



УДК 004.942

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-47-56

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЧАСТОТИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІД ДИНАМІКИ ЗНОШЕННЯ ДОЛОТА ТИПУ PDC

Чигур Л. Я.*

Кандидат технічних наук, доцент,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5653-9246>
e-mail: liudmyla.chyhur@nung.edu.ua

Лагойда А. І.

Кандидат технічних наук, доцент,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0862-7786>
e-mail: andrii.lahoida@nung.edu.ua

Чигур І. І.

Кандидат технічних наук, доцент,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0023-3328>
e-mail: ihor.chyhur@nung.edu.ua

Анотація. У статті розглядаються математичні моделі динаміки зміни технологічних параметрів у процесі буріння, зокрема такі критично важливі показники, як час ексцесу, швидкість реакції системи на відхилення та умови своєчасного виявлення аномалій. Основну увагу приділено аналізу частоти дискретного контролю з урахуванням ймовірності виходу параметрів за межі допустимих значень, що є ключовим чинником для підвищення ефективності, надійності та безпеки бурового процесу. На прикладі показника механічної ефективності долота типу PDC (polycrystalline diamond compact) детально обґрунтовано підходи до визначення оптимальної частоти моніторингу. Такий підхід дозволяє досягти балансу між вимогами до точності та оперативності контролю і економічною доцільністю впровадження відповідних технічних рішень. Запропоновані методи враховують як особливості фізико-механічних властивостей гірських порід, так і технічний стан бурового інструменту, що дозволяє адаптувати частоту контролю до конкретних умов буріння. Дослідження ґрунтуються на поєднанні теоретичних розрахунків, аналізу емпіричних даних та моделювання сценаріїв роботи сучасних систем автоматизованого контролю. Запропоновано адаптивний підхід до визначення параметрів контролю, який враховує змінні умови експлуатації та дозволяє оперативно реагувати на потенційні ризики. Представлені результати можуть бути використані для вдосконалення

Запропоноване посилання: Чигур, Л. Я., Лагойда, А. І. & Чигур, І. І. (2025). Дослідження залежності частоти моніторингу технологічних параметрів від динаміки зношення долота типу PDC. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 47-56. doi: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-47-56

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

існуючих алгоритмів управління буровим процесом, оптимізації ресурсів та створення нових високоефективних систем технічного моніторингу і діагностики.

Ключові слова: механічна ефективність; аварійні режими; адаптивний контроль; системи управління бурінням.

Вступ

Сучасні технології буріння нафтових і газових свердловин вимагають високоточного контролю параметрів роботи бурового інструменту, зокрема доліт типу PDC. Протягом основного періоду експлуатації ці параметри змінюються повільно, що дозволяє проводити їх дискретний моніторинг із заданою періодичністю. Однак у разі аварійних ситуацій час реакції системи контролю має бути мінімізований для запобігання критичним відхиленням.

Протягом основного періоду роботи долота типу PDC параметри режиму буріння і показники процесу змінюються повільно, і час дискретного контролю Δt , визначений за теоремою В. А. Котельникова

$$\Delta t = \frac{1}{2F_{\max}}, \text{с}, \quad (1)$$

де $F_{\max}$ – максимальна частота в спектрі контрольованого сигналу, дорівнює декільком хвилинам [1]. При цьому кількість давачів, яку може обслужити система контролю і управління бурінням, визначається як

$$N = T \cdot (t_0)^{-1}, \quad (2)$$

де T – загальний час контролю, t_0 – час обслуговування одного параметра.

Проте під час аварійних ситуацій час дискретного контролю Δt має бути значно меншим, оскільки головною задачею системи контролю за відпрацюванням долота типу PDC є швидке виявлення неприпустимого відхилення основних контрольованих параметрів від норми.

Швидкість зміни параметрів визначається не тільки ступенем зносу озброєння долота, типорозміром долота, особливостями геологічного розрізу, витратою промивальної рідини, але й багатьма іншими факторами, що важко піддаються обліку. Час, за який сигнал

відхиляється від заданого значення і досягає допустимого для даного параметра значення, запропоновано [1] називати часом ексцесу t_e .

Мета роботи – аналіз залежностей частоти дискретного контролю відхилень технологічних параметрів процесу буріння за межі норми від ширини зони нормальних значень і ймовірності виходу неконтрольованого параметра із цієї зони.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

З існуючих наукових досліджень [1÷5] відомо, що динамічні властивості великої кількості об'єктів керування нафтогазовидобувної галузі промисловості описуються диференціальними рівняннями першого порядку з постійними коефіцієнтами. Наприклад, збільшення навантаження на бурове долото або його зменшення описується таким диференціальним рівнянням:

$$T \frac{d\varphi}{dt} + \delta\varphi = \mu, \quad (3)$$

де T – стала часу об'єкта керування; φ – відносне відхилення контрольованого параметра λ , ($\varphi(0)=0$); δ – коефіцієнт самовирівнювання об'єкта; μ – відносна величина збурюючого впливу F .

З рівняння (3) знаходимо так:

$$\varphi(t) = \left(\frac{\mu_0}{\delta} - \frac{\mu_0}{\delta} e^{\left(-\frac{\delta}{T}\right)t} \right) 1(t), \quad (4)$$

$$\text{або } \varphi(t) = \frac{\mu_0}{\delta} \left(1 - e^{\left(-\frac{\delta}{T}\right)t} \right) 1(t). \quad (5)$$

З рівняння (5) для значення φ_a відхилення контрольованого параметра, тобто коли $\varphi = \varphi_a$, можна визначити час ексцесу t_e .

Графіки зміни в часі відносних відхилень контрольованого параметра

$\varphi(t)$ для різних значень коефіцієнта δ і відносного значення збурюючого впливу μ наведені на рис. 1.

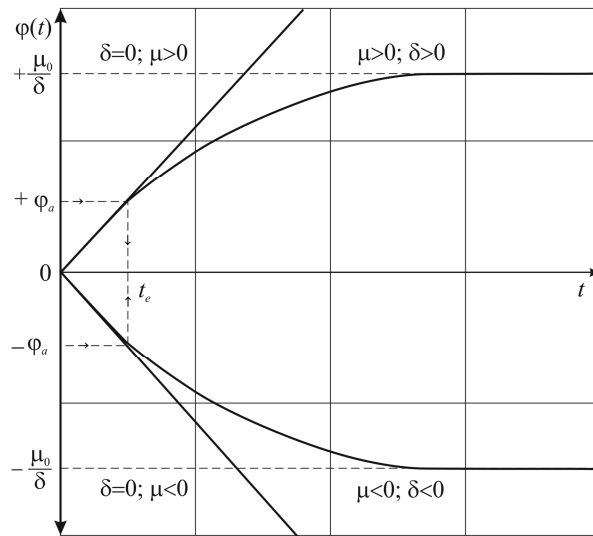


Рисунок 1 – Графіки зміни в часі відносних відхилень контрольованого параметра $\varphi(t)$ для різних значень коефіцієнта самовирівнювання об'єкта і відносного значення збурюючого впливу μ

Верхній графік, тобто область, яка відповідає $\varphi > 0$, можна розглядати для граничних значень крутного моменту, а нижній, коли $\varphi < 0$ – для осьової сили на долото.

Як бачимо з графіків, наведених на рис. 1, для випадку, коли значення відхилення $\varphi_a \ll \frac{\mu_0}{\delta}$, експоненту на початку графіка можна апроксимувати рівнянням прямої лінії.

Для знаходження часу ексцесу t_e вираз $e^{-\left(\frac{\delta}{T}\right)t_e}$ з рівняння (5) розкладемо в ряд Маклорена:

$$e^{-\left(\frac{\delta}{T}\right)t_e} = 1 - \frac{\delta}{T}t_e + \frac{\left(\frac{\delta}{T}\right)^2 t_e^2}{2!} - \frac{\left(\frac{\delta}{T}\right)^3 t_e^3}{3!} + \frac{\left(\frac{\delta}{T}\right)^4 t_e^4}{4!} + \dots \quad (6)$$

Для оцінки часу ексцесу t_e обмежимося першими двома членами ряду (6):

$$e^{-\left(\frac{\delta}{T}\right)t_e} = 1 - \frac{\delta}{T}t_e, \quad (7)$$

$$t_e = \frac{\varphi_a \cdot T}{\mu_0}. \quad (8)$$

Отже, бачимо, що за умови $\varphi_a \ll \frac{\mu_0}{\delta}$ мінімальне значення часу ексцесу $t_{e \min}$ визначається для даного об'єкта величиною максимально можливого збурення

$$t_{e \min} = \frac{\varphi_a \cdot T}{(\mu_0)_{\max}}. \quad (9)$$

Тоді умову своєчасного виявлення контрольованого параметра можна сформулювати у такому вигляді

$$t_e = \frac{\varphi_a \cdot T}{(\mu_0)_{\max}} \rightarrow \min, \quad (10)$$

або

$$t_e = t_0 \cdot m \rightarrow \min,$$

де t_0 – час обслуговування, тобто час, який потрібен системі контролю для порівняння поточного значення сигналу з границями аварійної зони; m – кількість давачів в системі контролю процесу відпрацювання долота.

Оскільки

$$\frac{\varphi_a \cdot T}{(\mu_0)_{\max}} = t_0 m,$$

то кількість давачів в системі контролю визначається як

$$m = \frac{\varphi_a T}{(\mu_0)_{\max} \cdot t_0}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{t_0} = \frac{m (\mu_0)_{\max}}{\varphi_a T}.$$

Тоді частота f_K перемикання комутатора при описуванні m давачів системи контролю має дорівнювати

$$f_K = \frac{m (\mu_0)_{\max}}{\varphi_a T}. \quad (12)$$

Якщо частота f_K опитування давачів задана, то можна визначити розрахункову

кількість давачів, яку здатна обслужити система контролю

$$m = \frac{f_k \cdot \varphi_a \cdot T}{(\mu_0)_{\max}}. \quad (13)$$

Оскільки частота контролю параметрів процесу відпрацювання доліт залежить від заданого значення вірогідності контролю, то розглянемо питання вибору частоти дискретного контролю відхилення технологічних параметрів за межі норми з урахуванням вірогідності контролю.

Теоретична база роботи

Аналіз і вибір частоти контролю відхилень технологічних параметрів за межі норми в залежності від ширини зони нормальних значень та ймовірності виходу контрольованого параметра із цієї зони є актуальною науково-практичною задачею. Це викликано тим, що сучасні системи контролю, первинної переробки і автоматичної реєстрації параметрів технологічних процесів будуються за принципом циклічної дії.

Вибір частоти дискретного контролю залежить не тільки від статичних і динамічних характеристик вимірювального каналу, але й від частотної характеристики вимірювального сигналу. Занижена частота контролю може звести до нуля результати дискретного моніторингу і привести до аварійного стану технологічного процесу, оскільки при цьому неможливо прослідкувати з необхідною точністю за зміною керованої величини. Отже, правильний вибір частоти контролю дозволяє зберегти допустиму похибку у визначенні значень сигналів на інтервалах між дискретними значеннями.

Проте, аналіз літературних джерел (наприклад, [2, 3, 5, 7]), присвячених розрахунку частоти для дискретного контролю і вимірювань технологічних параметрів та техніко-економічних чинників процесу буріння, показує недостатній об'єм проведених досліджень у цьому напрямку.

Ця задача розглядається на прикладі контролю показника механічної ефективності долота $\lambda = v_t v_0^{-1}$, який

характеризує знос його зубців і міцність породи.

Вибір цього показника обумовлений тим, що буріння є складним стохастично-хаотичним невідтворюваним процесом, який відбувається за умов апіорної та поточної невизначеності і функціонує під впливом завад.

Показник λ відноситься [4, 6] до категорії параметрів, одиничні короткочасні відхилення яких від меж норми є неприпустимими, оскільки можуть викликати аварійний режим установки. Частота вимірювань цього параметру як захисної інформації повинна базуватись на максимально допустимому значенні похибки вимірювання у будь-який момент часу, яке можна прийняти за максимально допустиму похибку апроксимації δ_{st} . До цієї категорії параметрів відноситься також вага бурильного інструменту, осьова сила на долото, крутний момент на трубах, витрата і тиск бурового розчину.

Другу категорію створюють техніко-економічні показники процесу, короткочасні коливання яких не відображаються на режимі роботи бурової установки. Контроль цих показників (собівартість метра проходки, рейсова швидкість буріння, густина і рівень розчину в резервуарі, проходка долота, витрати енергії) потрібен для виявлення тренду їх зміни і вирішення задач прогнозування.

Тому достатньо знати їх усереднені значення за певний проміжок часу. Частота вимірювань їх може бути вибрана на базі середньої квадратичної оцінки ходу зміни значення неконтрольованого параметра в часі [1÷3], яку можна прийняти як похибку апроксимації G_{st} .

Для узагальнення цих двох методів дискретного контролю параметрів технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин запропоновано максимально допустиму похибку апроксимації G_{st} , скориставшись нерівністю з [1]. Тоді, незалежно від закону розподілу випадкової похибки апроксимації інтервалу Δt , ймовірність P

похибки апроксимації, не меншої за значення δ_{zt} , обмежена зверху таким співвідношенням

$$P[\Delta t \geq \delta_{zt}] \leq G_{zt}^2 \cdot (\delta_{zt}^2)^{-1}. \quad (14)$$

Для нормального закону розподілу похибки апроксимації, коли $\delta_{zt} = 3\sigma$, отримаємо

$$P[\Delta t \geq G_{zt}] \leq 0,11. \quad (15)$$

Згідно з рівнянням (14) допустима середня квадратична похибка G_{zt} зв'язана з максимально допустимою похибкою апроксимації δ_{zt} рівнянням

$$G_{zt} = \delta_{zt} (P[\Delta t \geq \delta_{zt}])^{1/2}. \quad (16)$$

Отже, визначення кроку дискретизації на базі заданої середньої квадратичної похибки апроксимації вирішує задачу оцінки частоти дискретного контролю показника λ механічної ефективності долота. Що стосується параметрів другої категорії, то визначення частоти дискретного контролю треба здійснювати за заданою середньою квадратичною похибкою апроксимації і відомою оцінкою автокореляційної функції.

Показник $\lambda(t)$ може приймати значення з двох можливих областей:

- область допустимих значень, яка відповідає нормальному технічному стану полікристалічного озброєння долота типу PDC;
- область значень, яка відповідає критичному стану озброєння долота.

У цьому випадку головна операція дискретного контролю полягає у тому, що для контрольованої величини $\lambda(t)$ у будь-який момент часу повинно перевірятися виконання умови

$$\lambda_n \leq \lambda(t) \leq \lambda_v, \quad (17)$$

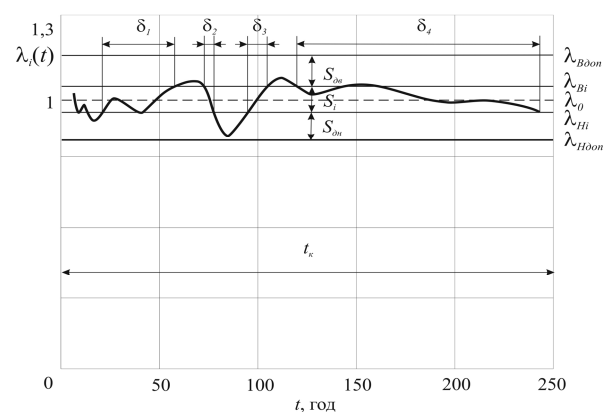
де λ_n , λ_v – відповідно нижнє і верхнє значення норми механічної ефективності долота PDC.

Проте, аналіз літературних джерел, наприклад [7], показує, що в системах контролю і управління процесом буріння нафтових і газових свердловин, наприклад, Контур-2, СКУБ-М2, БУР-САК та ін.,

відсутній контроль параметрів технічного стану доліт, які є випадковими функціями часу. Контрольні операції здійснюються лише в дискретні моменти часу згідно геолого-технічного наряду. Це веде до зменшення вірогідності результатів контролю в інтервалах часу між контрольними операціями.

Тому виникає актуальне питання: як часто слід здійснювати контроль механічної ефективності долота PDC у відповідності із заданим значенням вірогідності контролю, наприклад, $B_k = 0,95$.

Результатом контролю має бути встановлення факту, чи знаходиться контрольована величина λ_i в зоні нормальних значень S_i . Графік контролю відхилень технологічного параметру $\lambda_i(t)$ від норми наведено на рис. 2.



$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ – відрізки існування сигналу в зоні нормальних значень;

S_i – зона нормальних значень;

$S_{ов}, S_{он}$ – зони допустимих відхилень від верхніх $\lambda_{вг}$ і нижніх $\lambda_{нл}$ границь;

$\lambda_{в доп}, \lambda_{н доп}$ – верхня і нижня межа допустимих відхилень;

t_k – повний час контролю

Рисунок 2 – Графік контролю відхилень показника $\lambda_i(t)$ від норми

Графік побудовано на основі спостережень за процесом буріння експлуатаційної свердловини №522 ГС Прикарпатського УБР буровим верстатом «Уралмаш-4Е-76», проектна глибина якої

2200 м. Статистична обробка результатів експерименту довела, що отримані результати підпорядковуються нормальному закону розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова, оскільки значення критерію $d_{\max} < d^*$, де d^* – критичне значення критерію. Середнє квадратичне відхилення дорівнює 0,1, оцінка генеральної дисперсії – 0,01.

Якість буріння свердловини оцінюється значенням вимірюваного показника λ (рис. 3).

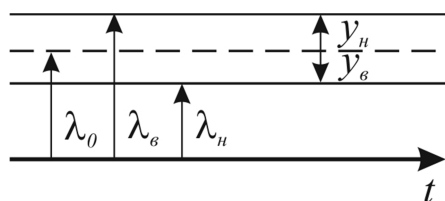


Рисунок 3 – Граничні значення показника λ механічної ефективності долота типу PDC

Якщо λ_0 – початкове значення механічної ефективності долота, то, оскільки під час буріння спостерігаються відхилення λ від номіналу $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, технічні вимоги можна визначити полем допуску

$$S_i = \lambda_e - \lambda_n = y_e + y_n, \quad (18)$$

де λ_e, λ_n – верхнє і нижнє допустимі значення показника λ ; y_e, y_n – верхнє і нижнє допустимі відхилення показника λ від номіналу λ_0 .

Проте у загальному випадку відхилення $y_e \neq y_n$. Тоді процес буріння свердловини вважається ефективним, якщо виміряні значення λ лежать в межах

$$(\lambda_0 - y_n; \lambda_0 + y_e).$$

Верхню і нижню межі середніх значень λ запропоновано визначати, користуючись оцінками математичного сподівання $\bar{\lambda}_0$ і дисперсії σ_λ^2 , отриманими як результат спеціально організованих досліджень [8]:

$$K_{\bar{\lambda}_n} = \bar{\lambda}_0 - \left(\frac{S_\lambda}{\tilde{N}^{1/2}} \right) t_{q_{1/2}}, \quad (19)$$

$$K_{\bar{\lambda}_e} = \bar{\lambda}_0 + \left(\frac{S_\lambda}{\tilde{N}^{1/2}} \right) t_{q_{1/2}}, \quad (20)$$

де $\bar{\lambda}_n, \bar{\lambda}_e$ – середні значення проведених вимірювань λ ; S – середнє квадратичне відхилення; $\tilde{N}$ – кількість послідовних вимірювань $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$; q_1 – вибраний рівень значущості; $t_{q_{1/2}}$ – походять з таблиць [8] для рівня значущості $q = q_{1/2}$ і числа степенів вільності $\nu = \tilde{N} - 1$.

Для зручності вибору відповідних параметрів відзначимо, що згідно з ДСТУ ISO 7870-2:2015 [9] $q_1 = 0,0027$, що відповідає 3σ -м довірчим границям. Значення N беруть в межах $3 \div 10$ в залежності від стабільності і продуктивності процесу поглиблення та інших технологічних факторів.

Інтервал часу Δt між окремими вимірами залежить від продуктивності процесу буріння, від відомої тривалості циклу між двома розладами процесу тощо. Зазвичай беруть Δt в межах $1 \div 2$ години.

На практиці фактичні значення λ_0 і σ_λ^2 часто невідомі, і тому необхідно отримати їх оцінки. Для цього слід провести попередні дослідження і отримати вибірку, яка містить $100 \div 150$ значень показника ефективності долота λ .

Оцінку математичного сподівання $\bar{\lambda}_0$ отримують як середнє арифметичне із m значень

$$\bar{\lambda}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \lambda_i, \quad (21)$$

дисперсію

$$\sigma_\lambda^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\lambda_i - \bar{\lambda})^2, \quad (22)$$

і середнє квадратичне відхилення

$$\sigma_\lambda = +\sqrt{\sigma_\lambda^2}. \quad (23)$$

Це дає змогу визначити межі (19) і (20) зміни показника λ , які відповідають нормальному стабільному ходу технічного процесу поглиблення свердловини, долотом типу PDC.

Проте, з часом вірогідність контролю зменшується у зв'язку з можливим виходом контрольованого параметра λ з цієї зони і переходом в зону допустимих значень – верхню $S_{\text{ов}}$ або нижню $S_{\text{он}}$ – і тоді як критерій вірогідності результату контролю можна прийняти ймовірність виходу контрольованого параметра $\lambda(t)$ із зони S_i за допустимий інтервал часу між моментами контролю.

Спочатку визначимо середній інтервал часу при неперервному контролі. З цією метою розглянемо поведінку контрольованого параметра всередині зони S_i нормальних значень.

Як моменти контролю виберемо фіксації переходів контрольованим параметром $\lambda(t)$ границь зони нормальних значень λ_{gi} знизу догори і λ_{ni} зверху вниз.

Середня кількість $\tilde{N}_{\text{cp}}$ таких переходів визначається за формулою [59]:

$$\tilde{N}_{\text{cp}} = t_{\kappa} \frac{(\rho''(0))^{1/2}}{2\bar{n}} \left(\exp \left(-\frac{(\lambda_{\text{gi}} - \bar{\lambda}_0)^2}{2\sigma_{\lambda^1}^2} \right) + \exp \left(-\frac{(\lambda_{\text{ni}} - \bar{\lambda}_0)^2}{2\sigma_{\lambda^1}^2} \right) \right), \quad (24)$$

де t_{κ} – повний час контролю, $\rho''(0) = \frac{\sigma_{\lambda^1}^2}{\sigma_{\lambda}^2}$ – динамічна характеристика контрольованої величини,

$$\rho''(0) = \frac{1}{\sigma_{\lambda}^2} \left(\frac{d^2 R_{\lambda\lambda}(\tau)}{d\tau^2} \right) = \frac{\int_0^{\infty} S_{\lambda}(\omega) \omega^2 d\omega}{\int_0^{\infty} S_{\lambda}(\omega) d\omega}, \quad (25)$$

σ_{λ}^2 – дисперсія контрольованого параметру $\sigma_{\lambda}^2 = R_{\lambda\lambda}(0) = \text{const}$; $\sigma_{\lambda^1}^2$ – дисперсія першої похідної $\lambda(t)$; $\bar{\lambda}_0$ – математичне сподівання контрольованого параметру

$\lambda(t)$, $\bar{\lambda}_0 = \lambda(t) = \text{const}$; $S_{\lambda}(\omega)$ – спектральна густина показника $\lambda(t)$, яка є зображенням автокореляційної функції $R_{\lambda\lambda}(\tau)$ за Фур'є:

$$S_{\lambda}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\lambda\lambda}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (26)$$

де $\tau = t_1 - t_2$ – різниця аргументів t_1 і t_2 ; ω – частота; $R_{\lambda\lambda}(\tau)$ – автокореляційна функція показника $\lambda(t)$:

$$R_{\lambda\lambda}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \dot{\lambda}(t) \lambda(t+T) dt, \quad (27)$$

$$R_{\lambda\lambda}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\lambda}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (28)$$

Значення $\rho''(0)$ визначається за апіорними даними про контрольований параметр $\lambda(t)$.

Якщо час контролю t_{κ} досить великий, тоді існування сигналу в зоні нормальних значень дорівнює

$$\sum_{j=1}^n \delta_j = P_i t_{\kappa}, \quad (29)$$

де P_i – апіорна ймовірність знаходження параметра $\lambda(t)$ в зоні P_i нормальних значень, n – кількість відрізків часу існування сигналу в зоні нормальних значень S_i .

Враховуючи сказане, середня частота операцій контролю співпадає з середньою частотою знаходження параметра λ в зоні S_i і може бути визначена за формулою

$$f_{\kappa} = \frac{\tilde{N}_{\text{cp}}}{\sum_{j=1}^n \delta_j}. \quad (30)$$

Користуючись формулою (30), розраховані частоти дискретного контролю показника $\lambda(t)$ для поглиблення свердловини долотами нового покоління типу PDC, які наведені на рис. 4.

Зокрема, якщо задана ймовірність виходу контрольованого параметру із зони

S_i , то можна, користуючись графіком, наведеним на рис. 3, визначити інтервал дискретного контролю параметру λ (рис. 5).

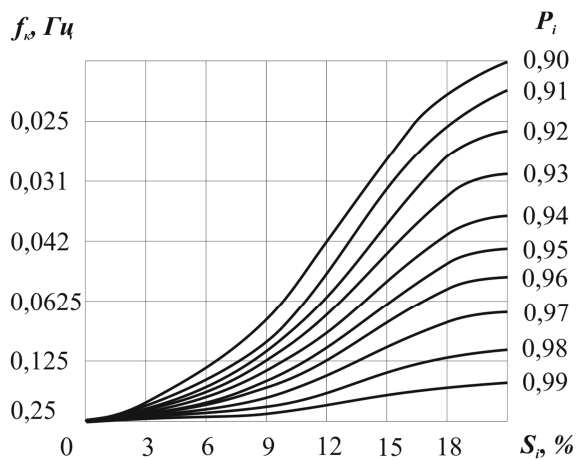


Рисунок 4 – Графіки залежностей частоти дискретного контролю механічної ефективності долота $\lambda(t)$ від ширини зони нормальних значень S_i , % для різних заданих значень ймовірностей P_i виходу контрольованого параметру із зони S_i

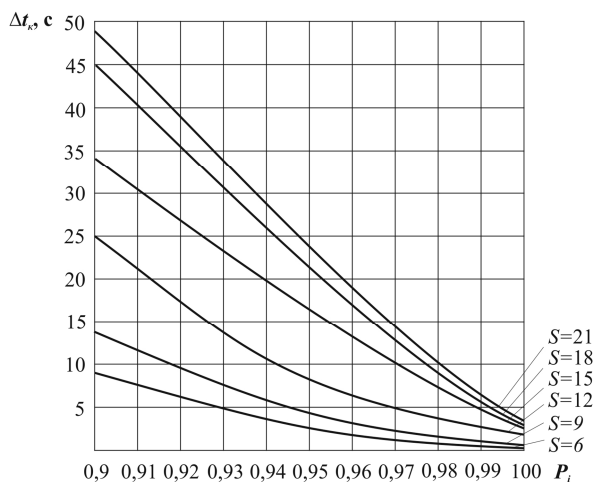


Рисунок 5 – Графіки залежностей інтервалів часу дискретного контролю механічної ефективності долота λ від ймовірності контролю для різних значень ширини зони нормальних значень S_i

Висновки

Дослідження довели, що вибір частоти дискретного контролю технологічних параметрів буріння, зокрема механічної ефективності доліт типу PDC, має ґрунтуватися на динамічних характеристиках процесу. Встановлено, що під час штатної роботи інтервал між вимірами може становити кілька хвилин, тоді як у аварійних режимах необхідна значно вища частота моніторингу для запобігання критичним відхиленням.

Запропоновано модель часу експесу, що визначає період, за який параметр досягає гранично допустимих значень. Використання диференціальних рівнянь першого порядку та апроксимація рядів Маклорена дозволили спростити розрахунки для практичного застосування. Ключовим параметром є максимальне збурення, яке визначає мінімальний час реакції системи.

Аналіз залежності частоти контролю від ширини зони нормальних значень та ймовірності виходу за межі норми показав, що для забезпечення вірогідності контролю на рівні 95% і більше необхідно зменшувати інтервали між вимірами при вузьких зонах допуску. Отримані результати дозволяють здійснити ефективний контроль показника механічної ефективності долота типу PDC і синтезувати пристрій контролю.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Петров Ю.П., Сиротюк В.Г. Теорія автоматичного керування. Київ: Наукова думка. 2012. 640 с.
2. Білецький В.С., Сіренко В.І. Автоматизація процесів нафтогазовидобутку. Київ: НТУУ "КПІ". 2018. 415 с.
3. Коваленко А.М., Петренко В.О. Моделювання та оптимізація процесів буріння свердловин. Дніпро: Національний гірничий університет. 2020. 352 с.
4. Савицький М.М., Григор'єв О.В. Інтелектуальні системи управління в нафтогазовій промисловості. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2019. 312 с.
5. Шевченко Р.А. Динаміка процесів буріння: теорія та практика. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2017. 288 с.
6. Григор'єв О.В., Шевчук В.М. Системи захисту бурових установок від аварійних режимів. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2020. 276 с.
7. Білецький В.С., Саранчук В.І. Сучасні системи моніторингу стану бурового інструменту. Київ: НТУУ "КПІ". 2020. 328 с.
8. Коваленко І.І., Пірогова Л.М. Статистичні методи оцінювання параметрів технологічних процесів. Київ: Наукова думка. 2020. 240 с.
9. ДСТУ ISO 7870-2:2015 Контрольні карти. Частина 2. 2015.

References

1. Petrov Yu. P., Sirotiuk V. H. Teoriia avtomatychnoho keruvannia. Kyiv: Naukova dumka. 2012. 640 p. [in Ukrainian]
2. Biletskyi V.S., Sirenko V.I. Avtomatyzatsiia protsesiv naftohazovydobuvannia. Kyiv: NTUU "KPI". 2018. 415 p. [in Ukrainian]
3. Kovalenko A.M., Petrenko V.O. Modeliuvannia ta optymizatsiia protsesiv burinnia sverdlovin. Dnipro: Natsionalnyi hirnychiy universytet. 2020. 352 p. [in Ukrainian]
4. Savytskyi M.M., Hryhoriev O.V. Intelektualni systemy upravlinnia v naftohazovii promyslovosti. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. 2019. 312 p. [in Ukrainian]
5. Shevchenko R.A. Dynamika protsesiv burinnia: teoriia ta praktyka. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. 2017. 288 p. [in Ukrainian]
6. Hryhoriev O.V., Shevchuk V.M. Systemy zakhystu burovvykh ustanovok vid avariinykh rezhymiv. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. 2020. 276 p. [in Ukrainian]
7. Biletskyi V.S., Saranchuk V.I. Suchasni systemy monitorynhu stanu burovoho instrumentu. Kyiv: NTUU "KPI". 2020. 328 p. [in Ukrainian]
8. Kovalenko I.I., Pirohova L.M. Statystychni metody otsiniuvannia parametriv tekhnolohichnykh protsesiv. Kyiv: Naukova dumka. 2020. 240 p. [in Ukrainian]
9. DSTU ISO 7870-2:2015 Kontrolni karty. Chastyna 2. 2015. [in Ukrainian]

RESEARCH ON THE DEPENDENCE OF THE FREQUENCY OF MONITORING OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE DYNAMICS OF WEAR OF A PDC BIT

Chyhur L. Ya.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-5653-9246>
e-mail: liudmyla.chyhur@nung.edu.ua

Lahoida A. I.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-0862-7786>
e-mail: andrii.lahoida@nung.edu.ua

Chyhur I. I.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-0023-3328>
e-mail: ihor.chyhur@nung.edu.ua

Abstract. The article considers mathematical models of the dynamics of changes in technological parameters in the drilling process, in particular such critically important indicators as the time of excess, the speed of the system's response to deviations and the conditions for timely detection of anomalies. The main attention is paid to the analysis of the frequency of discrete control taking into account the probability of parameters exceeding the permissible values, which is a key factor for increasing the efficiency, reliability and safety of the drilling process. Using the example of the mechanical efficiency indicator of a PDC (polycrystalline diamond compact) bit, approaches to determining the optimal monitoring frequency are substantiated in detail. This approach allows achieving a balance between the requirements for accuracy and efficiency of control and the economic feasibility of implementing appropriate technical solutions. The proposed methods take into account both the peculiarities of the physical and mechanical properties of rocks and the technical condition of the drilling tool, which allows adapting the control frequency to specific drilling conditions. The research is based on a combination of theoretical calculations, analysis of empirical data and modeling of scenarios of operation of modern automated control systems. An adaptive approach to determining control parameters is proposed, which takes into account changing operating conditions and allows for rapid response to potential risks. The presented results can be used to improve existing drilling process control algorithms, optimize resources, and create new highly efficient technical monitoring and diagnostic systems.

Keywords: mechanical efficiency; emergency modes; adaptive control; drilling control systems.