УДК 62-503.57:622.24

Г.Н. СЕМЕНЦОВ, О.В. ФАДЄЄВА

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

АНАЛІЗ І СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

Розглядаються особливості технологічного процесу буріння як об'єкта управління, аналізуються його математичні моделі і методи управління.

синтез АСУ, критерії оптимізації, математичні моделі, методи управління, технологічний процес буріння, нафтові і газові свердловини,

Технологія процесу буріння нафтових і газових свердловин є складним нестаціонарним процесом, що розвивається в часі в міру заглиблення бурового долота і функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності щодо його параметрів і структури під впливом зовнішніх завад. Синтез адаптивних систем автоматизованого управління технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин є актуальною науково-практичною задачею у зв'язку з інтенсивним впровадженням у нафтогазовій галузі комп'ютерно-інтегрованих технологій буріння не тільки вертикальних, але і похило спрямованих і горизонтальних свердловин, що дає змогу збільшити видобуток нафти і газу.

Проте аналіз літературних джерел, наприклад [1, 2, 3, 4 та ін.], показує недостатній обсяг проведених досліджень у напрямку створення ефективних автоматизованих систем управління технологічним процесом буріння свердловин.

Аналіз результатів буріння нафтових і газових свердловин свідчить про те, що режими буріння, встановлені на стадії розробки проекту будівництва свердловини, суттєво відрізняються від оптимальних, оскільки на стадії проектування неможливо врахувати всі зміни властивостей гірських порід, знос бурових доліт і інші фактори. Крім того, наразі відсутні методи і засоби оптимального управління, які дозволяють підвищити ефективність буріння. Тому створення систем автоматизованого оптимального управління процесом буріння нафтових і газових свердловин слід розглядати як важливу науково-технічну проблему, яка має велике наукове і народногосподарське значення. Оскільки ця проблема є актуальною і невідкладною, то її вирішення неможливе без теоретичного узагальнення, подальших досліджень і застосування сучасних методів і засобів оптимального управління, в тому числі методів фаззі-логіки і штучних нейронних мереж.

З урахуванням наведеного вище метою даної роботи є аналіз технологічного процесу буріння як об'єкта управління, математичне моделювання і аналіз методів управління процесом буріння.

Буріння нафтових, газових і газоконденсатних свердловин пов'язане з матеріальними, енергетичними, транспортними, трудовими та іншими витратами, тому в планах робіт, спрямованих на буріння, відображаються: проектна глибина свердловин; параметри, що визначають її конструкцію; терміни будівництва свердловини на окремих її етапах; кошторисна вартість метра проходки по характерним пачкам гірських порід та інші техніко-економічні показники. З урахуванням того, що процес буріння є неперервно-дискретним і таким, що неперервно повторюється, мета управління може бути визначена для одного рейсу долота, а саме – максимально можливий приріст глибини свердловини заданої конструкції, при найменших витратах суспільної праці та найвищій продуктивності.

Математичний еквівалент цієї мети, тобто критерій оптимізації технологічного процесу поглиблення свердловини, являє собою функціонал, який залежить від проходки на долото $h_i(t)$, рейсової швидкості буріння $V_{pi}(t_б)$ і собівартості одного метра проходки свердловини $B_{ci}(t)$:

$$Q_ц = Q_ц\left[h_i(t_б), V_{pi}(t_б), B_{ci}(t_б)\right], \qquad (1)$$

де $t_б$ - час буріння одним долотом;

h_i - проходка на долото в і-му рейсі.

У проектних розрахунках оптимальних режимів буріння використовують [1] один із показників в певній послідовності залежно від глибини свердловини:

$$\begin{aligned} &V_p(x) \underset{x\in S}{\rightarrow} \max; \\ &B_c(x) \underset{x\in S}{\rightarrow} \min; \\ &h_i(x) \underset{x\in S}{\rightarrow} \max, \end{aligned} \qquad (2)$$

де $S = \begin{bmatrix} (F_i, n_i)\, i = 1,...N; F_{\min} \le F_i \le F_{\max}; \\ n_{\min} \le n_i \le n_{\max}; \sum^{N} h_i = H; h_i > 0 \end{bmatrix}$,

F_i, n_i - осьове навантаження на долото і швидкість його обертання в і-му рейсі.

Проте головним фактором переходу від одного критерію до іншого є досягнення мінімальної собівартості одного метра проходки, тобто критерій $B_c(x) \underset{x\in S}{\rightarrow} \min$ є найбільш загальним і компромісним.

Поточна собівартість метра проходки B_c за час рейсу долота змінюється в межах $B_{\min} \le B_c \le \infty$.

Отже, оцінка ефективності заданих режимів буріння у будь-який час може бути здійснена лише на основі оцінки собівартості одного метра проходки, яка відповідає кінцю відпрацювання долота. Передумовою для такого прогнозування є наявність математичного опису процесу буріння.

Запропоновано розглядати процес буріння свердловини як багатовимірний керований об'єкт. Під впливом вектора $U(t) = U[F(t), n(t), Q(t)]$ вхідних керуючих впливів стан керованого об'єкта змінюється і характеризується вектором $X(t) = X[h(t), \mu(t), g(t)]$ вихідних змінних – показників процесу буріння, де

$F(t)$ - осьове навантаження на бурове долото;

$n(t)$ - швидкість обертання долота;

$Q(t)$ - витрата промивної рідини;

$h(t)$ - проходка на долото;

$\mu(t)$ - знос оснащення долота;

$g(t)$ - знос опор долота.

Взаємозв'язки вхідних і вихідних змінних керованого об'єкта, що відповідають усталеному режиму роботи бурової установки і обмеженому відрізку часу Δt, можуть бути подані у вигляді

$$X(t) = \varphi[U(t), Z(t)], \qquad (3)$$

де $Z(t)$ - вектор зовнішніх неконтрольованих збурень.

Поточні значення складових вектора $Z(t)$, а саме: сила статичного опору тертя колони бурильних труб об стінки свердловини, пластові тиски, фізико-механічні властивості гірських порід руйнівного вибою свердловини та ін., у загальному вигляді не є сталими. Вони змінюються з глибиною свердловини і, отже, у часі.

Нестаціонарність процесу буріння свердловини обумовлена також нестабільністю технічного стану долота. В міру зносу його оснащення і опор показники процесу буріння змінюються. З урахуванням цього факту математична модель процесу буріння свердловини, яка відповідає j-му ізотропному шару породи, повинна мати добуток двох функцій: перша відповідає початковому технічному стану долота, а друга – характеризує зміну показників процесу в часі, які залежать від поточного фізичного стану бурового долота.

Виходячи із сучасного стану [1, 2, 3] в галузі моделювання процесу буріння встановлено, що недостатня вивченість взаємозв'язків зносу доліт з показниками процесу і відсутність перевірки функції зносу призвели до того, що математичні моделі процесу буріння свердловини мають вузьку область застосування і є непридатними для оперативного управління внаслідок наявності в них неконтрольованого параметра – зносу долота.

До недоліків цих моделей слід віднести також емпіризм, малопараметричність моделей, невідповідність розмірностей, а також недостатню точність.

Встановлено також [1], що для цілей керування зручно і доцільно математичну модель процесу буріння шукати у диференціальній формі

$$\begin{aligned}\frac{dh}{dt} &= \frac{1}{\varepsilon^*}V_0(x_1,x_2,...,x_n),\\ \frac{d\varepsilon^*}{dt} &= C(x_1,x_2,...,x_n).\end{aligned} \qquad (4)$$

Тут $x_1,x_2,...,x_n$ - технологічні та гірничо-геологічні параметри, від яких залежить початкова швидкість проходки V_0; C – швидкість зношення оснащення долота, що, як і V_0, невідома і залежить від $x_1,x_2,...,x$;

ε^* - відносний знос оснащення долота.

Структура функцій V_0 і C визначені з використанням методу аналізу розмірностей.

Для V_0 отримано такий вираз:

$$V_0 = C_1\frac{Fn^2d^2}{N}, \qquad (5)$$

де C_1 - невідома змінна, яка має визначатися в процесі ідентифікації; d - діаметр долота; $N = F^\gamma n^\delta$ - потужність обертання долота, яка витрачається на руйнування породи на вибої свердловини; γ, δ- показники степеня при F і n.

З урахуванням (5) отримано вираз для першого рівняння системи (4)

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{1}{\varepsilon^*(\tau)}K_1F^{\alpha^1}n^{\beta_1}, \qquad (6)$$

де $K_1 = C_1d^2$; $\alpha_1 = 1-\gamma$; $\beta_1 = 2-\delta$;

$\tau = nt$ – безрозмірний час.

Для другого рівняння системи (4) отримано вираз

$$\frac{d\xi^*}{d\tau} = f_3(\pi_3), \qquad \pi_3 = \frac{Fnd}{N}. \qquad (7)$$

Функція (7) параметризована на основі рядів з невідомими показниками степенів:

$$f_3(\pi_3) \approx \sum_{i=1}^{n}\alpha_i(\pi_3)^{\beta_i}, \qquad (8)$$

де α_i , β_i – невідомі коефіцієнти, які підлягають ідентифікації.

Найбільш простий результат отримано при одночленній апроксимуючій формулі, тобто при n=1. У цьому випадку з (7), (8) отримаємо:

$$\frac{d\xi^*}{d\tau} = \alpha_1{}^*\left(\frac{FNd}{N}\right)^{\beta_1^*}, \qquad (9)$$

де α_i , β_i – коефіцієнти моделі.

Після підстановки у (9) виразу для потужності обертання долота N отримаємо

$$\frac{d\xi^*}{d\tau} = \alpha_1{}^*d^{\beta_1^*}F^{(\beta_1{}^*-\gamma_1\beta_1^*)}n^{(\beta_1^*-\delta\beta_1^*)}$$

або

$$\frac{d\xi^*}{d\tau} = K_2F^{\alpha^2}n^{\beta_2^*}, \qquad (10)$$

де $K_2 = \alpha_1 d^{\beta_1^*}$; $\alpha_2 = (\beta_1^* - \gamma_1\beta_1^*)$;

$\beta_2 = (\beta_1^* - \delta\beta_1^*)$.

Об’єднавши (6) і (10), отримаємо клас моделей процесу, записаний у вигляді такої системи рівнянь

$$\begin{aligned}\frac{dh}{d\tau} &= \frac{1}{\varepsilon^*(\tau)}K_1F^{\alpha_1}n^{\beta_1}, \qquad (11)\\ \frac{d\varepsilon^*}{d\tau} &= K_2F^{\alpha_2}n^{\beta_2}.\end{aligned}$$

Аналіз довів, що праві частини математичної моделі (11) є випадковими і коефіцієнти її підлягають ідентифікації в процесі роботи долота. Ідентифікація має здійснюватися при переході долота в породи з іншими властивостями і цей момент необхідно визначати за допомогою математичної моделі. Для цієї мети можуть бути використані показники зносу долота, які характеризують зміни властивостей середовища.

Досліджено способи оцінки зносу оснащення доліт на базі інформації про механічну швидкість буріння. Запропоновано оцінювати знос оснащення оцінкою відносного зносу долота $\varepsilon = v_0 v_t^{-1}$. Цей показник безрозмірний і піддається безпосередньому вимірюванню.

Детально вивчено процес зношення зубців шарошкових доліт і встановлений взаємозв’язок показника ε з фізичним зносом μ:

$$\varepsilon = (\mu m + 1)^2, \qquad (12)$$

де m – коефіцієнт, який визначається геометрією зубців і формою їх зносу.

Зміні μ в межах $\mu \in [0;1]$ відповідає зміна ε в діапазоні $\varepsilon \in [1;(1+m)^2]$.

Встановлено також, що взаємозв'язок (12) інваріантний відносно до властивостей гірських порід і типорозмірів доліт. Це дозволяє оцінювати знос оснащення доліт, користуючись показником ε.

На цій основі розроблено математичну модель технологічного процесу буріння, в якій усі параметри піддаються вимірюванню в реальному часі :

$$\frac{dh}{dt} = V_0(\bar{U}, \bar{A}_1)\varepsilon^{-1},$$
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = K_\varepsilon(\overline{U}, \overline{A_2}), \qquad (13)$$
$$\frac{dg}{dt} = K_g(\bar{U}, \bar{A}_3),$$

де $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$ – вектори властивостей системи "долото - гірська порода".

Математична модель (13) описує роботу долота на вибої свердловини у тривимірному просторі станів: h, ε,g.

Сформульовані граничні умови. Проходка $h(0)$, оцінка відносного зносу оснащення долота $\varepsilon(0)$ і знос опір долота $g(0)$ на початку рейсу мають такі значення:

$$h(0)=0, \varepsilon(0)=1, g(0)=0 \text{ при } t=0, \qquad (14)$$

а в кінці рейсу долота:

$$h(t_б) \ge 0,\ 1 \le \varepsilon(t_б) \le (1+m)^2,$$
$$0 \le g(t_б) \le 1 \text{ при } t = t_б. \qquad (15)$$

Технологічні обмеження :

$$F_{\min} \le F \le F_{\max},\ n_{\min} \le n \le n_{\max},\ Q = const,$$
$$V_{сп} \le (V_{сп})_{\max},\ M_g \le (M_g)_{\max}, \qquad (16)$$

де $V_{сп}$- швидкість спуско-піднімальних операцій, M_g – момент на долоті, Q- витрата бурового розчину.

При цьому слід враховувати, що у (13) K_ε, K_g, V_0 залежать від вектора $\bar{U}$ параметрів режиму буріння $\bar{U} = (F, n, Q)$ і від векторів $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$ властивостей системи "долото- гірська порода".

Конкретний вигляд правих частин рівнянь (13) визначається для кожного родовища. Так для родовищ Прикарпаття при постійній витраті бурового розчину $Q = const$ рівняння мають такий вигляд:

$$V_0(\bar{U}, \bar{A}_1) = K_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1},$$
$$K_\varepsilon(\bar{U}, \bar{A}_2) = K_2 F^{\alpha_2} n^{\beta_2}, \qquad (17)$$
$$K_g(\bar{U}, \bar{A}_3) = K_3 F^{\alpha_3} n^{\beta_3}.$$

Параметри моделі $\bar{A}_1 = (K_1, \alpha_1, \beta_1)$, $\bar{A}_2 = (K_2, \alpha_2, \beta_2)$, $\bar{A}_3 = (K_3, \alpha_3, \beta_3)$ підлягають ідентифікації в конкретних умовах буріння.

Розроблено методи ідентифікації параметрів математичної моделі. Запропоновано здійснювати повну ідентифікацію для кожної однорідної пачки порід і будувати функцію нев'язки на базі спостережень за поточним значенням проходки.

На основі аналізу властивостей процесу сформульовано і вирішено задачу багатостадійної оптимізації керування процесом буріння свердловин до проектної глибини, що дозволяє оптимізувати його у кожному рейсі долота і досягнути мінімально можливих сумарних витрат на проходку свердловини: для дискретного керування об'єкта $x_{(k+1)} = x_k + h_{(k)}$ (причому $x_{(0)} = 0$; $x_{(N)} = H$, де N – загальна кількість довбань) знайти таке керування $h_{(k)}\ (k = 0,1,2,...,N-1)$, щоб для відповідної траєкторії $x_k\ (k = 0,1,2,...,N)$ з початковою умовою $x_{(0)} = 0$ виконувалося співвідношення $x_{(N)} = H$ і загальна вартість свердловини набувала при цьому мінімального значення.

За допомогою $h_{(k)}$ позначена величина проходки для k-го інтервалу, відносно гирла свердловини. Отже, значення першого інтервалу позначено $h_{(0)}$, другого - $h_{(i)}$ і т.д. Поточне значення глибини свердловини після закінчення першого і решта наступних довбань позначено через x_k.

У кожному рейсі величина проходки $h_{(k)}$ обмежена можливостями стійкості опори і оснащення долота, у зв'язку з чим на $h_{(k)}$

накладаються обмеження: $0 < h_{(k)} \le h_{(k)\max}$.

Поставлена задача розв'язана з використанням методу динамічного програмування для випадку, коли керуючі параметри протягом кожного рейсу незмінні, тобто $F = const$ і $n = const$.

Встановлено, що розв'язування задачі оптимального керування процесом буріння свердловини можна поділити на два етапи: вибір оптимальних параметрів процесу буріння, що забезпечують оптимальне значення локального критерію оптимальності; визначення такого розподілу між проходками в кожному рейсі, при якому витрати на буріння свердловини досягнули б мінімальної величини.

Запропоновано таку стратегію багатостадійного оптимального керування процесом буріння:

1. На кожній k-ій стадії процесу розв'язати локальну задачу оптимізації й визначити F_k^*, n_k^*, $h_{k\max}$ а потім, використовуючи залежність (7), обчислити $V_{0,N-k}, k_{\varepsilon,N-k}$; $k = \overline{0, N-1}$.

2. Починаючи з останньої стадії керування, послідовно від стадії до стадії визначити h_{N-k}^* шляхом мінімізації функції мети

$$B_c(h_{N-k}) = C_{б,N-k}\left[\begin{array}{l}\dfrac{1}{k_{\varepsilon,N-k}}\left(e^{a_{N-k}h_{N-k}}-1\right)+A_{N-k}\left(x_{N-k+1}^*-h_{N-k}\right)^2+ \\ +B_{N-k}\left(x_{N-k+1}^*-h_{N-k}\right)+0.2\end{array}\right],$$

$k = 1, N$.

Тут $C_{б,N-k}$ - вартість одного часу експлуатації бурової установки;

$$a_{N-k} = k_{\varepsilon,N-k} / V_{0,N-k};\ A_{N-k} = \frac{B_c}{72 \cdot 10^4 N};$$

$$B_{N-k} = \left(0,6q_{N-k} + 5,5\sqrt[4]{q_{N-k}} + 2,8\right)\cdot 10^{-4}$$ -

постійні величини, що залежать від маси q_{N-k} погонного метра бурильної колони і потужності N приводу бурової лебідки.

Якщо при цьому станеться, що $h_{N-k}^* < h_{k\max}$, то $h_k^{**} = h_{N-k}^*$, у протилежному випадку $h_k^{**} = h_{k\max}$.

Визначення оптимальних керуючих впливів на кожній стадії пропонується здійснювати шляхом розв'язання задач оптимізації для процесу буріння з одним, двома і трьома керуючими впливами.

Перший метод: технологічний процес буріння має один керуючий вплив $F = \text{var}$. Розроблений метод орієнтований на всі способи буріння і оснований на одновимірному пошуку екстремуму функції мети із сумісними пробними і робочими кроками безпосередньо в процесі буріння.

Вибір оптимального навантаження на долото F^* здійснюється шляхом розв'язання трьох взаємозв'язаних задач: формування функції нев'язки для цілей оптимізації й ідентифікації параметрів математичної моделі, прогнозування функції цілі – вартості одного метра проходки свердловини, пошуку екстремуму функції мети.

Алгоритми реалізації функцій системи об'єднуються загальним організуючим алгоритмом функціонування, що забезпечує розв'язання задачі у реальному часі.

Параметри моделі $V_0^{(i)} i K_\varepsilon^{(i)}$ визначаються за допомогою алгоритму ідентифікації на кожному кроці пошуку і використовуються потім в алгоритмі прогнозування функції цілі.

Алгоритм прогнозування функції мети для і-го кроку пошуку складається з таких етапів:

1. Визначення прогнозованого значення тривалості буріння

$$t_\delta^{(i)} = \left(\varepsilon^{(i)} - 1\right) / k_\varepsilon^{(i)} \tag{18}$$

і функції мети

$$B_c^{(i)} = \frac{C_\delta\left[\left(\varepsilon^{(i)} - 1\right) + k_\varepsilon^{(i)}\tau^*\right]}{V_0^{(i)} \ln \varepsilon^{(i)}}, \tag{19}$$

де $\tau^* = t_{cn} + d / C_\delta$ - приведений час, що не зв'язаний з проходкою на долото; t_{cn} - час, що витрачається на спуско-піднімальні операції; d - вартість долота; C_δ - вартість години роботи бурової установки.

2. Мінімізація виразу (19) за змінною $\varepsilon^{(i)}$ дає змогу отримати рівняння

$$1 + \varepsilon^{(i)}(\ln \varepsilon^{(i)} - 1) - k_\varepsilon^{(i)}\tau^* = 0 \tag{20}$$

Розв'язавши рівняння (20) за допомогою одного з числових методів і визначивши $\varepsilon^{(i)}$, знаходимо $B_c^{(i)}$ на кожному кроці пошуку.

Алгоритм пошуку екстремуму функції мети складається з двох етапів. Перший етап – використання прямого пошуку із сумісними пробними і робочими кроками; другий - визначення оптимального осьового навантаження на долото F^* і очікуваного часу буріння t_δ^*.

Алгоритм пошуку мінімуму функції мети такий:

1. Вибираємо початкове значення осьового навантаження на долото F_1.

2. Здійснюємо пошук ΔB_c із сумісними пробними і робочими кроками (перший етап).

Для розв'язання задачі пошуку F^* використовують активний експеримент на буровій, в ході якого послідовно встановлюються три значення осьового навантаження на долото F_1, F_2, F_3, де F_3 - максимально допустиме осьове навантаження на долото; $F_2 = F_1 + (F_3 - F_1)/2$. При кожному значенні осьового навантаження на долото проходка складає не менше одного метра.

Кінцем пошуку на першому етапі є виконання умови $\Delta B_c < 0$. Якщо $F \geq F_{\max}$, а умова $\Delta B_c < 0$ не досягнута, то $F^* = F_{\max}$ і пошук припиняється.

3. Навколо точки мінімуму функція мети апроксимується квадратичною параболою на заданій системі трьох точок. Екстремальна точка цієї параболи визначає оптимальний керуючий вплив F^* і, отже, $B_c^* = B_c(F^*)$. У випадку проходження долотом меж пластів порід пошук мінімуму функції мети повторюється.

Для розв'язання даних задач складені програми оптимального керування процесом буріння свердловин.

Отже, проведений аналіз показує, що основними задачами подальшого удосконалення автоматизованих систем управління технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин є такі:

– обґрунтування і вибір такого критерію оптимізації, який був би функціоналом поточного стану об'єкта, а не кінцевого;

– розробка методу ідентифікації параметрів математичної моделі процесу буріння, який дозволяє здійснювати процедуру ідентифікації в автоматичному режимі;

– встановлення зв'язку між параметрами режиму буріння F і n і уточнення математичних моделей, в яких вважається, що такий зв'язок відсутній.

Література

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

2. Стетюха Е.Н., Голев А.А. Моделирование и оптимизация процесса отработки долота// Нефтяная промышленость, ЭИ. Сер: автоматизация и телемеханизация в нефтяной промышленности. – 1984. – Вып.2. – С. 14 - 19.

3. Петров И.П. Исследование режимов бурения и разработка методов и средств их оптимизации: Автореф. … д-ра техн. наук: 05.13.07.– Свердловск, Горный інститут. – 1975.- 48 с.

4. Данилюк М.О., Фадєєва І.Г. Будівництво свердловин на нафту і газ як складний об'єкт управління //Вимірювальна і обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. - №3. – С.163-165.

5. Фадєєва І.Г. Алгоритмізація задачі управління будівництвом свердловин // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер.: Технічна, кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу.-1999.- Вип. 36(6) – С. 47 - 53.

6. Семенцов Г.Н., Фадєєва О.В. Метод ідентифікації параметрів математичної моделі за умов апріорної та поточної невизначеності процесу буріння // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2005. - №3 (12). – С. 165 – 169.

Надійшла до редакції 05.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків.