v_0^2}} \right)$	$-\frac{1}{K_v} \ln \left(1 - h_\Phi \frac{K_v}{v_0} \right)$	$\frac{1}{v_0 K_v} (e^{h_\Phi K_v} - 1)$	$\frac{1}{2K_v v_0} ((h_\Phi K_v v_0 + 1)^2 - 1)$
Проходка H_Φ	$\frac{v_0^2}{2K_v} (1 - (1 - K_R t_\Phi)^2)$	$\frac{v_0}{K_v} (1 - e^{-K_v t_\Phi})$	$\frac{1}{K_v} \ln(K_v v_0 t_\Phi + 1)$	$\frac{1}{K_v v_0} (\sqrt{2K_v v_0^2 t_\Phi + 1} - 1)$
Питома енергія E_{II}	$\frac{K_e w}{\left(v_0 - \frac{K_v}{2} t_\Phi \right) a d^2}$	$\frac{K_e w}{\frac{v_0}{t_\Phi K_v} (1 - e^{-K_v t_\Phi}) a d^2}$	$\frac{K_e w}{t_\Phi K_v} \ln(K_v v_0 t_\Phi + 1)$	$\frac{1}{K_v v_0 t_\Phi} (\sqrt{2K_v v_0^2 t_\Phi + 1} - 1)$



$\bar{X}_k(t)$ – контрольовані параметри

Рисунок 1 – Структурна схема процесу буріння свердловин як об'єкта ідентифікації та контролю буримості в просторових координатах

$$\bar{X}^T(t) = [F(t), n(t), Q(t)] \quad (4)$$

і апріорі відомі параметри долота

$$\bar{\alpha}^T = [d, n_{ш}, n_3],$$

- де F – осьова сила на долото;
 n – швидкість обертання долота;
 $Q(t)$ – витрата промивального розчину;
 d – діаметр долота;
 $n_{ш}$ – кількість шарошок;
 n_3 – кількість зубців на шарошках.

Параметри стану долота $Z(t)$ пов'язані з вхідними керувальними впливами $X(t)$, параметрами долота $\bar{\alpha}$, і буримістю порід f залежністю $Z_i(t) = B_i[\bar{X}(t), \alpha_i, f]$, $i = 1, 2, \dots, k$, де i – кількість доліт, B_i – оператор.

Вплив стану об'єкта на показники процесу буріння запропоновано характеризувати значеннями його вихідних величин \bar{Y}^T : проходки долота $h(t)$ і механічної швидкості буріння $v(t)$,

тобто $\bar{Y}^T(t) = \{h(t), v(t)\}$. Кожна з вихідних величин визначається через параметри стану $Z(t)$ своєю функціональною залежністю $Y_j(t) = S_j[Z(t)]$, $j = 1, 2$. Параметри контролю визначаються через вхідні і вихідні величини об'єкта $\bar{U}_{пк}^{(l)}(t) = R_l(\bar{X}(t), \bar{Y}(t), t)$, $l = 1, \dots, 4$.

Визначено клас задачі ідентифікації буримості гірських порід як виявлення подій в умовах невизначеності, і показник буримості запропоновано визначати безконтактним методом на основі комплексу контрольованих параметрів

$$f = M(\bar{Y}(t), \bar{X}(t)). \quad (5)$$

При незмінному векторі керувальних дій побудовано узагальнену математичну модель початкової механічної швидкості

$$v_0(t) = \phi[\bar{X}(t), B(t), A(t)], \quad (6)$$

де $B(t), A(t)$ – параметри, що характеризують буримість і абразивність породи.

Після введення додаткових умов використання математичної моделі, що містять тип оснащення долота і обмеження на мінімально допустиму витрату промивальної рідини Q , встановлено, що вихідна функція v_0 залежить від F, n, d і потужності P на долоті. Показано, що між всіма цими параметрами існує деяка функціональна залежність $\phi(v_0, F, n, P, d) = 0$, для розкриття якої перейшли від початкових розмірних координат до безрозмірних змінних, і, скориставшись π -теоремою Букінгема, одержали одну безрозмірну комбінацію, від якої залежить остаточний розв'язок задачі [16]:

$$\left(\frac{v_0 P}{F n^2 d^2} \right) = C = \text{const}, \quad (7)$$

де v_0, F, n, P, d – числові значення відповідних величин при деякому вибраному наборі основних одиниць фізичних величин.

З врахуванням виразу для потужності на долоті $P = C_p F^\gamma \cdot n^\delta$, де C_p – коефіцієнт, який враховує розмірність потужності, γ, δ – невідомі показники степеня, що підлягають ідентифікації, отримали узагальнену математичну модель

$$v_0 = C_p d^2 F^{1-\gamma} n^{2-\delta}. \quad (8)$$

Запропоновано для визначення постійних складових у величинах F, n ввести до розгляду базові величини n_0, F_0 : $n(t) = n_0 + n(t)$, $F(t) = F_0 + F_-(t)$, де $n_-(t), F_-(t)$ – стаціонарні в межах рейсу долота ергодичні випадкові процеси з нульовим математичним сподіванням.

Тоді узагальнена математична модель (8) набула такого вигляду

$$v_0 = k F_0^\alpha n_0^\beta \left(1 + \alpha \frac{F_-(t)}{F_0} + \beta \frac{n_-(t)}{n_0} \right), \quad (9)$$

де $k = C_p d^2$; $\alpha = 1 - \gamma$; $\beta = 2 - \delta$.

Розглянуто задачу оцінки впливу зношування озброєння традиційного шарошкового долота на механічну швидкість буріння. Для цього скористалися рівнянням

$v_0 = k_1 F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1}$ для механічної швидкості буріння незатупленим долотом, а потужність роторного механізму бурової установки виразили через механічну швидкість буріння і питомі енерговитрати у такому вигляді: для буріння незатупленим долотом $F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1} = \left(\frac{1}{k_1} \right)_0 v_0$,

для буріння затупленим долотом $F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1} = \left(\frac{1}{k} \right) v$, де v – механічна швидкість

при бурінні затупленим долотом; $\left(\frac{1}{k} \right)_0, \left(\frac{1}{k} \right)$ – питомі енерговитрати при бурінні незатупленим і затупленим долотом відповідно.

Взявши відношення потужностей з урахуванням того, що буріння ведеться з постійною потужністю, тобто $F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1} = F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1}$, отримали

$$\frac{\left(\frac{1}{k_1} \right)_0 v_0}{\left(\frac{1}{k} \right) v} = \frac{v_0}{\phi(t)}, \quad (10)$$

де $\phi(t) = \frac{w}{w_0}$ – функція зношування озброєння

шарошкового долота, яка являє собою відношення поточних питомих енерговитрат w до питомих енерговитрат w_0 при бурінні незатупленим долотом. Показано, що функція зношування $\phi(t)$ може бути визначена і як відношення механічної швидкості буріння v_0 незатупленим долотом до поточного значення механічної швидкості v , тобто

$$\phi(t) = v_0 v^{-1}. \quad (11)$$

$\phi(t)$ може набувати неперервного ряду значень - від $\phi(t) = 1$ до $\phi(t) = \infty$. При цьому $\phi(t) = 1$ відповідає нульовому фізичному зношуванню озброєння долота, а $\phi(t) = \infty$ – повному зношуванню.

Доведено, що швидкість зношування озброєння шарошкового долота пропорційна швидкості зростання питомих енерговитрат

$\frac{d\phi(t)}{dt} = w_0^{-1} \frac{dw}{dt}$; або швидкості падіння меха-

нічної швидкості буріння $\frac{d\phi(t)}{dt} = v_0 \frac{d(v^{-1})}{dt}$.

Показано також, що ступінь зношення озброєння шарошкового долота можна оцінити за темпом падіння механічної швидкості буріння:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{v_t} = \frac{\phi(t)}{v_0}, \quad (12)$$

який в процесі поглиблення свердловини приймає значення від $\varepsilon_y = \varepsilon_{y0} = \frac{1}{v_0}$ до $\varepsilon_y = \infty$ при

$v_0 \rightarrow 0$. Похідна від цього показника з урахуванням (12) дорівнює

$$\frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{d(v_t^{-1})}{dt} = \frac{d\phi(t)}{v_0}. \quad (13)$$

Якщо врахувати значення $\phi(t)$, які наведені в табл. 1, то можна визначити величини $\varepsilon_y, d\phi/dt, d\varepsilon_y/dt$ (табл. 2). На основі аналізу показників зношення доліт зроблено висновок: якщо механічна швидкість буріння змінюється за гіперболічним законом, тобто $\phi(t) = 1 + K_\varepsilon t$, тоді за

показником $K'_\varepsilon = \frac{d\phi(t)}{dt}$ можна оцінювати та-

кож абразивність гірських порід. Величину

$$\frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{K_\varepsilon}{v_0} \text{ позначили як } K_y = \frac{K_\varepsilon}{v_0}.$$

Таблиця 2 – Значення величин ε_y , $d\varphi/dt$, $d\varepsilon_y/dt$

Значення m	$\varepsilon_y = \frac{\varphi(t)}{v_0}$	$\frac{d\varphi}{dt}$	$d\varepsilon_y/dt$
0	$\frac{1}{v_0} \cdot \frac{1}{1-K_R t}$	$\frac{K_R}{(1-K_R t)^2} \cdot \frac{1}{v_0}$	$\frac{K_R}{(1-K_R t)^2}$
1	$\frac{e^{K_v t}}{v_0}$	$\frac{K_v}{v_0} e^{K_v t}$	$K_v e^{K_v t}$
2	$\frac{1}{v_0} \cdot (1+K_\varepsilon t)$	$\frac{K_\varepsilon}{v_0}$	K_ε
3	$\frac{1}{v_0} \cdot \sqrt{1+K_q t}$	$\frac{K_q}{v_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1+K_q t}}$	$\frac{K_q}{2 \cdot \sqrt{1+K_q t}}$

Висунуто гіпотезу і сформульовано допущення дали змогу в результаті аналізу математичних моделей встановити, що під час буріння в однорідному за буримістю інтервалі гірських порід, коли керувальні впливи $F = \text{const}$, $n = \text{const}$, $Q = \text{const}$, буримість гірських порід можна оцінити опосередкованою функцією

$$v_0 = \frac{v_t}{\varphi(t)}, \text{ де } \varphi(t) \text{ – функція, яка характеризує}$$

зношування озброєння долота. Ця функція, що визначається з табл. 2, залежить від типу вибраної моделі.

Як базове значення механічної швидкості буріння запропоновано обрати ту механічну швидкість, яка визначається на початку буріння алмазним долотом або незатупленим шарошковим долотом з оптимальними керувальними діями.

Розглянуто задачу, яка повинна розв'язуватися системою ідентифікації за експериментальними даними $v_t^{(i)}$: визначити параметри моделі v_t , тобто початкову механічну швидкість v_0 , і величину L , яка входить до структури залежності $\varphi(L,t)$. Параметр L визначався значенням показника m $L \in \{K_R, K_v, K_\varepsilon, K_q\}$. Параметри моделі $\hat{v}_t = v_0 \varphi(L,t)$ визначали за МНК-методом, тобто мінімізували функціонал:

$$J(v_0, L) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (v(t_i) - v_0 \varphi(L, t_i))^2. \quad (14)$$

Із першої умови мінімуму функціоналу (14) $\frac{\partial J(v_0, L)}{\partial v_0} = 0$ та другої умови

$$\frac{\partial J(v_0, L)}{\partial L} = 0 \text{ з урахуванням позначення}$$

$$\gamma(L, t_i) = \frac{\partial \varphi(L, t_i)}{\partial L} \text{ отримано рівняння:}$$

$$\sum_{i=1}^N (v(t_i) \gamma(L, t_i) - v_0 \varphi(L, t_i) \gamma(L, t_i)) = 0. \quad (15)$$

Значення функцій $\varphi(L, t_i)$ і $\gamma(L, t_i)$ для різних значень m наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Значення функцій $\varphi(L, t_i)$ і $\gamma(L, t_i)$ для різних значень m

m	$\varphi(L, t_i)$	L	$\gamma(L, t_i) = \partial \varphi(L, t_i) / \partial L$
0	$1 - K_R t_i$	K_R	$-t_i$
1	$e^{-K_v t_i}$	K_v	$t_i e^{-K_v t_i}$
2	$\frac{1}{1 + K_\varepsilon t_i}$	K_ε	$-\frac{t_i}{(1 + K_\varepsilon t_i)^2}$
3	$\frac{1}{\sqrt{1 + K_q t_i}}$	K_q	$-\frac{t_i}{2 \sqrt{1 + K_q t_i}}$

Крім моделі $v_t = v_0 \varphi(t)$ були проаналізовані моделі $v_t = a_0 + a_1 t$, $v_t = v_0 t^\beta$ і $v_t = a_0 + a_1 \ln t$. Другу нелінійну модель привели до лінійної, прологарифмувавши ліву і праву її частини: $\ln v(t_i) = \ln v_0 + \beta \ln(t_i)$. Введенням нових змінних $y_i = \ln v(t_i)$, $x_i = \ln(t_i)$, $\alpha = \ln v_0$ було отримано модель $y_i = \alpha + \beta x_i$, яка лінійна відносно параметрів α і β . До вказаних моделей застосовано МНК-метод й отримано наступне рівняння:

$$\bar{a} = CF^T \bar{Y}, \quad (16)$$

де \bar{a} – вектор параметрів моделі;
 $C = (F^T F)^{-1}$ – дисперсійна матриця;
 \bar{Y} – вектор вихідних величин.

Одержано результати порівнянь математичних моделей механічної швидкості проходки за допомогою комп'ютера. Критерієм адекватності прийнято значення дисперсії адекватності

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - h_i)^2. \quad (17)$$

де H_i – експериментальні значення проходки долота;

h_i – обчислені значення проходки, $i = \overline{1, N}$;
 N – кількість експериментальних точок.

Що стосується залежності початкової механічної швидкості буріння v_0 від керувальних дій F і n , то, оскільки апріорі відомо, що ця залежність має нелінійний характер, тому для математичного опису цих залежностей запропоновано використати багатовимірну нелінійну апроксимацію, яка має вигляд многочлена:

$$y = \sum_{i=1}^k a_i \prod_{j=1}^N U_i^{q_{js}}, \quad (18)$$

де U_i – керувальні впливи;

a_i – коефіцієнти полінома (параметри моделі);

q_{js} – невід'ємні цілі числа, які обмежені величинами Q_i ;

$0 \leq q_{js} \leq Q_i$; N – кількість керувальних впливів,

та обмежитися вибором квадратичної функції:

$$v_0(F, n) = a_0 + a_1 F + a_2 n + a_3 F^2 + a_4 n^2 + a_5 F n, \quad (19)$$

для ідентифікації параметрів якої використано МНК-метод.

Для розподілу гірських порід на класи за однаково буримістю як критерій запропоновано параметр L функціональної залежності $v_t = v_0 \varphi(L, t)$. Отримані результати досліджень [16] дали змогу визначити критерій $L_i \in \{K_{R_i}, K_{v_i}, K_{\varepsilon_i}, K_{q_i}\}$ (табл. 4), який характеризує сукупні фізико-механічні властивості гірської породи.

Таблиця 4 – Значення критерія L_i виявлення меж пластів

T	Оцінка стану озброєння долота	Значення критерію L_i
0	$\xi = \frac{v_t}{v_0}$	$K_{R_i} = \frac{1}{t_i} \left(1 - \frac{v_i}{v_0} \right)$
1	$\theta = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{v_i} = \frac{1}{t_i} \ln \frac{v_0}{v_i}$
2	$\varepsilon = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{\varepsilon_i} = \frac{1}{t_i} \left(\frac{v_0}{v_i} - 1 \right)$
3	$\zeta = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{q_i} = \frac{1}{t_i} \left(\left(\frac{v_0}{v_i} \right)^2 - 1 \right)$

Показано, що при переході долота із одного пласта в інший показник L_i стрибкоподібно змінює своє значення, і процес обчислення значення L_i генерує послідовність дискретних величин $L_i = \hat{L} + v_L$, де \hat{L} – математичне сподівання величини L_i ; v_L – перешкода, викликана,

з одного боку, інструментальними похибками вимірювань, а, з іншого, – зміною властивостей породи всередині пласта. Оскільки значення \hat{L} спотворено перешкодою, то стрибок \hat{L} , що відповідає моменту переходу долота через пласт, буде маскуватися цією перешкодою.

Зроблено припущення, що до моменту зміни пластів відомі статистичні характеристики перешкоди v_L , а після переходу долота в інший пласт стаціонарність перешкоди v_L не змінилась. Розглянуто задачу: на основі спостережень за величиною L_i при постійних режимних параметрах необхідно виявити момент переходу долота в інший пласт. Для її розв'язання запропоновано метод визначення меж гірських порід у процесі буріння, суть якого полягає в такому. На основі спостережень за випадковим дискретним процесом L_i формується функція

$$g_i = \frac{1}{\sigma_L^2} (L_i - \hat{L})^2, \quad (20)$$

де $\sigma_L^2 = M \left[(L_i - \hat{L})^2 \right]$ – дисперсія адитивної перешкоди v .

До моменту зміни пласта $\sigma_L = \sigma_L^{(1)}$, $L_i = L_i^{(1)}$, $\hat{L} = \hat{L}^{(1)}$ і послідовність g_i на кожному кроці спостережень збігається з

послідовністю $\left\{ \frac{1}{\sigma_L^{(1)2}} v_L^{(1)} \right\}$, де $v_L^{(1)} = L_i^{(1)} - \hat{L}^{(1)}$. Тому $M[g_i] = 1$.

Якщо в дискретний момент часу i_0 відбувся перехід долота із одного пласта в інший, тоді рівняння (20) з врахуванням того, що $L_i = \hat{L}^{(2)} + v_L^{(2)}$, набуде такого вигляду:

$$g_i = \frac{1}{\sigma_L^{(2)2}} (\Delta \hat{L} + v_L^{(2)})^2, \quad (21)$$

де $\Delta \hat{L} = \hat{L}^{(2)} - \hat{L}^{(1)}$, $\sigma_L^{(2)2} = M \left(L_i - \hat{L}^{(2)} \right)^2$.

Оцінка математичного сподівання випадкової послідовності (21) буде

$$M[g_i] = (\Delta \hat{L}^2 + \sigma_L^{(2)2}) / \sigma_L^{(1)2}, \quad \text{при } i > i_0. \quad (22)$$

Центруючи послідовність g_i , матимемо: $M[g_i - 1] = 0$ при $i < i_0$. При $i > i_0$ математичне сподівання послідовності g_i буде визначатись за формулою (22).

На кожному кроці спостережень разом з дискретною послідовністю g_i запропоновано обчислювати функцію

$$G_i = \sum_{R=1}^i \frac{g_R - 1}{\sqrt{2i}}. \quad (23)$$

Оскільки $M[G_i] = \frac{1}{\sqrt{2i}} \sum_{R=1}^i M[g_R - 1] = 0$, то

до моменту дискретного часу, поки долото не перейшло в інший пласт, математичне сподівання функції G_i дорівнює нулю. Показано, що після того, як долото перейшло в наступний

пласт $M[G_i] = \frac{S_m(i-i_0-1)}{\sqrt{2i}}$, де

$$S_m = \frac{\Delta L^2}{\sigma_L^{(1)2}} + \frac{\sigma_L^{(2)2}}{\sigma_L^{(1)2}} - 1.$$

Таким чином, до моменту переходу долотом меж пластів значення функції G_i коливається біля середнього значення, після того як долото перейшло в інший пласт ($i > i_0$) послідовність $|G_i|$ у середньому зростає з плином часу. Враховуючи цю властивість функції G_i , для виявлення моменту часу i_0 переходу долота в інший пласт використано процедуру порівняння значення G_i у кожний момент часу з певним порогом Δg . За оцінку значення i_0 береться величина, для якої виконується умова $|G_i| \geq \Delta g$, де $\Delta g = 2,5$ [12].

Показано, що для зменшення похибки оцінки моменту часу переходу долотом меж двох пластів доцільно спільне використання функції G_i та так званого Z-алгоритму, основними параметрами якого є числа N , α і c , які повинні задовольняти наступним умовам: $N \geq N_0 = [1/\alpha]$, $0 < \alpha < 0,5$, $0,5 < c < 1$, де $[1/\alpha]$ – ціла частина числа $1/\alpha$. На кожному кроці спостережень за випадковою величиною L_i запропоновано обчислювати функцію

$$Z(m, N) = \left| \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L_i - \frac{1}{N-m} \sum_{i=m+1}^N L_i \right|, \quad (24)$$

для якої правило виявлення меж пластів має наступний вигляд:

$$d_N(i_0) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{m}/N > c; \\ 0, & \text{якщо } \hat{m}/N \leq c, \end{cases} \quad (25)$$

де $\hat{m} = i_0$ – оцінка моменту переходу долотом меж двох пластів.

Запропоновано процедуру визначення моменту i_0 за Z-алгоритмом.

Даний алгоритм було перевірено під час визначення моменту зміни пласта гірських порід для бурової «Спас-101» Прикарпатського УБР на глибині 2823-2865 м. Для цього вибирали такі параметри алгоритму: $N = 62$; $\alpha = 0,2$, $\Delta = 0,55$, то $[\alpha N] = 12$ і $N - [\alpha N] = 50$, тобто $m = 11, 12, \dots, 50$. На основі експериментального графіка функції $Z(m, N)$ встановлено, що $m(n) = 38$ і функція $Z(m, N)$ досягає максимуму. Обчислюємо $m/N = 38/62 = 0,61$. Оскільки $m/N > c$, то оголошується тривога $d_N = 1$. Для здійснення перевірки Z-алгоритму було використано G-алгоритм.

Для реалізації даних алгоритмів розроблено функціональну структуру мікропроцесорного пристрою, який інтегрований в систему СКУБ-М2.

Запропоновано також здійснювати розбиття гірської породи на класи за буримістю на основі ШНМ зустрічного поширення, яке включає вхідний шар і шари нейронів Кохонена та Гроссберга [16].

Навчання ШНМ здійснювали за допомогою імітаційного моделювання. Початкова швидкість буріння v_0 моделювалась наступним чином:

$$v_0 = \hat{v}_0 + v_t, \quad (26)$$

де v_t – адитивна перешкода з нульовим математичним сподіванням.

Для встановлення виду функції густини розподілу використано дані, отримані при бурінні свердловини Прутець 1; тип долота – ТКЗ-190,5; глибина – 4118 м; спосіб буріння – роторний. Параметри режиму буріння: осьова сила на долото – 160,3 кН; частота обертання долота – 1,08 с⁻¹. За результатами буріння побудовано графік проходки $h(t)$ (рис. 2), з якого видно, що за час буріння, який складає 0,37 год., зношення долота було незначним.

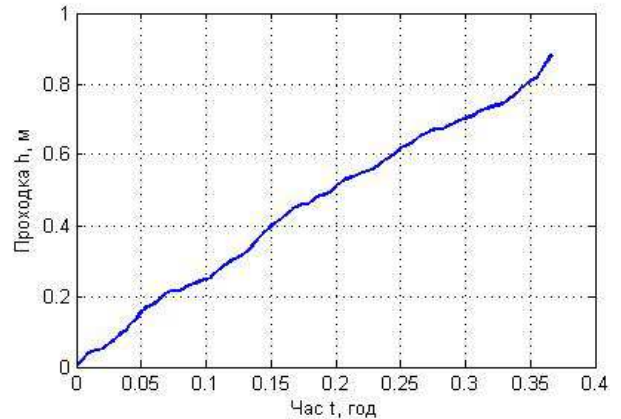


Рисунок 2 – Зміна у часі t проходки h

Тому початкову швидкість буріння обчислювали за формулою

$$v_0^{(i)} = \frac{h(t_i) - h(t_i - \Delta t_i)}{\Delta t_i}, \quad (27)$$

де $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, $i = 2, 3, \dots, n$;

n – кількість відліків проходки $h(t_i)$ на інтервалі часу $[0; t_n]$.

Відповідним чином визначалась механічна швидкість буріння V_i і адитивна перешкода

$$v_i = v_0^{(i)} - \hat{v}_0, \text{ де } \hat{v}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_0^{(i)}.$$

Графік залежності $v_i(t)$ наведено на (рис. 3).

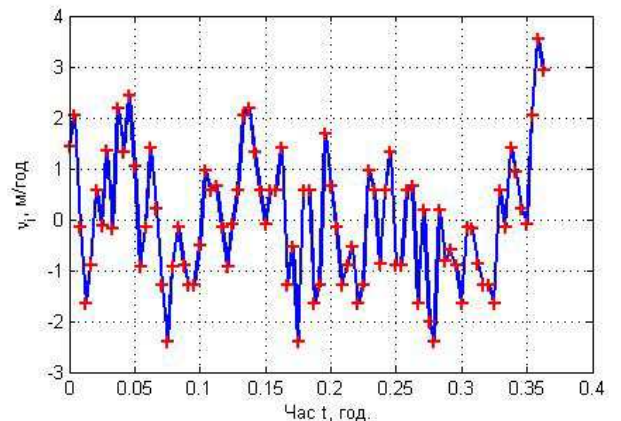


Рисунок 3 – Зміна у часі t механічної швидкості буріння v_i

Таблиця 5 – Значення \tilde{v}_0 , які використовувались в імітаційному експерименті

\tilde{v}_0 , м/год	2,7	3,9	4,5	7,3	9,9	Середнє значення ймовірності
Ймовірність	0,89	0,93	0,92	0,95	0,94	0,926

За отриманими даними побудовано гістограму випадкової величини v_i , а для перевірки гіпотези про відповідність експериментальних даних нормальному закону розподілу був використаний χ^2 -критерій. Обчислене значення χ^2 -критерію – $\chi^2 = 7,69$. Знаючи закон розподілу випадкової величини v і його параметри, генерували випадкову послідовність \tilde{v}_0 . Значення \tilde{v}_0 вибирали із масиву $\tilde{v}_0 \in \{2,6; 3,7; 4,9; 7,1; 10,2\}$.

Було вибрано 5 класів векторів. Мережу навчали на вибірці з 250 елементів. Класифікація згенерованих векторів здійснювалась за допомогою LVQ-мережі, кількість нейронів якої обчислювалась за формулою:

$$L = \frac{L_w}{n + m}, \quad (28)$$

де L_w – число синоптичних ваг у нейромережі, яке визначено за формулою:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left(\frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m, \quad (29)$$

де n, m – відповідно розмірності вхідного і вихідного сигналів;

N – число елементів навчальної вибірки.

Проведено тестування мережі, яке показало, що після навчання мережа правильно виконала класифікацію (рис. 4, а). Як приклад, на (рис. 4, б) наведено результат класифікації вектора $\tilde{V}_0(t)$ зі значенням $\tilde{v}_0 = 3,7$ м/год і $\sigma_v = 0,98$. Видно, що мережа віднесла його до другого класу.

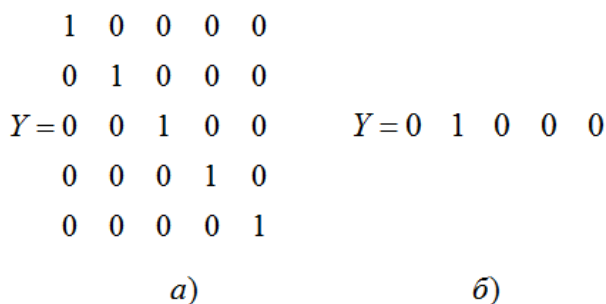


Рисунок 4 – Результат тестування мережі (а) і віднесення вектора $\tilde{v}_0(t)$ (б) до певного класу

Визначено ймовірність правильної класифікації властивостей гірських порід за буримістю за допомогою імітаційного експерименту. Були взяті значення \tilde{v}_0 , які наведені у табл. 5.

Проведено 100 імітаційних експериментів для кожного із п'яти значень \tilde{v}_0 . Значення ймовірності віднесення вектора $\tilde{v}_0 = \tilde{v}_0 + \bar{v}$ до

певного класу зведені у табл.5. Показано, що нейронна мережа зустрічного поширення дала змогу з ймовірністю 0,92 здійснювати правильну класифікацію порід за початковою швидкістю буріння, навіть при високому рівні шумів.

Для прогнозування середнього значення механічної швидкості буріння на тлі високочастотних завод з допустимим рівнем помилки запропоновано використати штучну нейронну мережу у вигляді лінійної тришарової мережі і реалізувати її на базі програмної системи Neural Analyzer 3.0. Як «навчальну множину» нейронної мережі використано експериментальні дані.

Визначено вірогідність контролю буримості гірських порід $\beta = 1 - \frac{p_x^*}{p_x} = 0,92$, де $p_x^* = 0,008$

– ймовірність помилкових рішень при використанні розробленого методу ідентифікації буримості гірських порід; $p_x = 0,1$ – ймовірність помилкових рішень до застосування контролю буримості гірських порід, що визначена за даними підприємства при рівні значущості $\alpha = 0,1$.

Висновки

За результатами досліджень взаємозв'язків основних факторів, що визначають буримість гірських породи, обґрунтовано найбільш інформативний параметр для оцінювання буримості породи в реальному часі, розроблено узагальнену математичну модель буримості в просторі станів, а також динамічну інформаційну модель і метод ідентифікації базових значень показника буримості, який полягає у тому, що для автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід обирається та механічна швидкість, яка визначається на початку буріння алмазним або незатупленим шарошковым долотом при бурінні з оптимальними параметрами режиму, що дає змогу визначати зв'язки показників буримості з глибиною свердловини, які є основою для поточної оптимізації управління процесом поглиблення нафтових і газових свердловин.

Аналіз отриманих результатів показав, що розроблений метод ідентифікації буримості гірських порід охоплює всі гірські породи - від м'яких до твердих. Розроблений рекурентний алгоритм кумулятивних сум для оброблення вимірювальної інформації про буримість гірських порід забезпечує розв'язання задачі визначення меж пластів, однорідних за буримістю. Ефективність і збіжність алгоритму підтверджена імітаційним моделюванням та результатами промислових досліджень, проведених на бурових Прикарпаття, що підтвердило доціль-

ність застосування його в системі оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин.

Література

1 Бингхэм М.Г. Проблемы буримости горных пород / М.Г.Бингхэм. – М: ВНИИОЭНГ, 1966. – 126 с.

2 Wilmot M. Formation drillability – definition, quantification, and contribution to bit performance evaluation / M. Wilmot, B. Calhoun, V.P. Perrin // SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference. Abu Dhabi, UAE, Paper SPE. – 1999. – P. 575-578.

3 Hoseinie S.H. Development of a new classification system for assessing of Rock mass Drillability index (RDi) // S.H. Hoseinie, H. Aghababaei, Y. Pourrahimian // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2008. – 45(1), P. 1–10.

4 Yue Z.Q. Automatic monitoring of rotary-percussive drilling for ground characterization – illustrated by a case example in Hong Kong [J] / Z.Q.Yue, C.F.Lee, K.T.Law // Int J Rock Mech Min Sci. – 2006. – 41(4). – P.573–612.

5 Prenskey S. Recent advances in LWD/MWD and formation evaluation [J] / S. Prenskey // World Oil. – 2006. – 227(3). – P. 69–75.

6 Olgav T. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values / T.Olgav, K.Sair // Space Technol. – 2011. – No 26. – P. 406–414.

7 Bilim N. Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties / N.Bilim // Sci. Res. Essays. – 2011. – No 6. – P. 382–387.

8 Singh T.N. A comparative analysis of cognitive system for the prediction of drillability of rocks and wear factor. Geotech / T.N. Singh, A.R. Gupta, R. Sain // Geol. Eng. – 2006. – No 24(2). – P. 299–312.

9 Tan Z-Y. Analysis of energy for rotary drilling in weathered granite formation / Z-Y Tan, Z-Q Yue, M-F Cai // Chin J Rock Mech Eng. – 2007. – No 26(3). – P.478–485.

10 Tian H. Identification of interface of tuff stratum and classification of surrounding rock of tunnel using drilling energy theory / H.Tian S-c Li, Y-g Xue // Chin J Rock Mech Eng. – 2007. – No 33(8). – P.2457–2464.

11 Zhu H.Y. Rock mechanics characteristic of complex formation and faster drilling techniques in Western South China Sea oilfields / H.Y.Zhu, J.G.Deng, Y.H. Xie // Ocean Eng. – 2012. – No 44. – P.33–45

12 Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенцов. – Івано-Франківськ: Факел, 2003 – 493 с.

13 Мислюк М.А. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі [Текст]: навч. посібник /М.А. Мислюк, Ю.О. Зарубін. – Івано-Франківськ: Екор,1999. – 496 с.

14 Драганчук О.Т. Аналіз відпрацювання доліт РДС на родовищах України і світу / О.Т.Драганчук, Т.О.Пригоровська // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 4. – С.11-14.

15 Яремійчук Р.С. Ідентифікація процесу руйнування гірських порід під час буріння свердловин внаслідок дії ультразвукової кавітації / Р.С.Яремійчук // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 3. – С.15-16.

16 Семенцов Г.Н. Сигнальна ідентифікація буримості гірських порід у процесі поглиблення нафтових і газових свердловин: [монографія] / Г.Н.Семенцов Н.В.Сабат. – Одеса: Куприенко С.В, 2013. – 185 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії

12.11.16

Рекомендована до друку

професором Олійником А.П.

(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)

професором Лопатіним В.В.

(Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С.Полякова НАН України, м. Дніпро)