УДК 622.24.057.4 – 622.342.1

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ ОПИТУВАННЯ ДАВАЧІВ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШАРОШКОВИХ ДОЛІТ

© Чигур І. І., Горбійчук М. І., Семенцов Г. Н., 1999
Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Розглянуті два методи визначення періоду дискретності для режимних параметрів процесу буріння і зроблено їх порівняльний аналіз з точки зору визначення частоти опитування давачів пристрою контролю технічного стану шарошкових доліт.

Пристрій контролю технічного стану шарошкових доліт, алгоритм роботи якого описаний в [1], дозволяє визначати технічний стан опор і оснащення шарошкових доліт в реальному масштабі часу. В порівнянні з відомими аналогами пристрій дозволяє здійснювати контроль технічного стану доліт при мінімумі вхідної інформації. Містить базу знань, в якій сконцентрований досвід операторів-бурильників, що дозволяє контролювати технічний стан доліт в умовах геолого-технічної невизначеності, коли аналогічні засоби контролю, що базуються на детермінованих алгоритмах, неефективні.

Від вірогідності інформації, яка поступає від давачів контрольованих параметрів, в цілому залежить вірогідність контролю технічного стану доліт на вибої свердловини. Тому визначення частоти опитування давачів контрольованих параметрів – це задача, від вирішення якої залежить ефективність роботи пристрою контролю.

Оскільки технічний стан долота за короткі проміжки часу можна вважати незмінним, то контролювати непрямі показники зношення можна не за миттєвими, а за середніми значеннями отриманими за певний проміжок часу. Правильний вибір кроку дискретизації, що залежить від властивостей контрольованих сигналів, дозволяє зберегти допустиму похибку у визначенні значень сигналів на інтервалах між моментами вимірювань.

Припустимо, що величина x(t) вимірюється в дискретні моменти часу t_i, i= 0,1,2,... з інтервалом $\Delta t=t_{i+1} - t_i$.

В інтервалі між вимірами фактичні значення величини x(t) невідомі і тому величину, що спостерігається можна представити у вигляді

$$y_n(t)=x(t)+\delta(x,t),\ t_i \le t < t_{i+1}, \qquad (1)$$

де δ(x,t) – похибка спостереження.

Величина δ(x,t) має такі значення

$$\delta(x,t)=\begin{cases} \Delta x_в, \text{ при } t=t_i, \\ \delta_e(x,t), \text{ при } t_i < t < t_{i+1}, \end{cases} \qquad (2)$$

де $\Delta x_в$ – похибка вимірювань, $\delta_e(x,t)$ – похибка екстраполяції значень величини в інтервалі між вимірами,

$$\delta_e(x,t)=x_e(t)-x(t), \qquad (3)$$

де $x_e(t)$ – значення величини, що екстраполюється.

Для різних контрольованих величин і систем контролю формуються різні вимоги до похибки спостереження δ(x,t).

Математично ці вимоги описуються деяким функціоналом F{δ(x,t)} від похибки δ(x,t), що визначається в інтервалі $[t_i, t_{i+1}]$. Чисельне значення функціонала для даної величини визначається похибкою вимірювання $\Delta x_в$, похибкою екстраполяції δ_e і інтервалом Δt між вимірами:

$$F\{\delta(x,t)\}=\varepsilon(\Delta x_в, \delta_e, \Delta t). \qquad (4)$$

Задаючись граничними значеннями функціонала похибки $\varepsilon_{доп}$, розв'язується рівняння

$$\varepsilon(\Delta x_в, \delta_e, \Delta t)=\varepsilon_{доп} \qquad (5)$$

відносно Δt, розраховується потрібний крок дискретизації.

Для дискретного контролю параметрів режиму буріння, що потрібен для роботи пристрою контролю технічного стану доліт, можна скористатися іншим функціоналом похибки – максимальним середнім квадратом похибки в інтервалі Δt:

$$F\{\delta(x,t)\}=\max_{t_i \le t < t_{i+1}} M\left\{[\delta(x,t)]^2\right\}=\sigma^2_{\delta\,max}. \qquad (6)$$

При ступеневій екстраполяції маємо похибку екстраполяції:

$$\delta_e(x,t)=x(t_i)-x(t)+\Delta x_{e\,max}(t_i), \qquad (7)$$

де $\Delta x_{e\,max}$ - максимальна абсолютна похибка вимірювання, $x(t_i)$ – значення величини, що екстраполюється в момент часу t_i.

Тоді

$$\sigma^2_{\delta\,max}=\max_{t_i \le t < t_{i+1}} M\left\{[x(t_i)-x(t)+\Delta x_{e\,max}(t_i)]^2\right\}. \qquad (8)$$

В зв'язку з тим, що похибку вимірювання $\Delta x_e(t_i)$ для параметрів процесу буріння можна вважати незалежною від вимірюваних значень величини $x(t_i)$ і її систематична складова рівна нулю [4], то вираз (8) приводиться до виду

$$\sigma^2_{\delta max} = \max_{0\le\tau<\Delta t}\left\{2\left[R_{xx}(0) - R_{xx}(\tau) + \sigma_e^2\right]\right., \qquad (9)$$

де $R_{xx}(\tau)$ - оцінка автокореляційної функції процесу x(t), σ_e^2 - дисперсія похибки вимірювання.

Звідси видно, що для більшості практичних випадків, коли крива автокореляційної функції монотонно спадає на інтервалі від 0 до Δt, максимальне значення (9) похибки екстраполяції $\sigma^2_{\delta max}$ має місце в момент часу, що передує наступному вимірюванню, тобто при $\tau = \Delta t$.

Це дає можливість, задавшись максимально допустимим значенням $\sigma^2_{\delta доп}$, одержати рівняння

$$R_{xx}(\Delta t) = R_{xx}(0) - \frac{\sigma^2_{\delta доп} - \sigma_e^2}{2}, \qquad (10)$$

з якого визначається інтервал часу Δt між вимірюваннями.

Для цього необхідно скористатися графіками нормованих автокореляційних функцій R_{NN}, R_{vv}, R_{PP}, R_{nn}, приведеними на рис. 1, де $R_{NN}(\tau)$, $R_{vv}(\tau)$, $R_{PP}(\tau)$, $R_{nn}(\tau)$ – відповідно автокореляційні функції потужності на долоті, механічної швидкості проходки, навантаження на долото, частоти обертання долота.

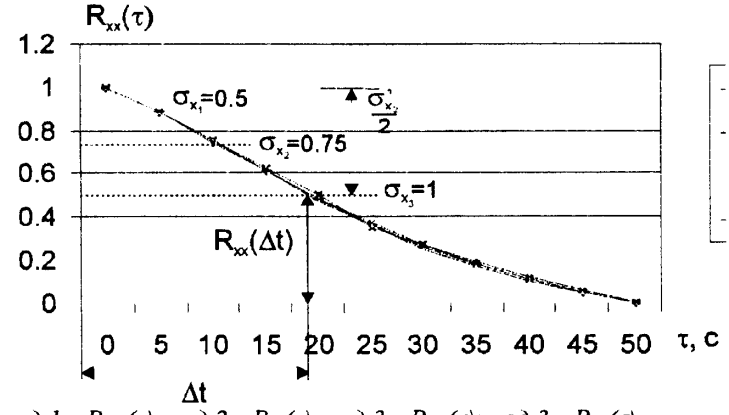
Задавшись довільним значенням Δt, визначаємо для нього σ_x і порівняємо з заданим значенням. Процес повторюється до співпадіння середньоквадратичної похибки з заданою.

З графіків автокореляційних функцій, які практично збігаються, видно, що при σ_{x_3} =1 крок дискретизації для контрольованих параметрів P(t), v(t), n(t), N(t) знаходиться в межах Δt=16÷22 с, при

$$\sigma_{x_2} = 0.75 - \Delta t = (7\div12)\text{ с};$$

$$\sigma_{x_1} = 0.5 - \Delta t = (3\div5)\text{ с}.$$

Тобто для забезпечення ефективної роботи пристрою контролю показників працездатності долота достатньо, щоб крок дискретизації не перевищував (16÷22) с.



ряд 1 – $R_{NN}(\tau)$; ряд 2 – $R_{vv}(\tau)$; ряд 3 – $R_{PP}(\tau)$; ряд 3 – $R_{nn}(\tau)$.

Рис. 1. Графіки нормованих автокореляційних функцій.

Але треба враховувати і той факт, що при Δt=const вимірювання механічної швидкості v(t) приводить до відносної похибки вимірювання, що залежить від нерівномірності подачі бурильного інструменту з гальма лебідки. Вперше на цей факт звернули увагу автори статті [2]. Дійсно, проходка вимірюється за переміщенням верхнього кінця бурильної колони і носить неперервно-дискретний характер, викликаний особливістю ручної подачі бурильного інструменту – циклічністю. Повний цикл подачі складається з розгальмування барабана бурової лебідки і подальшого гальмування.

Як видно із графіків (рис. 2) зміни в часі подачі інструмента h(t) і осьового навантаження на долото P(t) при ручному керуванні, тривалість циклу є змінною і складається з переміщення чергової подачі δt_i і переміщення δh_i за час Δt_i вільного розвантаження бурильного інструменту, що викликано деформацією талевого канату при зміні осьового навантаження на величину ΔP_i.

При такому характері переміщення бурильного інструменту середня механічна швидкість проходки $\bar{v}_м(t)$ за час Δt становить

$$v_м(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta h_i + \delta h_i)}{\sum_{i=1}^{n}(\Delta t_i + \delta t_i)} = \frac{\Delta H}{\Delta T}, \qquad (11)$$

де $\Delta H = \sum_{i=1}^{n}(\Delta h_1 + \delta h_i)$ - приріст подачі за крок дискретизації ΔT; $\Delta T = \sum_{i=1}^{n}(\Delta t_i + \delta t_i) - \sum_{i=1}^{n}\tau_f^{(i)}$ - крок дискретизації; $\tau_f^{(i)}$ - час між двома черговими подачами інструменту.

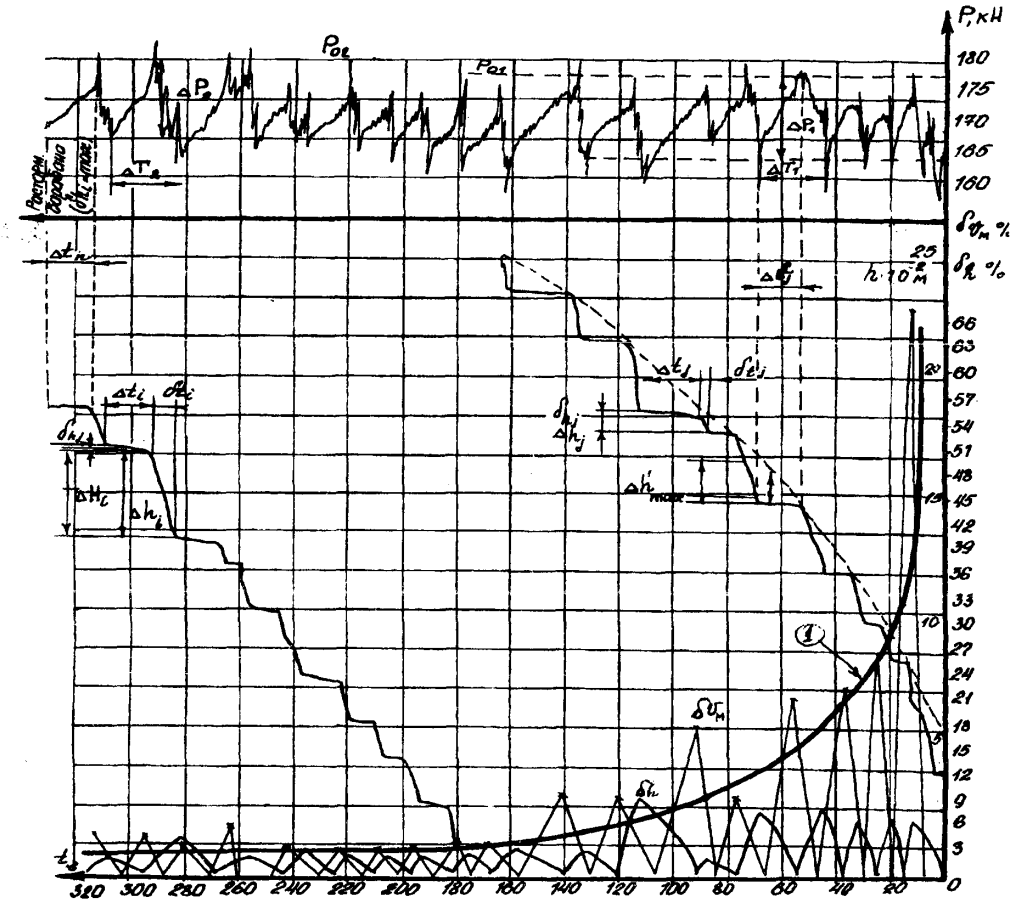


Рис. 2. Приклади синхронізованих записів навантаження на долото (1) P, і подачі бурового інструменту (бурова №281 Крестищенського УБР ВО "Укрбургаз", установка Уралмаш – 4Э, інтервал буріння 3128-3138 м, долото 215,9 СГВА, порода – піщаник, густина бурового розчину 1.27 г/см^3, n=60 хв$^{-1}$).

Наші дослідження підтверджують, що максимальна похибка вимірювання механічної швидкості спостерігається при співпадінні кроку дискретизації $\Delta T_{вим}$ з закінченням чергової подачі бурильного інструменту, тобто коли

$$\Delta T_{вим} = \sum_{i=1}^{n}(\Delta t_i + \delta t_i) - \Delta t_n = \Delta T - t_n . \qquad (12)$$

Тоді виміряне значення проходки

$$\Delta H_{вим} = \sum_{i=1}^{n}(\Delta h_1 + \delta h_i) - \delta h_n = \Delta H - \delta H_n , \qquad (13)$$

і механічної швидкості

$$[v_м(t)]_{вим} = \frac{\Delta H_{вим}}{\Delta T_{вим}} = \frac{\Delta H - \delta h_n}{\Delta T - \delta t_n} . \qquad (14)$$

З рівнянь (13) і (14) маємо вирази для оцінок абсолютної

$$\Delta v_м = \frac{\Delta H \Delta t_n - \Delta T \delta h_n}{\Delta T(\Delta T - \Delta t_n)} \qquad (15)$$

і відносної

$$\delta_{v_м} = \frac{\Delta v_м(t)}{v_м} \cdot 100\% = \left[\frac{\Delta t_n}{\Delta T - \Delta t_n} - \frac{\delta h_n}{\Delta H\left(1 - \frac{\Delta t_n}{\Delta T}\right)} \right] \cdot 100\% \qquad (16)$$

похибок вимірювання механічної швидкості.

На рис. 3 приведені графіки залежностей відносних похибок вимірювання механічної швидкості проходки δh і максимальної відносної похибки від величини кроку дискретизації ΔT (крива 1), що побудовані на основі діаграм P(t) і h(t), приведених на цьому ж рисунку.

Видно, що похибка $\delta_{v_м}$ вимірювання механічної швидкості змінюється циклічно і в моменти чергових подач досягає мінімуму.

Максимальна відносна похибка (крива 1) також зменшується зі збільшенням кількості подач за законом гіперболи.

$$\left(\Delta_{відн v_м}\right)_{max} = \left(\alpha_p + \beta_p \Delta t\right)^{-1}, \quad (17)$$

де α_p - коефіцієнт, що залежить від швидкості зростання навантаження на долото; β_p - коефіцієнт, що залежить від відношення швидкості зростання осьового навантаження до швидкості вільного розвантаження інструменту.

Враховуючи це, можна стверджувати, що мінімальне значення похибки вимірювання механічної швидкості без зменшення частоти опитування давачів можна отримати вимірюючи $v_м(t)$ в моменти чергових подач бурильного інструменту.

Якщо крок дискретизації вибрати постійним, то значення відносної похибки $\delta_{v_м} \approx 5\%$ можна досягти при кількості подач n=8, чому відповідає $\Delta T \approx 160$ с. Це веде до зменшення відносної похибки вимірювання (крива 1) до 3%. Але внаслідок зменшення кількості вимірювань при цьому збільшується випадкова складова похибки вимірювань визначається за рівнянням Стьюдента.

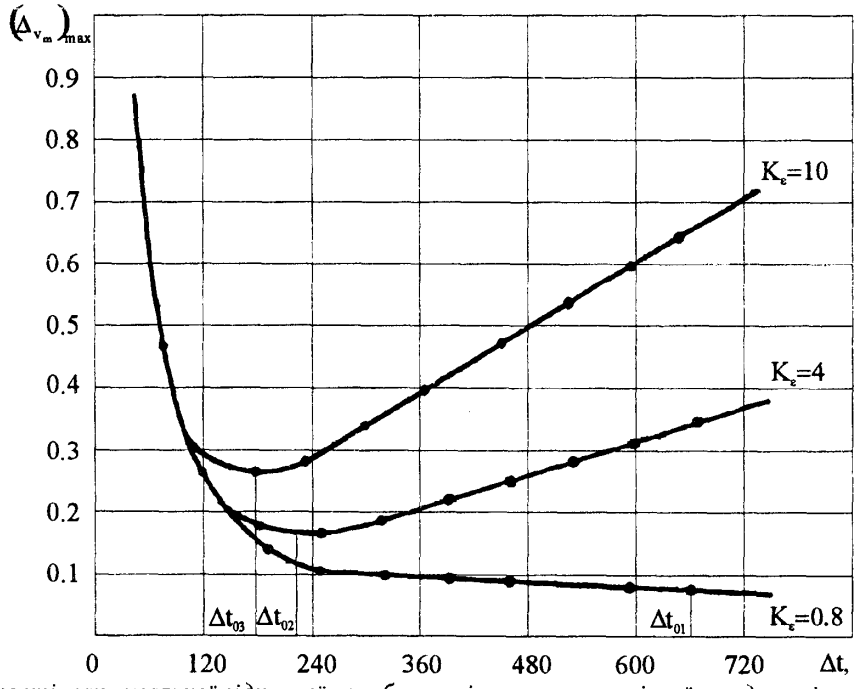


Рис. 3. Залежності максимальної відносної похибки вимірювання механічної швидкості проходки $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max}$ *від кроку дискретизації* Δt *при різних значеннях швидкості зміни оцінки відносного зношення оснащення долота* $K_ε$ ($\alpha_p = 0.36$; $\beta_p = 180 год^{-1}$).

Дискретний метод вимірювання проходки приводить до додаткової динамічної похибки $\Delta_{\partial v_м}$ внаслідок усереднення механічної швидкості на інтервалі часу Δt [3].

При бурінні в ізотропних породах з P=const, n=const, Q=const динамічну похибку $\Delta_{\partial v_м}$ можна визначити як різницю між механічною швидкістю $v_м(t_{i+1})$ в момент часу t_{i+1} і її середнім значенням $\bar{v}_м(t)$

$$\Delta_{\partial v_м} = \left| v_м(t_{i+1}) - \bar{v}_м(t) \right|, \quad t \in \Delta t. \quad (18)$$

Величина $\bar{v}_м(t)$ на інтервалі усереднення Δt в момент часу t_{i+1} дорівнює

$$\bar{v}_м(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_{i+1}} v_м(t)dt. \quad (19)$$

Для представлення механічної швидкості $v_м(t)$ в аналітичному вигляді була прийнята гіпотеза, що $v_м(t)$ зменшується в часі за гіперболічним законом

$$v_м(t) = v_0(1 + K_ε t)^{-1}. \quad (20)$$

Адекватність цієї моделі підтверджена дисперсійним аналізом, проведеним різними авторами [2].

З врахуванням (20) одержимо

$$\bar{v}_м(t) = \frac{v_0}{\Delta t K_ε} ln \frac{1 + K_ε t_{i+1}}{1 + K_ε t_i}. \quad (21)$$

Після підстановки (20), (19) в (18) маємо

$$\Delta_{\partial v_м} = v_0 \left(\frac{1}{1 + K_ε t_{i+1}} - \frac{1}{\Delta t K_ε} ln \frac{1 + K_ε t_{i+1}}{1 + K_ε t_i} \right). \quad (22)$$

Використовуючи (22), визначимо відносну динамічну похибку $\left(\Delta_{\partial v_м}\right)_{відн}$ вимірювання

механічної швидкості

$$\left(\Delta_{\partial v_м}\right)_{відн} = \frac{\Delta_{\partial v_м}}{v_м(t_{i+1})} = 1 - \frac{1+K_\varepsilon t_{i+1}}{\Delta t K_\varepsilon} ln \frac{1+K_\varepsilon t_{i+1}}{1+K_\varepsilon t_i} \quad (23)$$

або з врахуванням того, що $t_i = t_{i+1} - \Delta t$ одержимо

$$\left(\Delta_{\partial v_м}\right)_{відн} = 1 + \frac{1+K_\varepsilon t_{i+1}}{\Delta t K_\varepsilon} ln\left(1 - \frac{K_\varepsilon \Delta t}{1+K_\varepsilon t_{i+1}}\right). \quad (24)$$

З формули (24) видно, що відносна динамічна похибка вимірювання механічної швидкості залежить від швидкості зміни оцінки відносного зношення K_ε оснащення долота і моменту відліку, причому, зі збільшенням K_ε вона збільшується, а зі збільшенням t_{i+1} – зменшується.

Максимальну відносну динамічну похибку $\left(\Delta_{\partial v_м}\right)_{відн\ max}$ визначимо, враховуючи особливості вимірювання $\bar{v}_м(t)$.

$$\left(\Delta_{\partial v_м}\right)_{відн\ max} = \left(\Delta_{\partial v_м}\right)_{відн}\Big|_{t_{i+1}-\Delta t} = 1 + \frac{1+K_\varepsilon \Delta t}{\Delta t K_\varepsilon} ln\left(1 - \frac{K_\varepsilon \Delta t}{1+K_\varepsilon \Delta t}\right). \quad (25)$$

Враховуючи (17), (25) і використовуючи правило додавання похибок, можна підрахувати максимальну відносну похибку вимірювання механічної швидкості проходки

$$\left(\Delta_{v_м}\right)_{max} = \sqrt{\left(\alpha_p + \beta_p \Delta t\right)^2 + \left[1 + \frac{1+K_\varepsilon \Delta t}{\Delta t K_\varepsilon} ln\left(1 - \frac{K_\varepsilon \Delta t}{1+K_\varepsilon \Delta t}\right)\right]^2}. \quad (26)$$

Користуючись рівнянням (26) можна проаналізувати залежність $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max}$ від кроку дискретизації Δt, побудувавши графіки цих залежностей при різних значеннях K_ε. З графіків залежностей (рис.3) максимальної відносної похибки вимірювання механічної швидкості проходки $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max}$ від кроку дискретизації Δt при постійних значеннях K_ε і $\alpha_p = 0.36$; $\beta_p = 180\,год^{-1}$ видно, що із збільшенням K_ε похибка $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max}$ збільшується, але існує такий крок дискретизації Δt_0, при якому $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max}$ мінімальне.

Мінімальне значення $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max}$ досягається лише при малих значеннях швидкості зміни оцінки відносного зношення долота $K_\varepsilon \le 0.2$ год$^{-1}$ і тільки за рахунок збільшення кроку дискретизації Δt_{01} до 660 с. Але і в цьому випадку $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max} \ge 5\%$.

Із збільшенням показника K_ε зменшується значення кроку дискретизації Δt_0, але одночасно збільшується і похибка вимірювання механічної швидкості проходки $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max}$. Наприклад, при K_ε=4.0 Δt_{02}=200 с і $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max} \approx$ 15%, а при K_ε=10 Δt_{03}=150 с і $\left(\Delta_{v_м}\right)_{max} \approx 25\%$.

Зменшити відносну похибку вимірювання механічної швидкості проходки можна шляхом вибору адаптивного кроку дискретизації [3] механічної швидкості проходки $v_м(t)$ і визначення приросту проходки Δh в моменти гальмування барабана бурової лебідки.

В цьому випадку досягається зменшення відносної похибки від нерівномірності подачі бурильного інструменту $\Delta_{відн\ v_м}$ практично до нуля (рис. 2) і сумарна відносна похибка стає рівною відносній динамічній похибці вимірювання

$$\left(\Delta_{v_м}\right)_{max} = \left(\Delta_{\partial v_м}\right)_{відн\ max}. \quad (27)$$

Це дає можливість зробити висновок, що оптимальним, з точки зору мінімуму систематичної похибки вимірювання механічної швидкості проходки, є крок дискретизації проходки, що дорівнює часу між двома черговими подачами бурильного інструменту.

Якщо проаналізувати експериментальні дані, то видно, що цей час коливається в межах 10-30 с (рис. 2).

Крок дискретизації визначається за допомогою оцінок автокореляційних функцій і становить 16-22 с. Тобто, якщо вибрати крок дискретизації таким, що дорівнює часу між двома черговими подачами інструменту, то він може задовольнити і вимоги точності вимірювання інших параметрів – P(t), n(t), N(t).

1. Чигур І. І. Алгоритм автоматизованого контролю відпрацювання доліт при бурінні свердловин. - Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1998. - № 35 – С. 32-41. 2. Семенцов Г. Н., Шаповал А.А. Аналитические и промысловые исследования влияния шага дискретизации проходки на погрешность измерения механической скорости бурения. РНТС. Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности, 1974, № 10, - С. 11-15. 3. А. С. 746091 СССР МКИ Е 21 В 45/00 Устройство для измерения механической скорости проходки скважин / Г.Н. Семенцов, А.А. Шаповал, М.И. Горбийчук // Открытия. Изобретения. – 1980. - № 25. – С. 162. 4. Палагушкин В. А. Автоматизация производственных процессов. Уф-ий нефтяной институт, 1976.