

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-58-66>

УДК 681.5.015:622.24

ГОРБІЙЧУК Михайло

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0002-8586-1883>

gorb@nung.edu.ua

КРОПИВНИЦЬКИЙ Дмитро

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0003-1896-9322>

vitalia.krop@gmail.com

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИНИ З ВРАХУВАННЯМ СТАНУ ОЗБРОЄННЯ ДОЛОТА

В роботі запропоновано метод оптимального керування процесом поглиблення свердловини, який дозволяє знайти оптимальні значення керуючих впливів за критерієм відпрацювання долота та мінімізації вартості метра проходки.

Ключові слова: оптимальне керування, ітераційний метод, керуючі впливи, стан озброєння долота.

GORBIYCHUK Mykhail, KROPYVNYTSKYI Dmytro

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

OPTIMAL CONTROL OF THE WELL DEEPENING PROCESS CONSIDERING THE CONDITION OF THE BITTING EQUIPMENT

Since the process of mechanical deepening of the well is non-stationary, stochastic, evolving in time and largely unreproducible, there are no analytical dependencies for determining the initial speed and the change rate of the estimation of the state of the bit equipment, therefore, empirical models of the polynomial form were applied, which were obtained according to the conducted experimental research plan, the matrix of which is appropriate for a full two-factor experiment, since two parameters were chosen as controlling influences: the axial load on the bit and the rotor speed. The software has been developed, using MatLab environment to calculate the values of the initial speed of penetration and the rate of change of the assessment of the bit arming state. To determine the parameters of the mathematical model, the method of least squares was used, in accordance with which the square of the residual function was minimized. The values of the parameters of the found dependencies were used as the source material for the software implementation of the solution to the problem of finding the optimal mode of the well deepening process, considering the anticipatory wear of the bit armature. Since the objective function describing the criterion of optimality of the minimum cost of one meter of penetration is non-linear in relation to the control influences, and the restrictions on the magnitude of the axial load and the frequency of rotation of the rotor are two-sided, the method of sequential quadratic was implemented to solve the optimization problem with the MatLab environment programming. During the process of implementing this task, the optimal control actions and the final value of the assessment of the state of the drill equipment were determined according to the criterion of effective completion of the drills. As a result of the research, simulation modeling of the solution of the optimization problem was carried out, which showed a decrease in the cost of a meter of penetration by 2.8 times.

Keywords optimal control, iterative method, control influences, bit equipment state

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У міру вичерпання природних вуглеводнів приходиться проникати на все більші глибини у пошуках нових джерел нафти і газу. Для цього необхідно бурити глибокі свердловини, що тягне за собою значні матеріальні і фінансові ресурси. У цих умовах особливе значення мають як нові технологічні рішення – буріння нахилено-скерованих свердловин, впровадження безопорних алмазних доліт, так і методи, які дають змогу оптимального керування процесом механічного буріння за вартісним критерієм.

Впровадження методів оптимального керування, яке опирається на сучасні інформаційно-вимірвальні системи, обчислювальну і мікропроцесорну техніку та відповідне програмне забезпечення, може дати до 25 % економії на провідку свердловин [1].

Процес механічного буріння протікає у середовищі з важко прогнозними характеристиками, які змінюють своє значення як з глибиною свердловини, так і при переході від одної свердловини до іншої, які бурять на одній площі. Тому процес буріння є нестационарним, стохастичним, таким, що розвивається у часі і в значній мірі не відтворюваним [2].

У таких умовах важливою науковою задачею є розроблення і удосконалення методів оптимального керування процесом механічного буріння за вартісним критерієм і на їх основі розроблення алгоритмічного і програмного забезпечення системи.

Огляд літературних джерел

Роботи з питань оптимального керування процесом механічного буріння охоплюють два напрямки. Перший з них відомий як задача раціонального відпрацювання бурових доліт. Розв'язок цієї задачі знайшов своє відображення у цілому ряду робіт [3–6]. Застосовувати такі критерії можна лише в тому випадку, коли відбувається зношення озброєння долота і цей фактор є вирішальним при бурінні свердловин шарошковими долотами. Навіть для безопорних доліт (алмазних), які мають значний ресурс роботи долота, в заключній стадії роботи на вибої свердловини постає задача їх раціонального відпрацювання.

За допомогою критеріїв відпрацювання доліт визначають такий час перебування долота на вибої свердловини, який забезпечує екстремум певного критерію [2]. При цьому допускають, що осьове навантаження на долото і частота його обертання попередньо визначені.

Другий напрямок бере свій початок в роботах американських вчених Galle E.M. і Woods H.B. [7, 8]. У цих роботах на основі емпіричної моделі, яка узагальнювала результати промислових досліджень по багатьох свердловинах, розв'язана задача оптимального керування процесом буріння за умови, що керуючі дії осьове навантаження на долото і частота його обертання є функціями часу при наявності певних обмежень. Як критерій оптимальності було вибрано вартість метра проходки свердловини. Задача розв'язана із застосування принципу максимуму. Пізніше подібна задача знайшла свій розв'язок в роботах [2, 9]. Недоліком такого підходу є неможливість плавного регулювання частоти обертання долота при роторному бурінні. Тому, у роботі [10] для керування запропонована стратегія, яка названа субоптимальним керуванням, суть якої у тому, що на певному часовому інтервалі керуючі дії підтримуються постійними, а при досягненні певного розрахованого часу відбувається перемикання керуючих впливів з одного рівня на інший. Така стратегія простіша в реалізації, ніж керування процесом, коли керуючі дії є функціями часу.

Найпростішим методом оптимального керування є спосіб, коли керуючі дії – осьове навантаження на долото і частота його обертання підтримуються постійними протягом всього рейсу проходки.

Порівняльний аналіз трьох методів керування, коли керуючі дії є функціями часу, субоптимального керування і керування при постійних керуючих впливах показав [11], що при реалізації змінного в часі керування в порівнянні з режимом, коли керуючі впливи постійні в часі, зменшення вартості проходки склало 2,7 %; реалізація субоптимального керування в порівнянні з режимом, коли керуючі впливи є незмінними протягом одного рейсу проходки, приводить до зменшення вартості проходки на 1,5 %; оптимальне керування в порівнянні з субоптимальним керуванням дає зменшення вартості проходки на 1,2 %.

Таким чином, реалізація керуючих дій як функцій часу дає незначний ефект у порівнянні з керуванням, коли осьове навантаження на долото і частота його обертання є незмінними величинами протягом одного рейсу проходки.

Аналіз літературних джерел показує, що задачі раціонального відпрацювання доліт і оптимального керування процесом поглиблення свердловин розглядалися як дві самостійні задачі. Проте вони тісно пов'язані між собою. Визначення оптимального часу перебування долота на вибої свердловини допускає, що певним чином вибрані керуючі впливи – осьове навантаження на долото і частота його обертання. І навпаки, для визначення оптимальних керуючих дій за вибраним критерієм оптимальності необхідно розв'язати задачу раціонального відпрацювання доліт.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розроблення методу оптимального керування процесом поглиблення свердловин, який поєднує у собі дві задачі: раціонального відпрацювання доліт за озброєнням і вибору оптимальних керуючих дій – осьового навантаження на долото і частоти його обертання за вартісними критерієм за умови, що відомі обмеження на керуючі дії.

Виклад основного матеріалу

Допускаємо, що основним фактором, який визначає тривалість перебування долота на вибої свердловини, є знос його озброєння.

При такому допущенні процес поглиблення свердловини описується [12] такою системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{v_0(\bar{U})}{\xi(t)}, \quad (1)$$

$$\frac{d\xi(t)}{dt} = K_\xi(\bar{U}) \quad (2)$$

за таких початкових умов $h(0) = 0$, $\xi(0) = 1$.

У рівняннях (1) і (2) прийняті такі позначення: $h(t)$ - поточне значення проходки на долото; $v_0(\bar{U})$ - початкова швидкість механічного буріння; $\xi(t) = \frac{v_0(\bar{U})}{v(t)}$ - оцінка стану озброєння долота; $K_\xi(\bar{U})$ - швидкість зміни оцінки стану озброєння долота; $\bar{U} = (F_b, N_b)^T$ - вектор керуючих дій – осьового навантаження на долото F_b і частоти його обертання N_b .

Як критерій оптимальності виберемо вартість метра проходки на долото, тобто

$$q_c = \frac{C_d(t_d + T_{lo}) + d_c}{h(t_d)}, \quad (3)$$

де C_d - вартість роботи бурової установки на протязі одної години; t_d - час перебування долота на вибої свердловини; T_{lo} - тривалість спуско-піднімальних операцій; d_c - вартість долота.

Оскільки ми допустили, що $\bar{U} = \text{const}$. Тоді $v_0 = v_0(\bar{U})$ і $K_\xi = K_\xi(\bar{U})$ - постійні величини.

Розв'язок рівняння (2) за початкової умови $\xi(0) = 1$ дасть такий результат:

$$\xi(t) = K_\xi t + 1. \quad (4)$$

У момент закінчення чергового рейсу $t = t_d$ і $\xi_f = \xi(t_d)$. Тоді із рівняння (4) знаходимо, що

$$t_d = \frac{1}{K_\xi} (\xi_f - 1). \quad (5)$$

Якщо врахувати рівняння (4), то співвідношення (1) прийме такий вигляд:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{v_0}{K_\xi t + 1}. \quad (6)$$

Розв'язок диференціального рівняння (6) з початковою умовою $h(0) = 0$ буде таким:

$$h(t) = \frac{v_0}{K_\xi} \ln(K_\xi t + 1). \quad (7)$$

У момент закінчення чергового рейсу проходки $t = t_d$ і, відповідно рівняння (7) набуде такого значення:

$$h(t_d) = \frac{v_0}{K_\xi} \ln(K_\xi t_d + 1).$$

Із рівняння (4) випливає, що $\xi_f = K_\xi t_d + 1$. Тому

$$h(t_d) = \frac{v_0}{K_\xi} \ln \xi_f. \quad (8)$$

З врахуванням значень t_d і $h(t_d)$, які обчислені за формулами (5) і (8), критерій оптимальності (3) набуде такого значення:

$$q_c = \frac{C_d \left((\xi_f - 1) + K_\xi T_{lo} \right) + K_\xi d_c}{v_0 \ln \xi_f}. \quad (9)$$

Знайдемо таке значення ξ_f , щоб функція (9) набула мінімального значення. Оскільки

$$\frac{dq_c}{d\xi_f} = \frac{C_d - \frac{1}{\xi_f \ln \xi_f} \left(C_d \left((\xi_f - 1) + K_\xi T_{lo} \right) + K_\xi d_c \right)}{v_0 \ln \xi_f}.$$

Із необхідних умов існування мінімуму функції (9) випливає, що

$$C_d - \frac{v_0}{\xi_f \ln \xi_f} \left(C_d \left((\xi_f - 1) + K_\xi T_{lo} \right) + K_\xi d_c \right) = 0.$$

Враховуючи формулу (9), можемо записати

$$\xi_f = \frac{v_0}{C_d} q_c. \quad (10)$$

Співвідношення (10) є критерієм відпрацювання доліт[2] за умови, що відомі значення v_0 і q_c .

Оскільки початкова швидкість проходки v_0 і вартість метра пробуреної свердловини q_c є функціями керуючих дій – осьового навантаження на долото F_b і частоти його обертання N_b , то виникає друга задача: знайти такі значення F_b і N_b , щоб критерій оптимальності (9) набув мінімального значення при обмеженнях на керуючі дії F_b і N_b .

Задачу вибору оптимальних керуючих дій запишемо у формалізованому вигляді:

$$\min : \frac{C_d \left((\xi_f - 1) + K_\xi(\bar{U}) T_{lo} \right) + K_\xi(\bar{U}) d_c}{v_0(\bar{U}) \ln \xi_f} \quad (11)$$

при таких обмеженнях:

$$\bar{U}_{min} \leq \bar{U} \leq \bar{U}_{max}. \quad (12)$$

Аналіз співвідношень (11) і (12) показує, що для визначення оптимальних керуючих дій на основі критерію (11) необхідно знати значення ξ_f (або t_d).

Для вирішення поставленої задачі використаємо такий ітераційний алгоритм:

Крок 1. Задамо деяким значенням $\xi_f > 1$.

Крок 2. Розв'язуємо оптимізаційну задачу (11) і (12) та обчислюємо нове значення як розв'язок нелінійного рівняння (10) з врахуванням значення q_c , яке задано формулою (10). Для визначення ξ_f необхідно розв'язати таке нелінійне алгебраїчне рівняння:

$$\xi_f \left(1 - \ln \xi_f\right) - 1 + K_\xi \left(T_{lo} + \frac{d_c}{C_d}\right) = 0. \quad (13)$$

Крок 3. Покласти $q_c^{(old)} = q_c$.

Крок 4. Розв'язати задачу (11) і (12), використовуючи значення ξ_f знайдене на кроці 2.

Крок 5. Якщо виконується умова $q_c < q_c^{(old)}$, то перейти до кроку 2; інакше кінець обчислень.

Програмна реалізація методу

Для програмної реалізації методу необхідно мати такі залежності: $v_0 = v_0(F_b, N_b)$ і $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$.

На теперішній час не існує теорії, на основі якої можна було б отримати аналітичні залежності $v_0 = v_0(F_b, N_b)$ і $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$. Тому використовують емпіричні моделі для опису співвідношень $v_0 = v_0(F_b, N_b)$ і $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$.

У роботі [2] запропоновані такі емпіричні моделі:

$$\{v_0(F_b, N_b), K_\xi(F_b, N_b)\} = k_i F_b^{\alpha_i} N_b^{\beta_i}, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

Емпіричну модель (14) можна лінеаризувати, прологорифмувавши ліву і праву частини співвідношення (14), тобто

$$Y = K_i + \alpha_i X_1 + \beta_i X_2, \quad i = 1, 2,$$

де $Y \in \{\log v_0, \log K_\xi\}$, $K_i = \log k_i$, $X_1 = \log F_b$, $X_2 = \log N_b$.

Доведено [2], що така лінеаризація можлива при виконанні таких умов:

$$\sigma_{\Delta, v_0}^2 = \frac{\sigma_{e, v_0}^2}{v_0^2(F_b, N_b)} \left(1 + \frac{\sigma_{e, v_0}^2}{2v_0^2(F_b, N_b)}\right), \quad (15)$$

$$\sigma_{\Delta, K_\xi}^2 = \frac{\sigma_{e, K_\xi}^2}{K_\xi^2(F_b, N_b)} \left(1 + \frac{\sigma_{e, K_\xi}^2}{2K_\xi^2(F_b, N_b)}\right), \quad (16)$$

де σ_{e, v_0}^2 і σ_{e, K_ξ}^2 - дисперсії перешкод, які виникають внаслідок того, що величини F_b і N_b спостерігаються на фоні адитивних перешкод; σ_{Δ, v_0}^2 і σ_{Δ, K_ξ}^2 - дисперсії, які характеризують відхилення реальної моделі від моделі (14).

У тому випадку, коли $\sigma_{e, v_0}^2 \rightarrow 0$ і $\sigma_{e, K_\xi}^2 \rightarrow 0$ така лінеаризація може мати місце. На практиці остання умова практично не виконується. Тому емпіричні моделі $v_0 = v_0(F_b, N_b)$ і $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$ будемо синтезувати у вигляді поліномів.

Для підвищення точності визначення параметрів емпіричних моделей $v_0 = v_0(F_b, N_b)$ і $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$ використаємо процедуру, розроблену у роботі [2], яка складається із двох етапів.

На першому етапі реалізують розроблений план експерименту. Бурять свердловину на задану глибину, змінюючи при цьому фактори F_b і N_b у відповідності з планом експерименту. У певні моменти часу t_j змінюються значення F_b і N_b , що тягне за собою зміну початкових умов для диференціальних рівнянь (1) і (2). Оскільки функції $h(t)$ і $\xi(t)$ - неперервні функції в часу, то будуть мати місце такі співвідношення:

$$h(t_0) = 0, \quad h_{j-1}(t_{j-1}) = h_j(t_{j-1}), \quad (17)$$

$$\xi(t_0) = 1, \quad \xi_{j-1}(t_{j-1}) = \xi_j(t_{j-1}), \quad j = \overline{2, N_s}, \quad (18)$$

де N_s - кількість пробурених інтервалів у відповідності з планом експерименту; $t_0 = 0$.

Якщо врахувати початкові і граничні умови (17) і (18), то отримаємо такі залежності:

$$h_j(t) = \frac{v_{0,j}}{K_{\xi,j}} \ln \frac{\xi_j(t)}{\xi_j(t_{j-1})} + h_{j-1}(t_{j-1}), \quad \xi_1(t_0) = 1, \quad h_0(t_0) = 0, \quad j = \overline{1, N_s}, \quad (19)$$

$$\xi_j(t) = 1 + K_{\xi,j}(t - t_j) + \sum_{r=1}^{j-1} K_{\xi,r}(t_r - t_{r-1}), \quad t_1 = 0, \quad j = \overline{1, N_s}. \quad (20)$$

У відповідності з планом експерименту глибина свердловини збільшилась на глибину H . Спостереження за поточним значенням проходки велись в дискретні моменти часу. Тому $H = H(t_k)$, $k = \overline{1, N_q}$, де N_q - кількість відліків.

Для визначення параметрів моделі (19) і (20) скористаємося методом найменших квадратів, у відповідності з яким мінімізується квадрат функції нев'язки, тобто

$$J(\bar{a}_j) = \sum_{k=1}^{N_q} (H_j(t_k) - h_j(t_k, \bar{a}_j))^2, \quad j = \overline{1, N_s}, \quad (21)$$

де $\bar{a}_j = (v_{0,j}, K_{\xi,j})^T$ - вектор параметрів моделі (19), у якій $\xi_j(t)$ визначено формулою (20).

Мінімізація функції (21) за змінними v_0 і K_{ξ} з врахуванням формул (19) і (20) дала такий результат:

$$\sum_{k=1}^{N_q} (H_j(t_k) - h_j(t_k, \bar{a}_j)) \ln \frac{\xi_j(t_k)}{\xi_j(t_{j-1})} = 0, \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^{N_q} \left(H_j(t_k) - \left(\frac{v_{0,j}}{K_{\xi,j}} R_{j,k} + h_{j-1}(t_{j-1}) \right) \right) R_{j,k} = 0, \quad j = \overline{1, N_s}, \quad (23)$$

де $R_{j,k} = \ln \frac{\xi_j(t_k)}{\xi_j(t_{j-1})}$.

Із рівняння (23) визначимо величину v_0 . Маємо

$$v_{0,j} = \frac{K_{\xi,j}}{\sum_{k=1}^{N_q} R_{j,k}^2} \sum_{k=1}^{N_q} \Omega_{j,k} R_{j,k}, \quad j = \overline{1, N_s}, \quad (24)$$

де $\Omega_{j,k} = H_j(t_k) - h_{j-1}(t_{j-1})$.

У рівняння (22) підставимо значення $h_j(t)$, яке визначено формулою (19). Це дало такий результат:

$$\sum_{k=1}^{N_q} \left(R_{j,k} - \frac{\sum_{k=1}^{N_q} R_{j,k} \Omega_{j,k}}{\sum_{k=1}^{N_q} \Omega_{j,k}^2} \Omega_{j,k} \right) \cdot \left(K_{\xi,j} \frac{\xi_j(t_{j-1})(t_k - t_j)}{\xi_j(t_j)} - \Omega_{j,k} \right) = 0, \quad j = \overline{1, N_s}. \quad (25)$$

Рівняння (24) є нелінійним відносно змінної $K_{\xi,j}$ і для його розв'язування необхідно використати один із числових методів. Аналіз структури рівняння (25) показав, що для знаходження $K_{\xi,j}$ доцільно використати метод дихотомії [13]. Інші методи, такі як метод Ньютона, для програмної реалізації якого необхідно обчислювати похідні, метод січних і хибного положення не гарантують збіжності алгоритму [14].

Після того як за допомогою числового методу розв'язано рівняння (25) і знайдено значення $K_{\xi,j}$, є можливість знайти $v_{0,j}$ за формулою (24).

На цьому закінчується перший етап ідентифікації параметрів математичної моделі (1) і (2) процесу поглиблення свердловини.

На другому етапі ідентифікації залежності $v_0(\bar{a}, \bar{U})$ і $K_{\xi}(\bar{a}, \bar{U})$ будемо синтезувати за результатами першого етапу. Проведені комп'ютерні експерименти показали, що для залежностей $v_0(\bar{a}, \bar{U})$ і $K_{\xi}(\bar{a}, \bar{U})$ доцільно вибрати такі емпіричні залежності:

$$v_0(\bar{a}, \bar{U}) = \alpha_{v,0} + \alpha_{v,1} F_b + \alpha_{v,2} N_b + \alpha_{v,3} F_b N_b, \quad (26)$$

$$K_{\xi}(\bar{a}, \bar{U}) = \alpha_{\xi,0} + \alpha_{\xi,1} F_b + \alpha_{\xi,2} N_b + \alpha_{\xi,3} F_b N_b. \quad (27)$$

Для уникнення некоректної задачі [15], яка виникає внаслідок того що величини F_b і N_b у точках експерименту за числовими значеннями значно відрізняються між собою, перейдемо до безрозмірних величин: $f_b = \frac{F_b}{F_{b,max}}$ і $n_b = \frac{N_b}{N_{b,max}}$, де $F_{b,max}$, $N_{b,max}$ - максимальні значення осьового навантаження на долото і частоти його обертання, які спостерігаються в експериментальному дослідженні.

Оскільки $F_b = F_{b,max} f_b$ і $N_b = N_{b,max} n_b$, то формули (26) і (27) будуть такими:

$$v_0(\bar{a}, \bar{U}) = a_{v,0} + a_{v,1}f_b + a_{v,2}n_b + a_{v,3}f_b n_b, \quad (28)$$

$$K_\xi(\bar{a}, \bar{U}) = a_{\xi,0} + a_{\xi,1}f_b + a_{\xi,2}n_b + a_{\xi,3}f_b n_b, \quad (29)$$

де $a_{v,0} = \alpha_{v,0}$, $a_{v,1} = \alpha_{v,1}F_{b,max}$, $a_{v,2} = \alpha_{v,2}N_{b,max}$, $a_{v,3} = \alpha_{v,3}F_{b,max}N_{b,max}$; $a_{\xi,0} = \alpha_{\xi,0}$, $a_{\xi,1} = \alpha_{\xi,1}F_{b,max}$, $a_{\xi,2} = \alpha_{\xi,2}N_{b,max}$, $a_{\xi,3} = \alpha_{\xi,3}F_{b,max}N_{b,max}$.

Після завершення етапу ідентифікації є можливість розв'язання задачі (11) і (12) за розробленою процедурою.

Імітаційний приклад розв'язання оптимізаційної задачі

Для розв'язання задачі мінімізації вартості метра проходки (11) при виконанні обмежень (12) та з врахуванні стану озброєння долота частково використаємо дані запозичені із роботи [2].

Для реалізації першого етапу ідентифікації пробурили свердловину на певну глибину у відповідності з розробленим планом експерименту (табл. 1).

Таблиця 1

План експериментального дослідження

№ експерименту	Осьове навантаження на долото F_b , кН	Частота обертання ротора N_b , c^{-1}	Величина проходки H_j , м
1	71.4293	0.7500	0,50
2	152.7432	0.7500	0,35
3	161.3875	1.0800	0,88
4	61.4213	1.0800	0,39

Для визначення параметрів математичної моделі (1) і (2) у середовищі MatLab створено програмне забезпечення, що дало змогу обчислити параметри v_0 і K_ξ за формулами (25) і (24).

Результат роботи програмного забезпечення задачі ідентифікації параметрів моделі (1) і (2)

ШВИДКІСТЬ ПРОХОДКИ, м/год

V0(1)= 0.8243

V0(2)= 1.9450

V0(3)= 3.4288

V0(4)= 2.9183

ШВИДКІСТЬ ЗМІНИ ОЦІНКИ СТАНУ ОЗБРОЄННЯ ДОЛОТА, 1/год

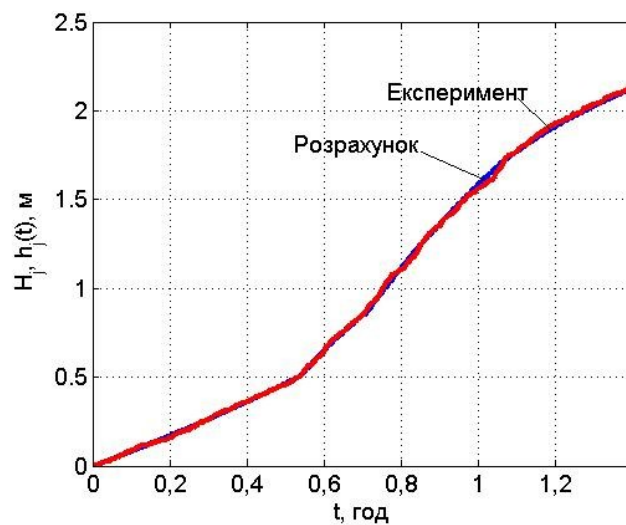
Ke(1)= 0.4712

Ke(2)= 2.2456

Ke(3)= 1.7144

Ke(4)= 4.2522

За результатами експерименту та розрахунку було побудовано залежність зміни проходки на долото від часу (рис. 1).

Рис. 1. Зміна у часі значень проходок $H(t)$ і $h(t)$

Адекватність моделі оцінювалась за величиною середньоквадратичного відхилення розрахункових даних від експериментальних значень за такою формулою:

$$\sigma_H^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (H_k - h(t_k))^2. \quad (30)$$

Обчислення дали такий результат: $\sigma_H^2 = 1,4623 \cdot 10^{-4}$.

Аналіз рис. 1 і отримане значення σ_H^2 свідчать про те, що математична модель (1) і (2) адекватно відтворює результати експерименту.

За значеннями $v_{0,j}$ і $K_{\xi,j}$, $j = \overline{1, 4}$, на другому етапі ідентифікації обчислювались параметри емпіричних моделей (28) і (29). Оскільки параметри в моделі (28) і (29) входять лінійно, то для їх обчислення застосований метод найменших квадратів, у відповідності з яким

$$\bar{a} = (F^T F)^{-1} F^T \bar{Z}, \quad (31)$$

де $F = [\bar{l} \ \bar{f} \ \bar{n} \ \bar{f} \cdot \bar{n}]$; \bar{l} - одинична стовпцева матриця; \bar{f} і \bar{n} - стовпцеві матриці, утворені із значень f_j і n_j , $j = \overline{1, 4}$; $\bar{f} \cdot \bar{n}$ - поелементний добуток двох векторів \bar{f} і \bar{n} ; $\bar{a} \in \{a_{v,i}, a_{\xi,i}\}$, $i = \overline{1, 4}$; $\bar{Z} \in \{v_{0,j}, K_{\xi,j}\}$, $j = \overline{1, 4}$.

За допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, обчислені параметри емпіричної моделі (28) і (29). Необхідні дані для розрахунків вміщує табл. 1.

Параметри емпіричних моделей (28) і (29)

ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ $v_0 = f(f, n)$

av(1)=-6.4441
av(2)= 5.4068
av(3)= 9.0488
av(4)=-4.5827

ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ $K_{\xi} = f(f, n)$

Ke(1)=-16.7665
Ke(2)= 20.8366
Ke(3)= 22.5779
Ke(4)=-24.9335

Значення параметрів залежностей (28) і (29) послужили вихідним матеріалом для програмної реалізації оптимального режиму процесу поглиблення свердловини з врахуванням випереджаючого зносу озброєння долота. Крім того були вибрані такі значення величин, що входять в критерій оптимальності (11): вартість роботи бурової установки протягом однієї години - $C_d = 3910$ грн./год.; вартість долота $d_c = 7500$ грн.; тривалість спуско-піднімальних операцій $T_{io} = 9,1$ год. Було взято таке початкове значення $\xi_f = 1,4$.

Оскільки осьове навантаження на долото і швидкість його обертання приведені до безрозмірних одиниць, то обмеження на керуючі дії були такими: $0 \leq f \leq 1$ і $0 \leq n \leq 1$. Як стартову точку у процесі розв'язуванні оптимізаційної задачі вибрано: $f^{(0)} = n^{(0)} = 0,3$.

Аналіз структури задачі (11) і (12) показує, що цільова функція (11) є нелінійною по відношенню до керуючих дій, а обмеження на величини f і n є двосторонніми. У такому випадку ефективним методом розв'язання задачі оптимізації є метод послідовного квадратичного програмування [14]. Такий метод послідовного квадратичного програмування реалізований в MatLab-процедурі як файл-функція fmincon.

Програмне забезпечення сформованої задачі оптимізації як рекурентної процедури, у процесі якої визначається не тільки оптимальні керуючі дії f і n , але й кінцеве значення ξ_f за критерієм ефективного відпрацювання доліт, створена в середовищі MatLab.

Результат ітераційної процедури оптимізації процесу поглиблення свердловини

ПОЧАТКОВИЙ РЕЗУЛЬТАТ

Значення оцінки стану озброєння
epsilon=1.40
Вартість метра проходки, грн./м q=66005.10
Осьове навантаження, кН. Fb=170.09
Частота обертання, 1/с. Nb=0.89

ОПТИМАЛЬНИЙ РЕЖИМ МЕХАНІЧНОГО БУРІННЯ

Значення оцінки стану озброєння
epsilon= 2.39
Осьове навантаження, кН. Fb=170.09

Частота обертання, 1/с. $N_b=1.08$
 Вартість метра проходки, грн./м $Q=23520.67$
 Час буріння, год. $td=10.31$

На основі аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що розроблена ітераційна процедура дає змогу визначити значення ξ_f та оптимальні керуючі дії F_b і N_b . У порівнянні з початковим значенням $\xi_f = 1,4$ оптимальне значення склало $\xi_f^* = 2,39$, що дало змогу зменшити вартість метра проходки з $q_c = 66005.10$ грн./м до $q_c = 23520.67$ грн./м, тобто 2,8 рази.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблений метод оптимального керування процесом поглиблення свердловини ґрунтується на критерію відпрацювання доліт за озброєнням і на вартості метра проходки свердловини і представляє собою ітераційний процес пошуку як оптимальних керуючих дій, так і часу закінчення чергового рейсу проходки.

Комп'ютерна програмна реалізація методу показала, що відбулося зменшення вартості метра проходки у 2,8 рази у порівнянні з початковим значенням, коли кінцева оцінка стану озброєння долота була вибрана, виходячи із даних літературних джерел.

Література

1. Dwight Yoder, James Williams. Computers in the drilling process. Petrol Megan. 1987. № 6. P. 29-32.
2. Горбійчук М. І. Семенов Г. Р. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин : монографія. Івано-Франківськ : Нова зоря, 2006. 393 с.
3. Ivasiv V., Yurych A., Zabolotnyi S., Yurych L., Bui V., Ivasiv O. Determining the influence of the condition of rockdestroying tools on the rock cutting force. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 1(103). P. 15-20.
4. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. М. : Инфра-М. 2015. 336 с.
5. Драганчук О.Т., Пригоровська Т.О. Аналіз відпрацювання доліт PDC на родовищах України і світу. Нафтогазова енергетика. 2008. №4. С. 11-15.
6. Балаба В. И., Бикбулатов И. К., Вышегородцева Г. Н. Буровой породоразрушающий инструмент. М. : Изд-во центр РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2013. 251 с.
7. Galle E.M., Woods H.B. Bit weight and rotary speed for lowest-cast drilling. Oil and Gas J. 1960. № 49. P. 167-176.
8. Galle E.M., Woods H.B. Practical ways to find proper bit weight and rotary speed. Oil and Gas J. 1960. № 47. P. 160-166.
9. Габашвили Н.В., Кирия Т.А., Чачашвили Л.Г., Чхаидзе Л.Л. Применение методов математического программирования для оптимизации режима бурения. Тбилиси : Мацниереба, 1971. 94 с.
10. Горбійчук М.І., Кропивницька В.Б. Субоптимальне керування процесом заглиблення свердловин. Нафтова і газова промисловість. 2003. № 1. С. 24-25.
11. Горбійчук М.І., Кропивницька В. Б. Методи оптимального керування процесом буріння. Матеріали 11 міжнародної конференції з автоматичному управлінню "Автоматика –2004", Київ, 2004, т. 2, с. 11.
12. Горбійчук М.І., Кропивницький Д. Р. Математична модель процесу поглиблення свердловини під час буріння гвинтовими вибійними двигунами. Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Миколаїв : Видавничий дім "Гельветика", 2021. № 1 (484). С. 68-74.
13. Горбійчук М. І., Пістун Є. П. Числові методи і моделювання на ЕОМ. Івано-Франківськ : Факел. 2010. 408 с.
14. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М. : Мир, 1985. 509 с.
15. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М. : Мир, 1973. 960 с.

References

1. Dwight Yoder, James Williams. Computers in the drilling process. Petrol Megan. 1987. № 6. R. 29-32.
2. Horbiichuk M. I. Sementsov H. R. Optymizatsiia protsesu burinnia hlybokyykh sverdllovyh : monohrafiia. Ivano-Frankivsk : Nova zoria, 2006. 393 s.
3. Ivasiv V., Yurych A., Zabolotnyi S., Yurych L., Bui V., Ivasiv O. Determining the influence of the condition of rockdestroying tools on the rock cutting force. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 1(103). R. 15-20.
4. Neskoromnyh V.V. Razrushenie gomnyh porod pri burenii skvazhin. M. : Infra-M. 2015. 336 s.
5. Drahanchuk O.T., Pryhorovska T.O. Analiz vidpratsiuvannia dolit PDC na rodovyschakh Ukrainy i svitu. Naftohazova enerhetyka. 2008. №4. S. 11-15.
6. Balaba V. I., Bikbulatov I. K., Vyshegorodceva G. N. Burovoj porodorazrushayushij instrument. M. : Izd-vo centr RGU нефти i gaza im. I. M. Gubkina. 2013. 251 s.
7. Galle E.M., Woods H.B. Bit weight and rotary speed for lowest-cast drilling. Oil and Gas J. 1960. № 49. R. 167-176.
8. Galle E.M., Woods H.B. Practical ways to find proper bit weight and rotary speed. Oil and Gas J. 1960. № 47. R. 160-166.

-
9. Gabashvili N.V., Kiriya T.A., Chachashvili L.G., Chhaidze L.L. Primenenie metodov matematicheskogo programmirovaniya dlya optimizatsii rezhima bureniya. Tbilisi : Macniereba, 1971. 94 s.
 10. Horbiichuk M.I., Kropyvnytska V.B. Suboptymalne keruvannia protsesom zahlyblennia sverdlovyh. Naftova i hazova promyslovist. 2003. № 1. S. 24-25.
 11. Horbiichuk M.I., Kropyvnytska V. B. Metody optymalnoho keruvannia protsesom burinnia. Materialy 11 mizhnarodnoi konferentsii z avtomatychnomu upravlinniu "Avtomatyka –2004", Kyiv, 2004, t. 2, s. 11.
 12. Horbiichuk M.I., Kropyvnytskyi D. R. Matematychna model protsesu pohlyblennia sverdlovyh pid chas burinnia hvyntovomy vybiinomy dvyhunamy. Zbirnyk naukovykh prats natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova. Mykolaiv : Vydavnychiy dim "Helvetyka", 2021. № 1 (484). S. 68-74.
 13. Horbiichuk M. I., Pistun Ye. P. Chyslovi metody i modeliuvannia na EOM. Ivano-Frankivsk : Fakel. 2010. 408 s.
 14. Gill F., Myurrej U., Rajt M. Prakticheskaya optimizaciya. M. : Mir, 1985. 509 s.
 15. Himmelblau D. Analiz processov statisticheskimi metodami. M. : Mir, 1973. 960 s.