

УДК 622.24:681.3

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ

© Горбійчук М. І., 2002

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Показано, що для реалізації функцій адаптивної системи керування, необхідна інформація розділена на три групи – постійну, оперативну і змінну. Це дасть можливість оптимізувати об'єм інформації та визначити необхідний крок дискретності для параметрів режиму буріння, які віднесені до змінної інформації.

Інформацію, яка необхідна для реалізації функцій адаптивної системи буріння, можна розділити на три групи - постійна, оперативна і змінна.

Постійна інформація залишається незмінною на протязі всього часу спорудження свердловини.

До цієї інформації можна віднести [1]: назву покладу, номер бурової, свердловини, глибину свердловини за проектом, відомості про бурове обладнання, яке використовується для проводки свердловини (бурова установка, ротор, бурові насоси і тому подібне), тип системи отримання інформації та керування процесом буріння.

Оперативна інформація залишається постійною тільки для одного рейсу буріння. Це глибина свердловини на початок рейсу, тривалість спуско-підймальних операцій, тип долота та його вартість, вартість години роботи бурової установки, відомості про роботу доліт в однотипних умовах буріння.

Змінна інформація відтворює стан процесу буріння в кожний момент часу. До цієї інформації можна віднести: осьове навантаження на долото, його швидкість обертання, обертовий момент на долоті, проходку на долото, оцінки стану озброєння і опори долота, витрата промивної рідини на вході і виході свердловини та її реологічні властивості промивної рідини.

Інформаційне забезпечення алгоритмів адаптивного керування процесом буріння свердловин характеризує табл. 1. В цій таблиці необхідна інформація для реалізації відповідних алгоритмів розбита на відповідні типи - постійну, оперативну чи змінну.

Однією із центральних задач, яку необхідно розв'язати при реалізації системи адаптивного керування процесом буріння, є визначення такту вимірювання технологічних параметрів (часу дискретизації T).

За можливостями відновлення інформації за результатами вимірювань способи дискретизації можна розділити на зворотні і незворотні.

Зворотні способи дають можливість відтворити сигнал за результатами дискретизації із заданою

точністю.

Незворотні способи використовують для визначення статистичних характеристик сигналів. При цьому відновити початковий сигнал за сукупністю його початкових значень неможливо. Оскільки вона замінюється одною характеристикою (математичним сподіванням, дисперсією, кореляційною функцією та інше), то досягається висока степінь стискування інформації.

У зворотних способах дискретизації для визначення кроку дискретності T використовують такі критерії:

а) для сигналу з обмеженим спектром у відповідності з теоремою Котельникова $T = 1/(2f_c)$, де f_c -частота зрізу спектра сигналу. Для осьового навантаження T залежить від способу подачі бурильного інструменту [2]. При автоматичній подачі $T \approx 1$ с, а при ручній подачі, в залежності від кваліфікації бурильника, T знаходиться в межах від 5 до 12,5 с;

б) за значенням автокореляційної функції. Якщо автокореляційну функцію вимірюваного сигналу апроксимувати виразом $R(\tau) = e^{-a\tau}$, то $T = \frac{1}{2a} \cdot \frac{\sigma_\delta}{\sigma}$, де

σ^2 -дисперсія випадкового процесу, σ_δ - допустима похибка вимірювань. За цим критерієм [1] час дискретизації осьового навантаження на долото складає до 3,5 с (глибина до 2250 м); обертового моменту - 40 с; витрати промивної рідини-360 с; тиску промивної рідини - 360 с; густини промивної рідини-240 с;

в) за кількістю похідних, який має сигнал в точках вимірювання. Для відтворення сигналу необхідно виконати $n+1$ -вимірювання, так як ці значення однозначно визначають $n+1$ коефіцієнт степеневого поліному n -го порядку. В загальному випадку, коли вимірювальна величина має $n+1$ -похідну, крок дискретизації обчислюється за формулою

$$T = \sqrt[n+1]{\frac{C\varepsilon_\delta}{|x_{\max}^{(n+1)}(t)|}}$$

Таблиця 1 – Інформаційне забезпечення адаптивної системи керування процесом буріння свердловин.

№ п.п.	Назва алгоритму	Інформаційне забезпечення алгоритму	Додаткові умови	Тип інформації
1	Ідентифікація стабільних параметрів математичної моделі	Проходка на долото h ; осьове навантаження на долото F ; швидкість обертання долота N_δ	F і N_δ змінюються за певним планом	Змінна інформація
2	Ідентифікація адаптивної математичної моделі	Проходка на долото h ; осьове навантаження на долото F ; швидкість обертання долота N_δ	$F=const$ $N_\delta=const$	Змінна інформація
3	Виявлення зміни умов буріння	Проходка на долото h ; осьове навантаження на долото F ; швидкість обертання долота N_δ	$F=const$ $N_\delta=const$	Змінна інформація
4	Вибір критерію оптимальності керування процесом буріння	Вартість години роботи бурової установки c_δ ; вартість долота d ; середні швидкості спуску і підйому бурового інструменту V_c і V_n ; час підйому бурового інструменту t_{cn} ; біжуча глибина на час спуску бурильного інструменту H ; проходка на долото за рейс $h(t_\delta)$; час буріння t_δ	—	Оперативна інформація
5	Вибір типу породоруйнуючого інструменту	Інтервал буріння H ; тип та вартість години роботи бурової установки c_δ ; сумарний час на СПО t_{cn} ; потенційний ресурс долота h_δ	Потенційний ресурс долота h_δ обчислюється за допомогою окремого алгоритму	Оперативна інформація
6	Адаптивне керування процесом буріння	Вартість години роботи бурової установки c_δ ; вартість долота d ; час підйому бурового інструменту t_{cn}	—	Оперативна інформація
		Проходка на долото h ; осьове навантаження на долото F ; швидкість обертання долота N_δ	—	Змінна інформація
7	Відпрацювання доліт за озброєнням	Проходка на долото h ; осьове навантаження на долото F ; швидкість обертання долота N_δ	$F=const$ $N_\delta=const$	Змінна інформація
8	Відпрацювання доліт за опорою	Обертний момент на долоті M_δ ; осьове навантаження на долото F ; швидкість обертання долота N_δ	$F=const$ $N_\delta=const$	Змінна інформація

де C - постійна величина, яка залежить від способу відновлення (екстраполяція чи інтерполяція); ε_δ - похибка відновлення.

Дослідження, проведені автором роботи [1], показали, що обчислення кроку дискретності T за кожним із трьох критеріїв дає приблизно однаковий результат. Незворотні способи дискретизації дають можливість визначити величину T за екстремальними значеннями характеристик вимірювального процесу.

Такою екстремальною характеристикою в [1] виступає кількість інформації і час дискретизації T визначають, виходячи із максимуму кількості інформації, яку несе в собі вимірювана величина.

Аналіз адаптивного алгоритму керування показує, що його успішна реалізація визначається точністю вимірювання проходки $h(t)$ і швидкістю проходки $v(t)=dh(t)/dt$.

Миттєве значення $v(t)$ є швидкоплинною величиною з великим значенням дисперсії [3], що не дає можливості використати її для оцінки ефективності

процесу буріння. З цією метою використовують середнє значення швидкості проходки

$$\hat{v}(t) = \Delta h(t)/T. \tag{1}$$

Формула (1) реалізує алгоритм числового диференціювання, який є нестійким до початкових збурень [4], що вносить значну похибку в процес вимірювання $v(t)$. Ця похибка може бути зменшеною, якщо функцію $h(t)$ попередньо згладити, наприклад, за допомогою інтерполяційного полінома

$$h(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_mt^m. \tag{2}$$

Тоді, визначивши коефіцієнти a_0, a_1, \dots, a_m , можна обчислити швидкість проходки $v(t)$.

При бурінні роторним способом свердловини № 804 Надвірнянського УБР залежність $h(t)$ апроксимувалась поліномами першої, другої, третьої і четвертої степені на заданому інтервалі часу $[t_i, t_{i+1}]$. Для кожного поліному обчислювалась похибка апроксимації

$$S_a = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\tilde{h}(t_j) - h(t_j))^2 \right)^{1/2},$$

де N -кількість вузлів апроксимації, $\tilde{h}(t_j)$ - експериментальні значення проходки в точках t_j , $h(t_j)$ - значення проходки у відповідності з (2).

Критерієм підбору коефіцієнтів полінома (2) був мінімум похибки S_a . Виходячи з цього був вибраний поліном першого порядку

$$h(t) = a_0 + a_1 t. \quad (3)$$

Тоді на заданому інтервалі часу $[t_n; t_{n+1}]$ $\hat{v}(t) = a_1$.

Коефіцієнт a_1 полінома (3) визначимо методом найменших квадратів, мінімізуючи функцію

$$J(a_0, a_1) = \sum_{j=0}^{N-1} [\tilde{h}(t_j) - (a_0 + a_1 t_j)]^2. \quad (4)$$

Оскільки мінімум функції (4) досягається за умови $\partial J(a_0, a_1) / \partial a_0 = 0$ і $\partial J(a_0, a_1) / \partial a_1 = 0$, то

$$a_1 = \frac{N \sum_{j=0}^{N-1} \tilde{h}(t_j) \cdot t_j - \sum_{j=0}^{N-1} \tilde{h}(t_j) \cdot \sum_{j=0}^{N-1} t_j}{N \sum_{j=0}^{N-1} t_j^2 - \left(\sum_{j=0}^{N-1} t_j \right)^2}. \quad (5)$$

При обчисленні a_1 за формулою (5) інформацію про проходку необхідно квантувати як за часом, так і за рівнем.

Квантування за часом, коли $T = const$, дає

$$a_1 = A_N \sum_{j=0}^{N-1} \left(j - \frac{N-1}{2} \right) \tilde{h}(jT),$$

де $A_N = \frac{12}{TN(N^2 - 1)}$.

Отже

$$v(nT) = A_N \sum_{i=0}^{N-1} \left(i - \frac{N-1}{2} \right) \tilde{h}((n+i)T), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

При обчисленні швидкості проходки за формулою (6) виникає похибка, яку визначимо як

$$D_0 = M \left[(\hat{v}(nT) - v_\delta(nT))^2 \right], \quad (7)$$

де $v_\delta(nT)$ - дійсне значення швидкості проходки.

Нехай $\tilde{h}(t) = h(t) + e(t)$, де $e(t)$ -адитивна перешкода з нульовим математичним сподіванням і автокореляційною функцією $R_e(\tau)$. Тоді $v_\delta(t) = \dot{h}(t) + \dot{e}(t)$. Якщо - [5] $R_e(\tau) = M[e(t)e(t+\tau)]$, то $\dot{R}_e(\tau) = M[e(t)\dot{e}(t+\tau)]$ і $\ddot{R}_e(\tau) = M[\dot{e}(t)\dot{e}(t+\tau)]$.

Отже

$$D_0 = M \left[A_N \sum_{j=0}^{N-1} \left(j - \frac{N-1}{2} \right) h((n+j)T) + \sum_{j=0}^{N-1} \left(j - \frac{N-1}{2} \right) e((n+j)T) - v(nT) - \dot{e}(nT) \right]^2. \quad (8)$$

Розкриваючи дужки під знаком математичного сподівання і переходячи до суми математичних сподівань, отримуємо, що

$$D_0 = A_N^2 \sum_{j=0}^{N-1} \left(j - \frac{N-1}{2} \right)^2 h((n-j)T) - v(nT))^2 + \left| \ddot{R}_e(0) \right| - 2A_N \sum_{j=0}^{N-1} \left(j - \frac{N-1}{2} \right) \dot{R}_e(jT) + A_N^2 \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left(j - \frac{N-1}{2} \right) \left(k - \frac{N-1}{2} \right) R_e((k-j)T). \quad (9)$$

При перетворенні величини $\tilde{h}(t)$ в цифровий код виникає додаткова похибка квантування. Дисперсія похибки квантування при цьому складає [5] $D_k = \delta_k^2 / 12$, де δ_k - одиниця молодшого розряду перетворення. Похибку квантування можна подати у вигляді дискретного білого шуму [5] з автокореляційною функцією $R(jT) = D_k \delta(jT)$, де $\delta(jT)$ - одинична імпульсна функція.

У відповідності з (9) похибка закруглення

$$D_1 = A_N^2 D_k \frac{N(N^2 - 1)}{12}, \quad (10)$$

а сумарна похибка у визначенні швидкості проходки $D = D_0 + D_1$, (11)

де складова D_0 визначається формулою (9), а D_k - за формулою (10).

Аналіз запису $\tilde{h}(t)$ на діаграмний папір показав, що на значення проходки $h(t)$ накладається адитивна перешкода, яка наближено може бути описана гармонійним процесом

$$e(t) = a_0 \sin(\omega_0 t + \psi), \quad (12)$$

для якого a_0 і ω_0 - постійні на протязі одного рейсу, а ψ - випадкова величина з рівномірною густиною розподілу в інтервалі $[0; 2\pi]$. Для такого гармонійного процесу автокореляційна функція буде такою:

$$R_e(\tau) = \frac{a_0^2}{2} \sin \omega_0 \tau. \quad (13)$$

Враховуючи те, що

$$h(t) = \frac{v_0}{K_\varepsilon} \ln(1 + K_\varepsilon t) \quad (14)$$

$$i \quad v(t) = \frac{v_0}{K_\varepsilon t + 1}, \quad (15)$$

із формули (9) при $N=3$ визначимо, що

$$D = v_0^2 \left(\frac{1}{K_\varepsilon nT + 1} - \frac{1}{2K_\varepsilon T} \ln \frac{1 + K_\varepsilon(n+2)T}{1 + K_\varepsilon nT} \right)^2 + \frac{a_0^2}{4T^2} \left(2T^2 \omega_0^2 + 1 + \sqrt{1 + 4T^2 \omega_0^2} \times \sin \left(2T\omega_0 - \arctg \frac{1}{2T\omega_0} \right) \right). \quad (16)$$

Із останнього виразу витікає, що D залежить від дискретного часу nT , а це ускладнює знаходження кроку дискретизації T .

Аналіз формули (16) показує, що тільки складова

$$D_n = v_0^2 \left(\frac{1}{K_\varepsilon n T + 1} - \frac{1}{2K_\varepsilon T} \ln \frac{1 + K_\varepsilon (n+2)T}{1 + K_\varepsilon n T} \right)^2 \quad (17)$$

є функцією змінної nT .

На рис.1 показаний графік зміни D_n , побудований для різних значень k при $T=0,01$ год. і $T=0,05$ год., із якого видно, що D_n - досягає свого максимального значення при $n=0$. При збільшенні n складова D_n монотонно зменшує своє значення.

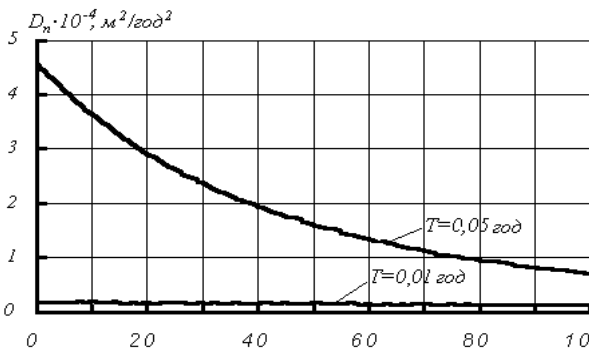


Рис. 1. Залежність похибки D_n від дискретного часу n при $v_0 = 3,6$ м/год.; $K_\varepsilon = 0,12$ год⁻¹

Тому визначимо верхню межу $D_0^{(m)}$ величини D_0 , яка буде мати місце при $n=0$.

Отже

$$D_0^{(m)} = v_0^2 \left(1 - \frac{1}{2K_\varepsilon T} \ln(1 + 2K_\varepsilon T) \right)^2 + \frac{a_0^2}{4T^2} \times \left(2T^2 \omega_0^2 + 1 + \sqrt{1 + 4T^2 \omega_0^2} \sin \left(2T\omega_0 - \arctg \frac{1}{2T\omega_0} \right) \right). \quad (18)$$

У відповідності з (10) і (11) сумарна похибка при $n=0$ і $N=3$ визначиться виразом

$$D^{(m)} = v_0^2 \left(1 - \frac{1}{2K_\varepsilon T} \ln(1 + 2K_\varepsilon T) \right)^2 + \frac{1}{4T^2} \left(\frac{\delta_k^2}{6} + a_0^2 (2T^2 \omega_0^2 + 1 + \sqrt{1 + 4T^2 \omega_0^2} \sin \left(2T\omega_0 - \arctg \frac{1}{2T\omega_0} \right) \right). \quad (19)$$

Поставимо задачу: знайти таке T , щоб величина $D^{(m)}$ була найменшою. Графік залежності $D^{(m)}$ від змінної T зображений на рис. 2, із якого видно, що в силу періодичності функції $\sin \left(2T\omega_0 - \arctg \frac{1}{2T\omega_0} \right)$

залежність $D^{(m)}(T)$ має більше одного мінімуму. Існує глобальний мінімум, для якого $T^*=26,6$ с, а $D_*^{(m)} = 5.91$ м²/год².

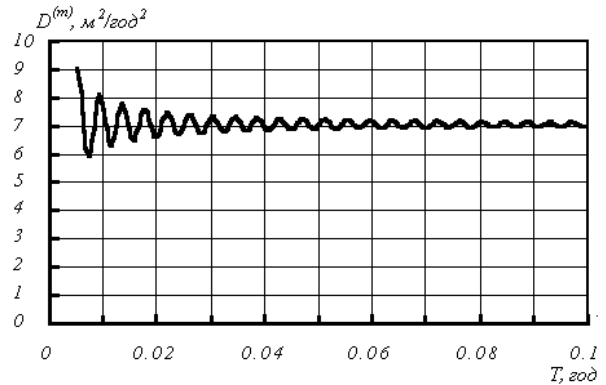


Рис. 2. Залежність похибки $D^{(m)}$ від кроку дискретності T при $v_0 = 3,6$ м/год.; $K_\varepsilon = 0,12$ год⁻¹; $a_0 = 0,005$ м; $\omega_0 = 0,209$ с⁻¹; $\delta_k = 0,001$ м

Оскільки стратегія адаптивного керування передбачає, що опорні керуючі впливи (осьове навантаження на долото в процесі пошуку екстремального значення критерію оптимальності) підтримуються постійними, то доцільно крок дискретизації вибирати за величиною, яка найшвидше змінюється з плином часу. Очевидно, що такою величиною є механічна швидкість буріння.

Отже, при розв'язку задачі і реалізації алгоритмів адаптивного керування процесом буріння за час дискретизації T слід вибирати таке його значення, яке мінімізує максимальну сумарну похибку $D^{(m)}$, що обчислюється за формулою (16).

1. Бражников В. А., Фурнэ А. А. Информационное обеспечение оптимального управления бурением скважин. - М.: Недра, 1989. - 208 с. 2. Бражников В. А., Попов С. С. Влияние сил сопротивления и неравномерности осевой нагрузки на точность измерения скорости бурения // Нефтяное хозяйство. - 1975. - № 2.- С. 16-17. 3. Семенов Г. Н., Горбичук М. И. Оптимальное управление процессом бурения скважин // Известия вузов. Горный журнал. - 1980. - № 6. - С. 59-63. 4. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами.: Пер. с англ. - М.: Мир, 1973. - 960 с. 5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных.: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 540 с.