

## ОБГРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРО МОМЕНТ ЛОГІЧНОГО ЗАВЕРШЕННЯ РЕЙСУ ДОЛОТА PDC

Л.Я. Чигур, Ю.Б. Долішня

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

*Розглядається задача прийняття рішень щодо визначення моменту логічного завершення рейсу доліт нового покоління типу PDC на основі техніко-економічного критерію.*

Ключові слова: трендовий аналіз, оптимальний поріг, долота нового покоління PDC, математичні моделі, механічна швидкість проходки

*Рассматривается задача принятия решений по определению момента логического завершения рейса долот нового поколения типа PDC на основе технико-экономического критерия.*

Ключевые слова: трендовий аналіз, оптимальний поріг, долота нового покоління PDC, математические модели, механическая скорость проходки.

*We consider the problem of decision-making with respect to determining when the logical conclusion of a new generation of flight bits such as PDC, based on techno-economic criteria.*

Keywords: trend analysis, the optimal threshold, the bit next-generation PDC, mathematical models, PDC.

Діагностування технічного стану полікристалічних бурових доліт типу PDC є актуальною науковою і практичною задачею у зв'язку з інтенсивним впровадженням доліт цього типу в практику буріння.

Проте, аналіз літературних джерел (наприклад, 1-4 та ін.) свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень в контексті використання формальних критеріїв виявлення факту і моменту часу зміни властивостей долота, що проявляється у вигляді «розкладки», тобто виходу за встановлені границі одного, або декількох параметрів, які використовуються для оцінювання тренду в інтересах допускового контролю.

Тому метою даної статті є вирішення завдання технічного діагностування долота типу PDC із застосуванням апарату математичної статистики, а саме методів трендового аналізу.

Об'єктом дослідження є процес відпрацювання бурового долота типу PDC, а предметом дослідження – спосіб діагностування технічного стану долота на базі інформації про механічну швидкість проходки.

Припустимо, що процес буріння описується функціональною залежністю [2]:

$$v_m = f\left(F, n, Q, D, p_{III}, \frac{ES}{L}\right), \quad (1)$$

де:  $v_m$  – механічна швидкість проходки;

$F$  – осьова сила на долото;

$n$  – швидкість обертання долота;

$Q$  – об'ємна витрата промивальної рідини;

$D$  – діаметр долота;

$p_{III}$  – твердість гірської породи;

$E$  – модуль пружності матеріалу труб;

$S$  – площа поперечного перерізу колони бурильних труб,

$L$  – глибина буріння.

Шукана функціональна залежність одержана [2] з допомогою  $\bar{n}$ -теореми теорії подібності у критеріальному вигляді:

$$\frac{v_m}{n} = f\left(\frac{F}{p_{III} D^2}, \frac{Q}{n D^3}, \frac{ES}{LD p_{III}}\right). \quad (2)$$

Проте, найбільш повною є залежність, побудована на базі результатів численних промислових досліджень про вплив різних чинників на механічну швидкість проходки і представлена [2] в мультиплікативній формі:

$$\frac{v_m}{nD} = k \left(\frac{F}{p_{III} D^2}\right)^\alpha \left(\frac{Q}{n D^3}\right)^\beta \left(\frac{ES}{LD p_{III}}\right)^\gamma, \quad (3)$$

де  $k, \alpha, \beta, \gamma$  – емпіричні коефіцієнти, які підлягають ідентифікації за результатами промислових досліджень.

Аналіз цієї залежності вказує на її узгодженість в якісному плані з відомими формулами вітчизняних і зарубіжних вчених [2, 3, 4].

Поточне значення механічної швидкості проходки залежить від часу внаслідок зношування оснащення долота. В роботі [5] на основі експериментальних досліджень і результатів обробки матеріалів, отриманих іншими дослідниками, встановлено, що залежність  $v_m(t)$  має такий вигляд

$$v_m(t) = v_0 \left(1 + K(n-1)v_0^{n-1}t\right)^{\frac{1}{n-1}}, \quad (4)$$

де  $v_0$  – початкова механічна швидкість проходки незатупленим долотом,

$$v_0 = a_0 + 2a_1F + 2a_2n + 2a_3Fn + a_4F^2 + a_5n^2,$$

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – коефіцієнти полінома,  
 $K$  – постійне число, яке використовується в математичній моделі (4) як коефіцієнт зношування;

$n$  – показник степеня,  $n \in [0, 4]$ .

Рівнянню (4) відповідає залежність поточних значень проходки

$$h(t) = v_0^{-(n-2)} \left[ \left( 1 + K(n-1)v_0^{n-1} \cdot t \right)^{\frac{n-2}{n-1}} \right] \times (K(n-2))^{-1} \quad (6)$$

Формули (4), (5), (6) є математичною моделлю процесу буріння, яка може слугувати основою для оптимізації певного показника ефективності процесу.

Проте для оптимізації відпрацювання доліт типу PDC краще скористатися узагальненою математичною моделлю процесу буріння [6]

$$\frac{dh}{dt} = \frac{v_0}{\varphi^r}; \quad \frac{d\varphi}{dt} = K_\varphi \cdot \varphi^s; \quad \frac{dg}{dt} = K_g \quad (7)$$

з початковими умовами

$$h(0) = 0, \quad \varphi(0) = 1, \quad g(0) = 0, \quad (8)$$

де:  $\varphi = \frac{v_0}{v_t}$  – узагальнена оцінка стану оснащення долота;

$r$  і  $s$  – деякі постійні величини, які приймають значення із множини  $\{-1; 0; 0.5; 1\}$ ;

$K_\varphi$  – інтенсивність зношування долота (параметри  $K_R, K_V, K_\varepsilon$  або  $K_g$ );

$g$  – оцінка стану опор долота;

$K_g$  – швидкість зміни оцінки стану опор долота.

Перевагою узагальненої моделі є те, що вона охоплює цілий клас моделей, які адекватні умовам буріння нафтових і газових свердловин. Крім того, змінні стану піддаються спостереженню безпосередньо в процесі буріння.

Враховуючи, що долота типу PDC є безопорними і їх оснащення практично не зношується, для буріння в ізотропних породах з постійними керувальними діями  $F = const, n = const$  модель (7) можна спростити до такого вигляду

$$v_m = \frac{dh}{dt} = v_0; \quad \frac{d\varphi}{dt} = 0 \quad (9)$$

з початковими умовами

$$h(0) = 0; \quad \varphi(0) = 1. \quad (10)$$

Тоді узагальнена оцінка стану оснащення долота типу PDC

$$\varphi = \frac{v_0}{v_t} = 1 \quad (11)$$

зберігає своє значення протягом усього основного періоду роботи долота.

Проте, на завершальному етапі роботи долота PDC спостерігається інтенсивне зношування оснащення і зменшення механічної швидкості проходки  $v_m(t)$  за одним із законів, яким описується рівнянням (4), що спостерігається у вигляді порушення однорідності часових рядів, тобто «розкладки».

Виявлення факту і моменту часу зміни статистичних характеристик результатів реєстрації

контрольованих параметрів процесу буріння є предметом трендового аналізу [8].

Задачі трендового аналізу розв'язуються на базі таких методів математичної статистики:

- оцінки випадковості різниці між заданим математичним сподіванням і вибірковою середнім в послідовностях даних контрольованих параметрів;

- оцінки належності вибірок контрольованих параметрів до однієї генеральної сукупності;

- виявлення закономірностей в послідовностях контрольованих параметрів.

Якщо задачі першої групи охоплюють параметричні методи і є традиційними в прикладній статистиці [8], а задачі другої групи, як правило, розв'язуються за допомогою непараметричних методів оцінювання з використанням рангових статистик [9], то задачі третьої групи є класичними задачами про «розкладку» [3], для розв'язання яких використовується як параметричні, так і непараметричні методи.

В трендовому аналізі реалізується двоальтернативна задача статистичного розрізнення гіпотез, коли використовується або критерій Неймана-Пірсона, або критерій оптимального спостерігача [8]. При аналізі технічного стану долота можуть бути використані типові критерії виявлення трендів [10]: критерій Хальда-Аббе, модифікований Z-критерій, інтегральний S-критерій, модифікований S-критерій, інтегральний критерій приростів та ін.

При цьому важливого значення набуває обґрунтоване визначення порогу прийняття рішення, з яким порівнюється вирішальна статистика. У допусковому контролі такий поріг призначається, виходячи із досвіду експлуатації заданого типу долота, а при розв'язанні задачі виявлення «розкладки» – на базі апріорно заданої ймовірності хибних рішень.

Оптимальне призначення порогу, в свою чергу, вимагає використання статистичних даних про відпрацювання доліт.

Для вибору порогу, тобто моменту логічного завершення рейсу долота PDC і оптимальної кратності механічних швидкостей  $m$ , скористаємося рівнянням, яке зв'язує собівартість 1 м проходки свердловини  $q$  з параметрами режиму буріння [3,4]:

$$q = \frac{\left[ (m-1) + K_t v_0 \left( t_{СП} + \frac{B_\delta}{B_\Gamma} \right) \right] B_\Gamma}{v_0 \ln m}, \quad (12)$$

де:  $m$  – кратність механічних швидкостей, яка дорівнює співвідношенню початкової  $v_0$  і кінцевої  $v_k$  швидкостей буріння протягом одного рейсу долота,  $m = v_0/v_k$ ;

$t_{СП}$  – час, що витрачається на спускопідіймальні і допоміжні операції, віднесений на один метр проходки;

$B_\delta$  – вартість долота;

$B_\Gamma$  – вартість однієї години роботи бурової установки без вартості долота;

$K_i$  – оцінка інтенсивності зношування оснащення долота.

Оскільки, для алмазних доліт типу PDC  $K_i = 0$ , тоді

$$q = \frac{[(m-1)+0]B_\Gamma}{v_0 \ln m}, \text{ або} \\ qv_0 \ln m = (m-1)B_\Gamma. \quad (13)$$

Для спрощення рівняння (2) скористаємося розкладанням  $\ln m$  в ряд Маклорена для області збіжності  $m > \frac{1}{2}$ :

$$\ln m = (m-1) - \frac{(m-1)^2}{2} + \frac{(m-1)^3}{3} - \frac{(m-1)^4}{4} + \dots + (-1)^{n+1} \frac{(m-1)^n}{n} + \dots \quad (14)$$

Скористаємось першими двома членами ряду і тоді представимо рівняння (13) у такому вигляді:

$$qv_0 \left[ (m-1) - \frac{(m-1)^2}{2} \right] = B_\Gamma (m-1). \quad (15)$$

Після перетворень отримаємо

$$qv_0 m = 3qv_0 - 2B_\Gamma. \quad (16)$$

Із (16) маємо

$$m = \frac{3qv_0 - 2B_\Gamma}{qv_0}, \text{ або} \\ m = 3 - \frac{2B_\Gamma}{qv_0}. \quad (17)$$

Оскільки  $2B_\Gamma \ll qv_0$ , то  $\frac{2B_\Gamma}{qv_0} < 1$ , тобто  $2 < m < 3$ .

Оскільки, як показник зношування долота PDC прийняли узагальнену оцінку стану оснащення долота  $\varphi(t) = \frac{v_0}{v_t}$ , то врахуємо, що функція

$\varphi(t)$  має таку властивість, що до початку завершального періоду роботи долота її математичне сподівання дорівнює одиниці, а після початку катастрофічного зношування – всередньому монотонно зростає в часі. Для визначення моменту підйому долота для заміни застосована процедура порівняння на кожному кроці обчислення значення  $\varphi(t)$  з деяким порогом  $\Delta$ , який відповідає кратності зменшення механічної швидкості  $m = 2,5$ . Оскільки, значення випадкової величини  $\varphi(t)$  до початку катастрофічного зношування оснащення долота PDC розподілені нормально, то ймовірності 0,98 відповідає значення ширини порогу  $m = 2,5$ . Аналогічні результати отримані для випадку, коли за показник зношування долота прийняли

механічну ефективність долота  $\lambda(t) = \frac{v_t}{v_0}$ .

## Висновок

На основі проведеного аналізу законів зміни механічної швидкості проходки обґрунтовано вибір ширини порогу прийняття рішення про момент логічного завершення рейсу долота PDC, з яким порівнюється математичне сподівання механічної швидкості проходки, що спостерігається протягом основного періоду роботи долота.

## Література

- 1 Драганчук О.Т. Аналіз відпрацювання доліт PDC на родовищах України і світу / О.Т. Драганчук, Т.О. Пригоровська // Нафтогазова енергетика. – 2008. – №4. – С. 11–15.
- 2 Мислюк М.А. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі [навчальний посібник] / М.А.Мислюк, Ю.О.Зарубін. – Івано-Франківськ: Екор, 1999. – 496 с.
- 3 Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: навчальний посібник / М.І. Горбійчук, Г.Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 493 с.
- 4 Семенцов Г.Н. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій і газовій промисловості: навчальний посібник / Г.Н. Семенцов, Я.Р. Когуч, Я.В. Куровець, М.М. Дранчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 300 с.
- 5 Ситников Н.Б. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин: автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов и производств (промышленность) / Н.Б. Ситников – Екатеринбург, 2000. – 41 с.
- 6 Кропивницька В.Б. Оптимальне керування процесом буріння нафтових і газових свердловин з дискретно-неперервною зміною керувальних дій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 0513.07 – Автоматизація технологічних процесів / Кропивницька Віталія Богданівна. – Івано-Франківськ, 2007. – 20 с.
- 7 Жигалевський А.А. Обнаружение разкладки случайных процессов в задачах радиотехники / А.А. Жигалевский, А.Е. Красковский. – Л.: Изд. Ленингр. ун-та, 1988. – 224 с.
- 8 Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 422 с.
- 9 Хетманспергер Т. Статистические выводы, основанные на рангах / Т. Хетманспергер. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 334 с.
- 10 Епифанов С.В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, В.Л. Кузнецов, И.Н. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
02.12.10

Рекомендована до друку професором  
Г.Н. Семенцовим