

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 62-503.57:622.24

Горбійчук М. І.¹, Гуменюк Т. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

²Асистент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

НЕЧІТКА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОГЛИБЛЕННЯ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

При бурінні глибоких свердловин на нафту і газ важливе значення має правильний вибір впливів керування – осьового навантаження на долото і частоти його обертання з метою отримання мінімального значення вартості проходки. Вирішення поставленої задачі передбачає створення адекватної математичної моделі процесу поглиблення свердловин та розроблення методів ідентифікації її параметрів. Складність задачі у тому, що процес механічного буріння є стохастичним, нестационарним і таким, що розвивається у часі. Це значно ускладнює визначення традиційними методами ідентифікації цілого ряду параметрів, що впливають на процес руйнування породи. До таких параметрів можна віднести і тривалість спуско-піднімальних операцій, на значення яких впливають не тільки технологічні, технічні, але й суб'єктивні фактори. Для адекватного відтворення невизначеності значення тривалості спуско-піднімальних операцій їх запропоновано розглядати як нечіткі величини з певною функцією належності. Виходячи із цієї передумови, була сформульована задача нечіткої оптимізації процесу поглиблення свердловини і розробили метод її розв'язання. Ефективність розробленого методу підтверджена на конкретних промислових даних.

Ключові слова: буріння, критерій оптимальності, вартість, проходка, керування, функція належності, генетичний алгоритм.

НОМЕНКЛАТУРА

F – осьове навантаження на долото;
 N_d – частоти обертання долота;
 Q – витрати промивної рідини;
 C_{δ} – вартість роботи бурової установки на протяязі одної години;
 t_{δ} – затрати часу на механічне буріння;
 t_{cn} – тривалість спуско-піднімальних операцій (СПО);
 d – вартість долота;
 h – проходка на долото за час t_{δ} ;
 A_U – допустима область керування;
 W_p – потужність приводу ротора;
 F_{\min} – мінімальне значення осьового навантаження на долото;
 $N_{d\min}$ – мінімальне значення швидкості обертання долота;
 F_{\max} – максимальне значення осьового навантаження на долото;
 $N_{d\max}$ – максимальне значення швидкості обертання долота;

m – число, яке характеризує «розмитість» нечіткої величини t_{cn} ;
 σ – число, яке характеризує «розмитість» нечіткої величини t_{cn} ;
 $v_0(\bar{U}(t))$ – початкова механічна швидкість;
 $\varepsilon(t)$ – оцінка станів озброєння і опор шарошкового долота;
 $g(t)$ – оцінка станів озброєння і опор шарошкового долота;
 $K_{\varepsilon}(\bar{U}(t))$ – швидкість зміни у часі оцінок $\varepsilon(t)$;
 $K_g(\bar{U}(t))$ – швидкість зміни у часі оцінок $g(t)$;
 ε_k – значення оцінки ε в кінцевий момент часу $t = t_{\delta}$;
 g_k – значення оцінки g в кінцевий момент часу $t = t_{\delta}$;
 H – глибини свердловини;
 N – число експериментальних даних.

ВСТУП

Збільшення глибини свердловини, розбурювання родовищ у важкодоступних районах, на континенталь-

ному шельфі призводить до подальшого росту витрат, ефективне використання яких визначається рівнем розвитку техніки та технології процесу буріння. Головним завданням вдосконалення технології процесу буріння є забезпечення будівництва свердловини у найкоротший строк з найменшими витратами. Вирішення цієї проблеми в даний час пов'язується з подальшим підвищенням темпів і якості будівництва свердловин, оснащенням сучасними технічними засобами, впровадження прогресивних технологій. Будівництво свердловин у нашій країні ведеться із застосуванням трьох способів обертового буріння: турбінного, роторного і з застосуванням електробурів.

На сучасному етапі розвитку технології і техніки буріння нафтових і газових свердловин обертання долота на вибої свердловини здійснюється двома принципово різними способами – ротором і вибійними двигунами. Згідно з першим способом ротор приводиться в обертання двигуном, обертає бурову колону, котра складається з ведучої труби і з'єднаних з нею за допомогою спеціального перевідника бурильних труб і долота.

Серед комплексу технологічних процесів будівництва свердловини основним вважається поглиблення стовбура у заданому напрямку на задану глибину шляхом руйнування гірської породи на вибої свердловини долотом.

Метою роботи є розроблення методу нечіткої оптимізації процесу поглиблення глибоких свердловин, що дасть змогу визначити альтернативи із заданої множини факторів керування у відповідності з вибраним критерієм.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасні бурові установки дозволяють в широкому діапазоні змінювати осьове навантаження F на долото, і тому воно вважається основним керуючим впливом. Для зміни частоти обертання долота N_δ на даний час існують більш обмежені можливості. При роторному бурінні вона змінюється дискретно.

Що стосується витрати Q промивної рідини, то, як правило, цей параметр встановлюється дискретно і його в таких випадках відносять до частково керованих. Створення регульованих приводів ротора і насосів буде сприяти повному виконанню вимоги керованості для роторного буріння.

При роторному способі буріння параметри режиму F , N_δ , Q не залежать один від одного, але, обмежені технічними можливостями бурової установки: міцністю і діаметром бурильних труб, кількістю обважених бурильних труб, забезпеченням нормальної роботи наземного обладнання.

Оскільки у процесі буріння свердловини основну роль відіграє долото, воно повинно бути раціонально використане і своєчасно підняте з вибою для заміни. Причому і зношення долота, і руйнування породи залежить не тільки від параметрів режиму буріння, але й від глибини свердловини, фізико-механічних властивостей породи і долота, температури у свердловині, пластового тиску та інших факторів. Спільний аналіз показників роботи доліт і параметрів режиму буріння показує, наприклад, що зі збільшенням осьового навантаження на долото і частоти обертання процес руйнування породи протікає більш ефективно. Одно-

часно відбувається і більш інтенсивне зношення долота, і, отже, швидше з'являється необхідність його заміни, що призводить до збільшення часу, витраченого на спуско-підйомні операції і, в кінцевому рахунку, до збільшення вартості буріння. Намагання добитись високих швидкостей проводки свердловин і найменших витрат часу на заміну долота призводить до необхідності вирішення задачі оптимального оптимізації керування бурінням.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження як вітчизняних, так і зарубіжних вчених проаналізовані в роботі [1] стали передумовою розробки методів оптимального керування процесом буріння глибоких свердловин. У роботах цих авторів виявлені механізми руйнування гірських порід, вплив режимних параметрів і умов буріння на показники процесу буріння; сформульовані техніко-економічні показники такого процесу.

Вперше проблема оптимального керування процесом поглиблення свердловин була поставлена у кінці 40-х років 20 століття [1], яка відома як задача про вибір раціонального часу перебування долота на вибої свердловини.

У подальших дослідженнях [1–6] були розроблені методи керування буровим процесом на основі детерміновано-стохастичних моделей, які дають змогу прогнозу у кожному рейсі таких режимних параметрів і такого часу буріння, що вибраний критерій оптимальності набуває екстремального значення.

Проте процес буріння є нестационарним, стохастичним і таким, що розвивається у часі. Для врахування цієї особливості процесу буріння свердловин розроблені методи керування процесом буріння як стохастичним об'єктом [1], які допускають, що відома апріорна інформація про статистичні характеристики як вхідних, так і вихідних сигналів. У дійсності така інформація є недоступною, більш того, окремі параметри процесу буріння можна вказати лише наближено у термінах нечіткої математики.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

При керуванні процесом буріння осьове навантаження на долото F і швидкість його обертання N_δ , як правило, підтримується постійними на протязі всього рейсу буріння.

Тому поставимо задачу – знайти таке F і N_δ із допустимої області A_U , які є незмінним на протязі рейсу буріння і щоб критерій оптимальності вартість метра проходки q набув найменшого значення

$$\min : q = \frac{C_\delta (t_\delta(\bar{U}) + t_{cn}) + d}{h(\bar{U})}, \quad (1)$$

$$\bar{U} \in A_U, \quad (2)$$

де $\bar{U} = (F, N_\delta)^T$.

При постійній потужності приводу роторного механізму зі збільшенням глибини H свердловини зростають втрати потужності на тертя бурильних труб об стінки свердловини, зменшуються граничні значення параметрів ре-

жиму буріння. Одночасно зменшується потужність, затрачена на обертання долота. Тобто співвідношення між F і N_∂ повинно задовольняти умові [1]

$$A_1 N_\partial + A_2 N_\partial^2 + A_3 H N_\partial^{1.7} + A_4 N_\partial F \leq W_p, \quad (3)$$

де A_1, A_2, A_3 і A_4 – відомі величини, які не залежать від F, N_∂ і Q .

На керувальні дії F і N_∂ накладаються обмеження [1]

$$F_{\min} \leq F \leq F_{\max}, \quad (4)$$

$$N_{\partial \min} \leq N_\partial \leq N_{\partial \max}. \quad (5)$$

Таким чином, допустима область керування A_U в обмеженні (2) визначається системою нерівностей (3)–(5).

Значення величини t_{cn} з певною вірогідністю може бути оцінено, зокрема, шляхом передбачення за результатами його значення у попередніх рейсах [7]. Складність такого передбачення зумовлена тим, що конкретне значення визначається не лише типом та продуктивністю приводу бурової лебідки, глибиною та кривизною свердловини, але й цілим рядом суб'єктивних факторів, які пов'язані зі складом бурової бригади, кваліфікацією її членів, сезонністю робіт, погодними умовами та ін.

Таким чином, наявність багатьох факторів, які невизначеним чином впливають на тривалість спуско-піднімальних операцій дає всі підстави вважати, що t_{cn} є нечіткою величиною з певною функцією належності $\mu(t_{cn})$.

Слід відмітити, що не існує формальних правил вибору функцій належності [8, 9]. Вибір тої чи іншої структури функції належності диктується типом задачі, що розв'язується.

Оскільки величина t_{cn} входить у критерій оптимальності (1) лінійно, то у нашому випадку функцію належності доцільно вибрати у вигляді гаусової апроксимації:

$$\mu(t_{cn}) = \exp \left\{ -\frac{(t_{cn} - m)^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (6)$$

Якщо між елементами X і Y існує однозначна залежність, яка визначається співвідношенням

$$y = \varphi(x), \quad x \in X, \quad y \in Y, \quad (7)$$

і $\mu(t_{cn})$ функція належності нечіткої величини x , то у тих випадках, коли із (7) можна визначити $\varphi^{-1}(y) = \{x : x \in X, \varphi(x) = y\}$ будемо мати

$$\mu(y) = \mu(\varphi^{-1}(y)). \quad (8)$$

Критерій оптимальності (1) подамо у такому вигляді:

$$q = \frac{C_\delta t_\delta(\bar{U}) + d}{h(\bar{U})} + \frac{C_\delta}{h(\bar{U})} t_{cn}. \quad (9)$$

Співвідношення (8) для випадку, що розглядається буде таким:

$$\mu(q) = \mu(\varphi^{-1}(q)).$$

Із рівняння (9) знаходимо $\varphi^{-1}(q) = t_{cn} = \frac{q - a(\bar{U})}{b(\bar{U})}$, де

$$a(\bar{U}) = \frac{C_\delta t_\delta(\bar{U}) + d}{h(\bar{U})}, \quad b(\bar{U}) = \frac{C_\delta}{h(\bar{U})}.$$

З врахуванням останнього співвідношення функція належності (8) набуде такого вигляду:

$$\mu(q) = \exp \left\{ -\frac{\left(\frac{q - a(\bar{U})}{b(\bar{U})} - m \right)^2}{2\sigma^2} \right\} = \exp \left\{ -\frac{(q - a(\bar{U}) - mb(\bar{U}))^2}{2\sigma^2 b^2(\bar{U})} \right\}.$$

Введемо такі позначення: $m_q = a(\bar{U}) + mb(\bar{U})$, $\sigma_q = \sigma b(\bar{U})$. Тоді

$$\mu(q) = \exp \left\{ -\frac{(q - m_q)^2}{2\sigma_q^2} \right\}.$$

Задасмо певним значенням рівня функції належності $\mu(q) = \alpha$, якому відповідає деяке значення $q = q^*$ і, яке

$$\text{слід визначити із рівняння } \exp \left\{ -\frac{(q^* - m_q)^2}{2\sigma_q^2} \right\} = \alpha, \quad \alpha < 1.$$

$$\text{Звідси } q^* = m_q + \sigma_q \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha}}.$$

Якщо врахувати значення $m_q = \frac{C_\delta (t_\delta(\bar{U}) + m) + d}{h(\bar{U})}$ і

$\sigma_q = \frac{\sigma C_\delta}{h(\bar{U})}$, то отримаємо таку задачу чіткого нелінійного програмування

$$\min : q(\bar{U}) = \frac{C_\delta (t_\delta(\bar{U}) + m) + d}{h(\bar{U})} + \frac{\sigma C_\delta}{h(\bar{U})} \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

за умови, що виконуються обмеження (3)–(5) на альтернативи \bar{U} .

Функції $t_\delta(\bar{U})$ і $h(\bar{U})$ визначимо, скориставшись математичною процесу поглиблення глибоких свердловин [1]

$$\frac{dh(t)}{dt} = v_0(\bar{U}(t)) f(\varepsilon(t)), \quad (11)$$

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = K_\varepsilon(\bar{U}(t)), \quad (12)$$

$$\frac{dg(t)}{dt} = K_g(\bar{U}(t)), \quad (13)$$

з початковими умовами та граничними умовами

$$h(0) = g(0) = 0; \varepsilon(0) = 1; \varepsilon(t_\delta) = \varepsilon_k; i g(t_\delta) = g_k, \quad (14)$$

де $\bar{U}(t) = (F, N_\delta)^T$.

Оскільки $\bar{U}(t) = \text{const}$, а $f(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon}$, то рівняння (11) і

1(2) можна інтегрувати з початковими та граничними умовами (14). У результаті отримаємо

$$h(\bar{U}) = \frac{v_0(\bar{U})}{K_\varepsilon(\bar{U})} \ln(K_\varepsilon(\bar{U})t_\delta + 1). \quad (15)$$

Керування процесом буріння за критерієм (1) допускає, що закінчення чергового рейсу може бути зумовлено двома факторами – зносом озброєння долота чи зносом його опор.

Допустимо, що випереджаючим фактором є знос озброєння долота. Тоді час закінчення чергового рейсу (час буріння) визначимо із рівняння (12)

$$t_\delta(\bar{U}) = A_\varepsilon K_\varepsilon^{-1}(\bar{U}), \quad (16)$$

де $A_\varepsilon = \varepsilon_k - 1$.

В тому випадку, коли випереджаючим фактором є знос опори долота, то розв'язавши диференціальне рівняння (13) з граничними умовами (14), знаходимо

$$t_\delta(\bar{U}) = A_g K_g^{-1}(\bar{U}), \quad (17)$$

де A_g – постійна величина, що визначається граничними умовами [1].

Отже, критерій оптимальності (10) буде визначатись такими формулами:

– випереджаючий знос озброєння долота

$$\min_{\bar{U} \in A_U} q(\bar{U}) = \frac{C_\delta A_\varepsilon + K_\varepsilon(\bar{U})(C_\delta m + d)}{v_0(\bar{U}) \ln(A_\varepsilon + 1)} + \frac{\sigma K_\varepsilon(\bar{U}) C_\delta}{v_0(\bar{U}) \ln(A_\varepsilon + 1)} \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha^2}}; \quad (18)$$

– випереджаючий знос опор долота

$$\min_{\bar{U} \in A_U} q(\bar{U}) = \frac{C_\delta A_g K_g(\bar{U}) + K_\varepsilon(\bar{U})(C_\delta m + d)}{v_0(\bar{U}) \ln(A_g K_g(\bar{U}) / K_g(\bar{U}) + 1)} + \frac{\sigma K_\varepsilon(\bar{U}) C_\delta}{v_0(\bar{U}) \ln(A_g K_g(\bar{U}) / K_g(\bar{U}) + 1)} \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha^2}}. \quad (19)$$

Параметри, які входять у критерій оптимальності (18) або (19), визначаються за допомогою методів ідентифікації, що розроблені в [1].

У тому випадку, коли рівень функції належності α дорівнює одиниці, приходимо до чіткої задачі оптимізації процесу механічного буріння, яка розглянута в [10], за умови, що $t_\delta = m$.

Задачі (18), (19) є задачами нелінійного програмування з обмеженнями (3)–(5). Відомо [11], що такі задачі, як правило, розв'язуються числовими методами, які для своєї реалізації вимагають, щоб критерій оптимальності і обмеження мали похідні до другого порядку включно; критерій оптимальності повинен бути унімодалльною функцією, а обмеження – випуклими. Тільки у випадку виконання цих умов існують необхідні і достатні умови існування мінімуму скалярної функції на множині значень її аргументів, які задовольняють певним обмеженням. На рис. 1 показана типова область обмежень, яка задається умовами (3)–(5).

Аналіз рис. 1 показує, що область A_U не є випуклою і тому неможливо гарантувати збіжність розв'язку задачі до оптимальної точки. Крім того критерій оптимальності (18) або (19) може мати складну топологію, наприклад, у вигляді яру, що також затрудняє розв'язок задачі оптимізації за допомогою класичних методів.

Як альтернативу таким методам можна використати генетичні алгоритми, які відрізняються від класичних методів оптимізації такими базовими елементами [12]:

- змінні у задачі оптимізації (керувальні дії), які носять назву хромосом, задаються у кодованій формі, як правило, у двійковому коді (кожна одиниця або кожний нуль у такому двійковому коді носить назву – ген);
- пошук розв'язку здійснюється не з єдиної точки, а з деякої множини точок, яку називають популяцією;
- використовують тільки цільову функцію (критерій оптимальності), а не її похідні;
- застосовують імовірнісні, а не детерміновані правила переходу до наступної ітерації.

У генетичних алгоритмів виділяють етап селекції, на якому із поточної популяції вибирають і включають у батьківську популяцію особи, які мають найбільше (у задачах максимізації) або найменше (у задачах мінімізації) значення функції пристосованості (критерію оптимальності). На наступному етапі (етапі еволюції) застосовують операції схрещування і мутації.

Суть операції схрещування – обмін фрагментами ланцюжків між двома батьківськими хромосомами, які вибираються із батьківського пула випадковим чином з імо-

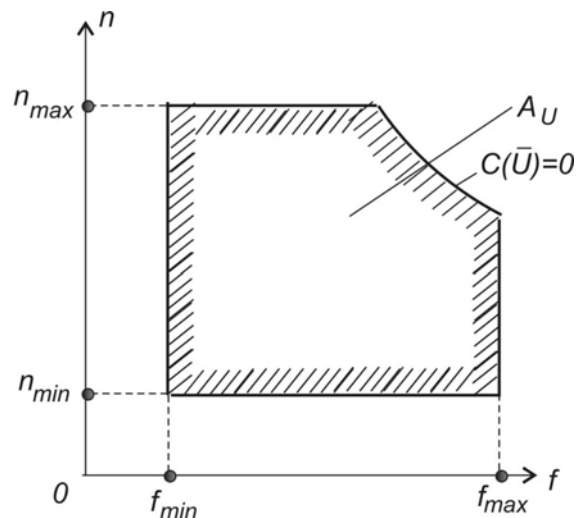


Рисунок 1 – Область обмежень

вірністю p_c . Після операції схрещування родичі у батьківській популяції замінюються на їх потомків.

Операція мутації змінює значення генів із заданою імовірністю p_m певним способом, який визначається конкретним алгоритмом, з одиниці на нуль або навпаки з нуля на одиницю. Значення не перевершує, як правило, 0,1, тому до мутації схильна лише невелика кількість генів.

Завершальним етапом у генетичному алгоритмі є його зупинка. В оптимізаційних задачах зупинка алгоритму може відбутися після досягнення функцією цілі найменшого (найбільшого) значення із заданою точністю. Зупинка алгоритму може також відбутися після того як після чергової ітерації не відбулося покращення цільової функції. Алгоритм може бути зупинений після виконання заданої кількості ітерацій або після закінчення певного часу. Якщо умова зупинки виконана, то вибираються найкращі хромосоми, яким відповідає мінімальне (максимальне) значення критерію оптимальності. У протилежному разі переходять до наступної ітерації – селекції.

Генетичний алгоритм був застосований до розв'язку оптимізаційної задачі (18) з врахуванням обмежень (3)–(5). Для ефективнішої роботи алгоритму змінні F і N_d були приведені до безрозмірного вигляду.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для умов буріння однієї із свердловин Прикарпаття були отримані такі емпіричні залежності [10] для величин v_0 , K_ε і K_g :

$$v_0 = k_1 f^{\alpha_1} n^{\beta_1}, \quad (20)$$

$$K_\varepsilon = k_2 f^{\alpha_2} n^{\beta_2}, \quad (21)$$

$$K_g = k_3 f^{\alpha_3} n^{\beta_3}, \quad (22)$$

де $k_1 = 3,25$ м/год; $k_2 = 0,35$ год⁻¹; $k_3 = 0,13$ год⁻¹; $\alpha_1 = 0,96$; $\alpha_2 = 1,27$; $\alpha_3 = 1,0$; $\beta_1 = 3,04$; $\beta_2 = 10,93$; $\beta_3 = 1,0$;

$$f = \frac{F}{F_{\max}}, \quad n = \frac{N_d}{N_{d,\max}}.$$

У безрозмірних координатах обмеження (3)–(5) будуть такими:

$$a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^{1,7} + a_4 H n f \leq 1, \quad (23)$$

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max}, \quad (24)$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, \quad (25)$$

де $a_1 = \frac{A_1 N_{d,\max}}{W_p}$, $a_2 = \frac{A_2 N_{d,\max}^2}{W_p}$, $a_3 = \frac{A_3 N_{d,\max}^{1,7}}{W_p}$,

$$a_4 = \frac{A_4 F_{\max} N_{d,\max}}{W_p}; \quad F_{\max} = 129,5 \text{ кН}, \quad N_{d,\max} = 1,205 \text{ с}^{-1}.$$

Для глибини свердловини $H = 4118$ м отримали – $a_1 = 1,1175$, $a_2 = -0,6259$, $a_3 = 0,0191$, $a_4' = 0,8179$, де $a_4' = a_4 H$. Значення інших величин, які входять у критерій оптимальності (18)– $C_{\bar{c}} = 1520$ грн/год, $d = 2610$ грн.

Для визначення параметрів функції належності $\mu(t_{cn})$ скористаємося даними, які при бурінні однієї із свердловин на Прикарпатті [7]. Рис. 2 відтворює графік залежності тривалості СПО від глибини свердловини H . Візуальний аналіз рис. 2 показує, що існує лінійний тренд тривалості СПО у функції від H , який можна описати лінійною залежністю $\hat{t}_{cn} = \alpha_0 + \alpha_1 H$.

З використанням методу найменших квадратів було визначено, що $\alpha_0 = -2,159$ і $\alpha_1 = 0,004$. За допомогою екстраполяції лінійного тренду на один крок було знайдено, що значення параметру функції належності $\mu(t_{cn})$ є таким: $m = 18,73$. Другий параметр σ функції належності $\mu(t_{cn})$ знайдений за такою формулою:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (t_{cn}^{(k)} - \hat{t}_{cn}^{(k)})^2, \quad (26)$$

Обчислення за останньою формулою дали такий результат: $\sigma = 2,44$. Рис. 3 дає наочне уявлення про вигляд функції належності $\mu(t_{cn})$.

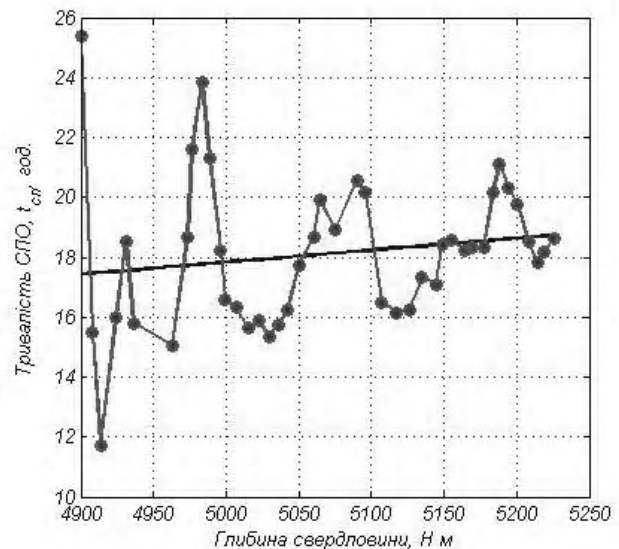


Рисунок 2 – Зміна тривалості спуско-піднімальних операцій у функції глибини свердловини

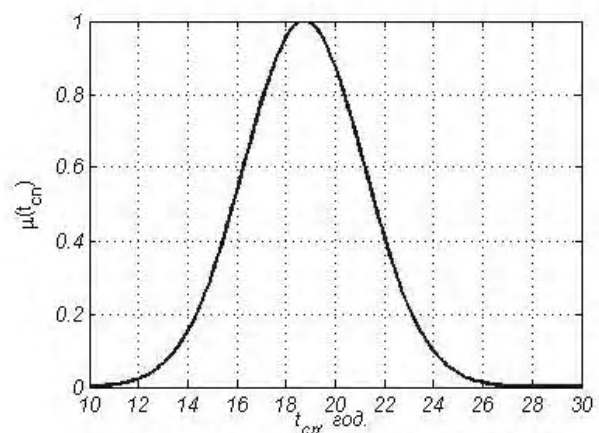


Рисунок 3 – Функція належності $\mu(t_{cn})$

На рис. 4 наведений графік залежності $q(f, n)$, який отриманий для наведених вище коефіцієнтів моделей (20)–(22) і значень C_0, m, σ, α і d .

Із графіка видно, що цільова функція має мінімум у вигляді дна яру, що є ще одним аргументом на користь генетичного алгоритму.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Застосування генетичного алгоритму до задачі оптимізації (18) з обмеженнями (3)–(5) дало такі результати: $q^* = 2421,8$ грн/м, $f^* = 0,877$, $n^* = 0,712$. Результат роботи алгоритму ілюструє рис. 5, на якому показана область A_U і лінії рівня функції $q(f, n)$.

У тому випадку, коли $\alpha = 1$, отримаємо чітку задачу оптимізації, розв'язування якої детально розглянуто у [1]. Для даних, які наведені вище, отримали такий розв'язок чіткої задачі: $q^* = 2378,1$ грн/м, $f^* = 0,864$, $n^* = 0,720$. Отже, зменшення «нечіткості» задачі зменшує значення критерію оптимальності, у нашому випадку на $\Delta q^* = 43,7$ грн/м.

«Нечіткість» значення t_{cn} визначає параметр функції належності σ , який визначений як середньоквадратичне відхилення за формулою (26). Можна запропонувати більш

«песимістичний» сценарій визначення параметру σ – як максимальне відхилення значення t_{cn} від лінії регресії

$$\sigma = \max_k : \left| t_{cn}^{(k)} - \hat{t}_{cn}^{(k)} \right| \tag{27}$$

Якщо значення параметру функції належності σ визначити за формулою (27), то отримаємо – $\sigma = 7,93$ год.

6 ОГОВОРЕННЯ

Розв'язування задачі нечіткої оптимізації при значенні параметру σ , яке визначено за формулою (22), і незмінних інших значеннях параметрів критерію оптимальності (18), дало такий результат: $q^* = 2508,9$ грн/м, $f^* = 0,903$, $n^* = 0,697$. Збільшення «нечіткості» задачі оптимізації привело до збільшення вартості метра проходки свердловини на $\Delta q^* = 130,8$ грн/м. у порівнянні з чіткою задачею оптимізації, яка розглядалась в [1].

Результати роботи можуть знайти застосування при бурінні глибоких свердловин з роторним приводом шарошкових доліт. Для турбінного буріння отримані результати можна поширити за умови уточнення математичної моделі (20)–(22) і врахування того факту, що осьове навантаження на долото і частота його обертання функціонально залежні.

ВИСНОВКИ

Установлено, що процес поглиблення свердловин є нестационарним, стохастичним і таким, що розвивається у часі. Показано, що привалить СПО, у силу технічних, технологічних і суб'єктивних факторів, може розглядатись як нечітка величина з певною функцією належності. Виходячи із цього, задача оптимізації процесу механічного буріння сформульована у термінах нечіткої математики.

За допомогою генетичного алгоритму успішно розв'язана задача нечіткої оптимізації процесу поглиблення свердловини для випадку, коли цільова функція має несприятливу топологію, а область обмежень не є випуклою.

На значення вартості метра проходки (критерію оптимальності) суттєвий вплив має «розмитість» величини тривалості t_{cn} спуско-піднімальних операцій. Збільшення невизначеності параметру t_{cn} тягне за собою збільшення вартості метра проходки, що є своєрідною платою за нечіткість величини спуско-піднімальних операцій.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (номер державної реєстрації 0111U005890).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбійчук М. І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин : монографія / М. І. Горбійчук, Г. Н. Семенцов. – Івано-Франківськ : Факел, 2006. – 493 с.
2. Dwigth Y. Computers in the drilling process / Y. Dwigth, Williams James // Petrol Megan. – 1987. – 9, № 6. – Р. 29–32.
3. Бражников В. А. Информационное обеспечение оптимального управления бурением скважин / В. А. Бражников, А. А. Фурнэ. – М. : Недра, 1989. – 208 с.
4. Halda E. E. Field verification of drilling models and computerized selection of drill, bit, WOB and drillstring rotation / E. E. Halda, S. Ohara // SPE Drilling Engineering. – 1991. – 6, № 3. – Р. 189–185. DOI: 10.2118/19130-PA

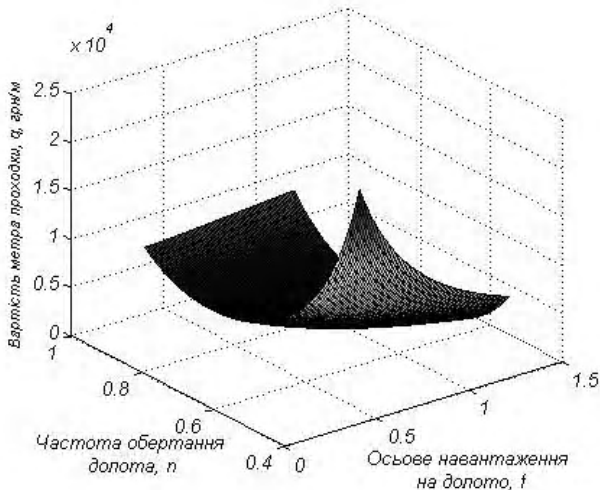


Рисунок 4 – Залежність вартості метра проходки від осьового навантаження на долото і частоти його обертання

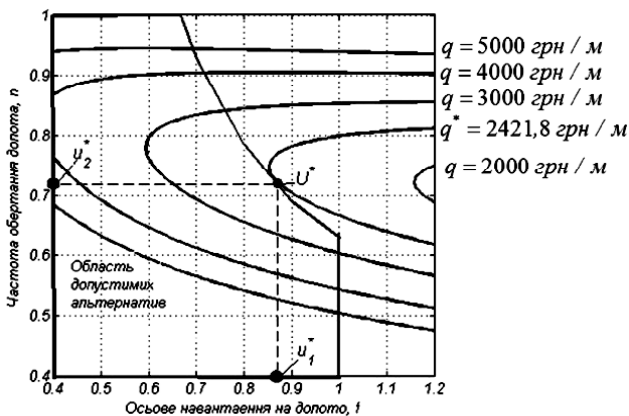


Рисунок 5 – Результат роботи генетичного алгоритму

5. «High Tech» upgrades provide new tools for the drilling // *Petroleum Engineer, International*. – 1996. – 69, № 9. – P. 7–10.
6. Galle E. M. Optimization des Parametres de Forage / E. M. Galle, H. B. Woods // *Revue de l'Institut Francias de Petrole*. – 1962. – № 2. – P. 195–212.
7. Горбійчук М. І. Прогнозування тривалості спуско-піднімальних операцій / М. І. Горбійчук, В. Б. Кропивницька // *Восточно-Европейский журнала передовых технологий*. – 2006. – № 2/2(20). – С. 37 – 40.
8. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации : монография / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 208 с.
9. Раскин Л. Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения : монография / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Харьков : Парус, 2008. – 352 с.
10. Горбійчук М. І. Оптимізація процесу поглиблення свердловин на засадах генетичних алгоритмів / М. І. Горбійчук, Гуменюк Т. В. // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2008. – № 5/3 (35). – С. 44–47.
11. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт ; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 509 с.
12. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский ; пер. с польск. – М. : Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2015.

Після доробки 06.04.2015.

Горбійчук М. І.¹, Гуменюк Т. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

²Асистент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

НЕЧЕТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УГЛУБЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН

При бурении глубоких скважин на нефть и газ важное значение имеет правильный выбор управляющих воздействий – осевой нагрузки на долото и частоты его вращения с целью получения минимального значения стоимости проходки. Решение поставленной задачи предполагает создание адекватной математической модели процесса углубления скважин и разработки методов идентификации ее параметров. Сложность задачи в том, что процесс механического бурения является стохастическим, нестационарным и развивающимся во времени. Это значительно затрудняет определение традиционными методами идентификации целого ряда параметров, влияющих на процесс разрушения породы. К таким параметрам можно отнести и продолжительность спуско-подъемных операций, на значения которых влияют не только технологические, технические, но и субъективные факторы. Для адекватного воспроизведения неопределенности значения продолжительности спуско-подъемных операций, их предложено рассматривать как нечеткие величины с определенной функцией принадлежности. Исходя из этой предпосылки, была сформулирована задача нечеткой оптимизации процесса углубления скважины и разработали метод ее решения. Эффективность разработанного метода подтверждена на конкретных промышленных данных.

Ключевые слова: бурение, критерий оптимальности, стоимость, проходка, управление, функция принадлежности, генетический алгоритм.

Horbiychuk M. I.¹, Gumenyuk T. V.²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Systems and Networks Department of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

²Assistant of Computer Systems and Networks Department of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

FUZZY OPTIMIZATION PROCESS OF DEEPENING DEEP WELLS

In the process of drilling deep wells for oil and gas it is important to make the correct choice of management influences – axial load on the bore bit and rotation frequency to obtain minimum cost of boring. Solving this problem involves the creation of an adequate mathematical model of the process of deepening wells and development of the methods for the identification of its parameters. The complexity of the problem is that the mechanical drilling process is stochastic, transient and is developing over time. This greatly complicates the determination of traditional methods of identification of a number of parameters that affect the process of the rock breaking. These parameters include the duration of descent-lifting operations, the values of which are affected not only by technological, technical, but also by subjective factors. For adequate reproduction of descent-lifting operations duration values uncertainty, they we proposed to consider them as fuzzy variables with certain membership functions. According to this premise, there was formulated the problem of fuzzy optimization of the deepening wells process and developed a method to solve it. The effectiveness of this method was confirmed on specific industrial data.

Keywords: drilling, optimality criterion, cost, boring, control, membership function, genetic algorithm.

REFERENCES

1. Horbiichuk M. I., Sementsov H. N. Optymizatsiia protsesu burinnia hlybokykh sverdlovyn: monohrafiia. Ivano-Frankivsk, Fakel, 2006, 493 p.
2. Dwigth Yoder, James Williams Computers in the drilling process, *Petrol Megan*, 1987, 9, No. 6, pp. 29–32.
3. Brazhnikov V. A., Furne' A. A. Informacionnoe obespechenie optimal'nogo upravleniya bureniem skvazhin. Moscow, Nedra, 1989, 208 p.
4. Halda E. E., Ohara S. Field verification of drilling models and computerized selection of drill, bit, WOB and drillstring rotation, *SPE Drilling Engineering*, 1991, 6, No. 3, pp. 189–185. DOI: 10.2118/19130-PA
5. «High Tech» upgrades provide new tools for the drilling, *Petroleum Engineer, International*, 1996, 69, No. 9, pp. 7–10.
6. Galle E. M., Woods H. B. Optimization des Parametres de Forage, *Revue de l'Institut Francias de Petrole*, 1962, No. 2, pp. 195–212.
7. Horbiichuk M. I., Kropyvnytska V. B. Prohnozuvannia tryvalosti spusko-pidnimalnykh operatsii, *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohyi*, 2006, No. 2/2(20), pp. 37–40.
8. Orlovskij S. A. Problemy prinyatiya reshenij pri nechetkoj ishodnoj informacii : monografiya. Moscow, Nauka, 1981, 208 p.
9. Raskin L. G., Seraya O. V. Nechetkaya matematika. Osnovy teorii. Prilozheniya: monografiya. Xar'kov, Parus, 2008, 352 p.
10. Horbiichuk M. I., Humeniuk T. V. Optymizatsiia protsesu pohlyblennia sverdlovyn na zasadakh henetychnykh alhorytmiv, *Vostochno-evroneyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohyi*, 2008, No. 5/3 (35), pp. 44–47.
11. Gill F., Myurrej U., Rajt M.; per. s angl. Prakticheskaya optimizaciya. Moscow, Mir, 1985, 509 p.
12. Rutkovskaya D., Pilin'skij M., Rutkovskij L.; per. s pol'sk. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2004, 452 p.