

## ПРОХОДКА ПОРОДОРУЙНІВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ЗА ОБЕРТ ЯК КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ БУРОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

О.А. Шаповал

Івано-Франківський університет права імені Короля Данила Галицького,  
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Євгена Коновальця, 35, e-mail: inst.doktor@gmail.com

Проведено аналіз критеріїв оптимізації технологічного режиму проходки свердловин. Показано, що одним із критеріїв, за яким задаються параметри режиму буріння, є величина оптимального заглиблення породоруйнівного інструменту за оберт, яка є комплексним показником, що характеризує ефективність руйнування буримої породи під дією осевого навантаження і частоти обертання. В більшості випадків величина заглиблення породоруйнівного інструменту за оберт визначається відношенням механічної швидкості до частоти його обертання. При цьому значення механічної швидкості проходки і частоти обертання бурового інструменту визначаються диференціюванням. Тому величина заглиблення за оберт визначається із суттєвими похибками. Для зменшення похибок визначення величину заглиблення за оберт доцільно визначати як відношення приросту проходки до числа обертів бурового снаряду за часовий інтервал, протягом якого досягнуто приріст проходки. Розроблений автором пристрій визначення величини поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт, принцип роботи якого заснований на використанні інтегральних характеристик збільшення проходки і числа обертів бурового снаряду на певному часовому інтервалі, дає можливість істотно зменшити мультиплікативні похибки за рахунок усунення проміжного диференціювання.

Ключові слова: свердловина, проходка, буримість, критерій оптимізації, інтегральні характеристики, мультиплікативні похибки, пристрій контролю проходки за оберт.

Проведен анализ критериев оптимизации технологического режима проходки скважин. Показано, что одним из критериев, по которым задаются параметры режима бурения, является величина оптимального углубления породоразрушающего инструмента за оборот, который является комплексным показателем, характеризующим эффективность разрушения буримой породы под действием осевой нагрузки и частоты вращения. При этом значение механической скорости проходки и частоты вращения бурового инструмента определяются дифференцированием. Поэтому величина углубления породоразрушающего инструмента за оборот определяется с существенными погрешностями. Для уменьшения погрешностей контроля, величину углубки за оборот целесообразно определять как отношение прироста проходки к числу оборотов бурового инструмента за временной интервал, в течение которого достигнут прирост проходки. Разработанное автором устройство определения величины углубления породоразрушающего инструмента за оборот, принцип работы которого основан на использовании интегральных характеристик увеличения проходки и числа оборотов за определенный временной интервал, дает возможность существенно уменьшить мультипликативные погрешности за счет устранения промежуточного дифференцирования.

Ключевые слова: скважина, проходка, буримость, критерий оптимизации, интегральные характеристики, мультипликативные погрешности, устройство контроля проходки за оборот.

The analysis of the optimization criteria of technological regime sinking wells. It is shown that one of the criteria on which the drilling parameters are set, is the optimal value of the deepening of rock cutting tool per revolution, which is a comprehensive indicator of the effectiveness of drilled rock fracture under the action of axial load and rotational speed. The value of the ROP and the speed of drilling tools are determined by differentiation. Therefore, the value of deepening rock cutting tool per revolution is determined with significant errors. To reduce the error control, the magnitude of the turnover ugлубki advisable to define as the ratio of rate of penetration to the number of revolutions of drilling tools for the time interval during which achieved an increase of penetration. The developed device is the author of determining the value of deepening the rock cutting tool per revolution, the principle of operation is based on the use of the integral characteristics of penetration and increase the number of revolutions over a given time interval makes it possible to substantially reduce the multiplicative error due to elimination of intermediate differentiation.

Key words: well, excavation, drillability, optimization criterion, the integral characteristics, the multiplicative error, control device of penetration per revolution.

Сучасний етап підвищення ефективності бурових робіт вимагає створення точних, надійних та економічних вимірювальних пристроїв як для контролю режимних параметрів, так і для одержання інформації про фізико-механічні властивості гірської породи безпосередньо в процесі поглиблення свердловини. Такі вимірювальні пристрої повинні забезпечувати визначення розмежування пластів буримих порід за їх станом безпосередньо в процесі буріння. Процес проходки свердловини безперервно су-

проводжується змінами гірничо-технологічних умов на вибої та зміною стану породоруйнівного інструменту. Для здійснення керування технологічним процесом буріння та визначення оптимальних режимів проходки свердловин необхідна достовірна інформація як про режими проходки, так і про стан буримої породи. Тільки за наявності достовірної поточної інформації можливе оптимальне оперативне керування технологічним процесом буріння. При цьому оцінку ефективності керуючих впливів

здійснюються за різними критеріями. Однак, як відзначають дослідники [2, 5, 7], вибір критерію впливає на результати оптимізації менше, ніж помилки і похибки у визначенні критеріїв та оптимальних режимів буріння за будь-яким вибраним критерієм.

Сучасні пристрої систем регулювання та оптимізації технологічного процесу буріння базуються, в основному, на підтриманні постійної механічної швидкості проходки. Одним із критеріїв, за яким задаються параметри режиму буріння, є величина оптимального поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт, яка є комплексним показником, що характеризує ефективність руйнування буримої породи під дією осьового навантаження і частоти обертання. Дана величина є показником, який дає змогу одночасно оцінити фізичні процеси, що відбуваються на вибої, та роботу бурової коронки під впливом осьового навантаження, частоти обертання, а також залежно від фізико-механічних властивостей буримої породи. Тому дана величина використовується для оптимізації технологічного процесу буріння [2, 5, 7]. Технологія буріння із оптимальною величиною поглиблення коронки за оберт забезпечує задану механічну швидкість, за мінімальної витрати алмазів та зниження вартості одного метра буріння [2]. Згідно з методичними рекомендаціями до технології високообертового алмазного буріння [6] питома витрата алмазів може бути знижена, якщо поглиблення за оберт не перевищує величини допустимого робочого виступу алмазів з тіла матриці коронки. В процесі буріння твердих порід це складає до десяти відсотків від середнього діаметра об'ємних алмазів. При середньому умовному діаметрі зерна об'ємних алмазів від 0,6-мм величина допустимого робочого виступу алмазів з тіла матриці може бути в межах від 0,06-мм до 0,18-мм. Величина оптимального поглиблення коронки за оберт обмежується мінімальним значенням, нижче якого відбувається заповнення алмазів, та максимальним значенням, при перевищенні якого відбувається аномальне зношування породоруйнівного інструменту [3].

В існуючих вимірjuвальних системах поглиблення бурової коронки за оберт визначається відношенням механічної швидкості до частоти обертання бурового пристрою. Такий метод визначення приводить до суттєвих похибок, що погіршує вибір оптимальних режимних параметрів. Використання пристроїв, які як критерій оптимізації процесу буріння реалізують механічну швидкість, призводить до суттєвих похибок і погіршення інших техніко-економічних показників буріння [7].

Значення оптимального поглиблення за оберт визначається з конкретних геолого-технологічних умов буріння. Однак при визначенні оптимального поглиблення за оберт найбільш складним питанням є оцінка конкретних гірничо-технологічних умов на вибої та, зокрема, буримості гірської породи. Буримість гірських порід при конкретному способі їх руйнування, а також стану технічних засобів і техно-

логії, характеризує механічну швидкість проходки свердловини. Однак вона суттєво залежить від фізико-механічних властивостей гірських порід та їх стану в масиві. Так, буримість монолітних порід з однаковим мінералогічним складом, але з різною зернистістю, є різною. У дрібнозернистих породах буримість нижча, ніж у крупнозернистих. Тверді тріщинуваті гірські породи, залежно від ступеня їх тріщинуватості, характеризуються нижчою буримістю, ніж монолітні. Крім того, в тріщинуватих породах може відбуватися поглинання промивальної рідини або водопрояви, що також негативно впливає на режим буріння та знижує механічну швидкість. Водночас, буримість також є комплексним показником фізико-механічних властивостей гірської породи, визначальним фактором якої є її міцність.

Царіцин В.В. [8], розглядаючи фактори, що впливають на швидкість буріння одношаровим алмазним інструментом, рекомендує проводити вибір початкового осьового навантаження з урахуванням поглиблення бурового інструменту за один його оберт  $h_0$ . При цьому визначення даного показника рекомендується визначати як відношення середньої швидкості буріння  $V_{сер}$  до частоти обертання  $n$  бурового інструменту:

$$h_0 = V_{сер}/n. \quad (1)$$

Так як поглиблення  $h_0$  прямо пропорційне середньому обсягу зруйнованої породи за одиничний акт впливу зубців долота з вибоєм, то середнє поглиблення долота за оберт рекомендується використовувати як показник ефективності одиничних актів взаємодії озброєння долота з породою [4].

Виходячи з функціональної залежності проходки за оберт  $h_0$  від осьового навантаження і твердості породи для породоруйнівного інструменту ріжучого типу [8], визначимо вираз для міцності  $p$  буримої породи:

$$p = \frac{F_0 \cdot \eta}{h_0 \cdot b \cdot tg\beta}, \quad (2)$$

де  $F_0$  – осьове навантаження, що передається на різець бурової коронки, Н;

$\eta$  – коефіцієнт впливу сил тертя ( $\eta < 1$ );

$h_0$  – проходка породоруйнівного інструменту за оберт, 1/м;

$b$  – довжина різця, мм;

$\beta$  – кут загострення різця (приймається  $\beta \approx 45...50^\circ$ ).

Даний показник при обертовому бурінні алмазними коронками характеризує об'ємне руйнування породи, тому його можна прийняти за динамічну міцність. Приймавши осьове навантаження  $F_0$  як відношення осьового навантаження  $F$  на коронку до середньої довжини кола коронки:

$$l_{сер} = \pi(d_{зовн} - d_{внутр})/2, \quad (3)$$

а еквівалентною довжиною різця – ширину матриці коронки,  $b = (d_{зовн} - d_{внутр})/2$ , одержимо:

$$p = \frac{F \cdot \eta}{h_0 \cdot S_k \cdot tg\beta}, \quad (4)$$

де  $S_k = \pi(d_{зовн}^2 - d_{внутр}^2)/4$  – площа торця коронки, мм<sup>2</sup>;

$d_{зовн}$  та  $d_{внутр}$  – відповідно зовнішній та внутрішній діаметри коронки, мм.

Таким чином, використовуючи пристрої вимірювання осьового навантаження та проходки за оберт, можна визначати динамічну міцність буримої гірської породи.

Дослідники [2] за залежністю поглиблення за оберт від питомого навантаження на долото оцінюють буримість гірських порід та ефективність процесу очищення і руйнування вибою. Фактично через показник поглиблення за оберт дослідники [4] оцінюють буримість породи FPSF зі співвідношення:  $FPSF = W n/R$ , де  $W$  – осьове навантаження на долото;  $n$  – частота обертання;  $R$  – швидкість буріння.

В ряді робіт поглиблення свердловини за один оберт використовується для оцінки ефективності руйнування гірської породи. Для шарошkových доліт поглиблення свердловини за один оберт рекомендується визначати як  $h_0 = \Delta h/N$ , де  $N$  – кількість обертів долота, необхідних для поглиблення свердловини на величину руйнування  $\Delta h$  породи зубцями шарошок. Якщо механічну швидкість буріння шарошковими долотами подати як залежність  $v_m = (v_z \cdot z_d / s_c) \cdot n_{ш}$ , де  $v_z$  – середній об'єм зруйнованої породи, який припадає на одиничний акт дії озброєння долота на породу;  $s_c$  – площа поперечного перерізу свердловини;  $z_d$  – кількість зубців долота;  $n_{ш}$  – середня швидкість обертання шарошок:  $n_{ш} = i_d \cdot n$ , де  $i_d$  – середнє значення передатного числа долота;  $n$  – частота обертання долота, то механічна швидкість буріння визначатиметься як  $v_m = (v_z \cdot z_d \cdot i_d / s_c) n$ , враховуючи, що  $v_m = h_0 \cdot n$ ,  $h_0 = v_z \cdot z_d \cdot i_d / s_c$ .

Як впливає з проведеного огляду, величина поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт визначається відношенням механічної швидкості до частоти його обертання. При цьому значення механічної швидкості проходки і частоти обертання бурового снаряда визначаються диференціюванням. Тому величина поглиблення за оберт визначається із суттєвими похибками.

Для зменшення похибок визначення величину поглиблення за оберт  $h_0$  доцільно визначати як відношення приросту проходки  $\Delta h$  до числа обертів бурового снаряду  $N$  за часовий інтервал, протягом якого досягнуто приріст проходки:

$$h_0 = \Delta h / N. \quad (5)$$

Одним з найбільш важливих напрямків підвищення ефективності буріння є автоматизація технологічних процесів проходки свердловини. Регулювання режимами буріння та оперативне керування ними є найбільш прогресивним напрямком реалізації заходів щодо вдосконалення технологічного процесу. З метою встановлення ефективних значень режимних параметрів безпосередньо в процесі буріння розробляються системи керування, регулювання та оптимізації. Для здійснення керування технологічним процесом буріння та вибором оптимальних режимів проходки свердловин, необхідна достовірна інформація як про режими проходки, так і про стан буримої породи.

Тільки за наявності достовірної поточної інформації можливе оптимальне оперативне керування технологічним процесом буріння. Буримість гірських порід при конкретному способі їх руйнування, а також стан технічних засобів і технології характеризує механічна швидкість проходки свердловини. Проте вона суттєво залежить від фізико-механічних властивостей гірських порід та їх стану в масиві. Поряд з цим буримість також є комплексним показником фізико-механічних властивостей гірської породи.

При цьому параметри режиму буріння задаються, виходячи з величини оптимального поглиблення коронки за оберт, яке можна виразити комплексним показником, що характеризує ефективність руйнування буримої породи під впливом осьового навантаження і частоти обертання. Оптимальне поглиблення за оберт визначається, виходячи з конкретних геолого-технічних умов буріння.

Нами розроблено пристрій для визначення величини поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт з меншими похибками. Функціональна схема пристрою зображена на рисунку 1.

Розробка функціональної та принципової схем пристрою проводилась для таких умов:

1. Первинні датчики числа обертів і приросту проходки повинні бути безконтактними.
2. Джерела живлення забезпечують напруги +12 В та -12 В.
3. Вихідний сигнал пристрою повинен бути аналоговий напругою від 0 до 10 В.
4. Хід шпинделя бурового верстата становить 600-мм.
5. Один оберт вихідного вала вимірювальної рейки відповідає 60-мм переміщення шпинделя (проходки).
6. Частота обертання бурильної колони змінюється в межах від 120 хв<sup>-1</sup> до 1500 хв<sup>-1</sup>.
7. З'єднання монтажної плати роз'ємом СНП58-64/94х9В-23-2.
8. Розмір монтажної плати – 120х130-мм.

Пристрій містить: індуктивний датчик проходки Д1, підключений через компаратор К1 до блоку керування БК; датчик числа обертів Д2, підключений через компаратор К2 до лічильника імпульсів ЛПЧ; ділильний блок ДБ, перший вхід якого приєднаний до задавача проходки ЗП а другий – через цифрово-аналоговий перетворювач ЦАП і запам'ятовувачий елемент ЗЕ до виходу лічильника ЛПЧ.

Пристрій працює так. У вихідному положенні, після досягнення датчиком збільшення проходки Д1 нульового значення, блок керування БК встановлює лічильник імпульсів ЛПЧ в нульовий стан і відкриває рахунковий вхід. Від датчика числа обертів Д2 надходять імпульси, що відповідають кожному обертуну породоруйнівного інструменту, які перетворюються лічильником ЛПЧ у цифровий код.

Після переміщення породоруйнівного інструменту на величину приросту проходки  $\Delta h$ , з датчика Д1 через компаратор К1 до входу блоку керування БК надходить імпульс. При

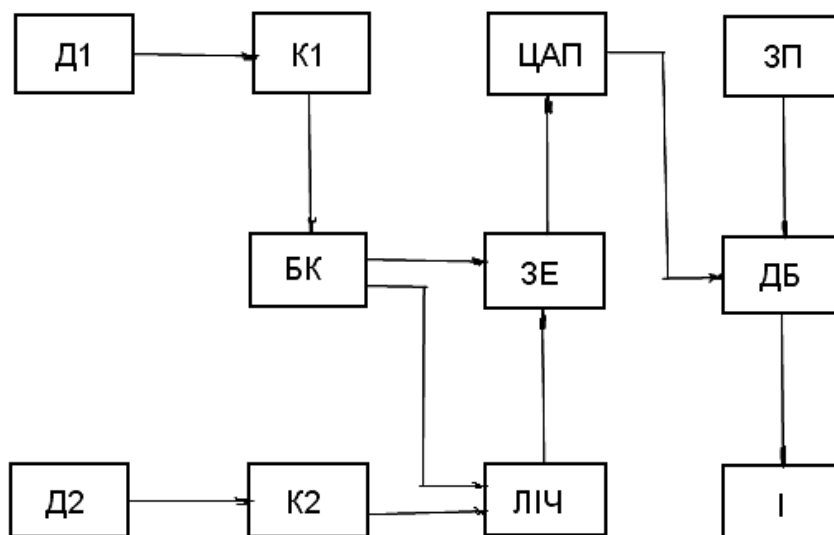


Рисунок 1 – Функціональна схема перетворювального блоку визначення величини поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт

цьому блок керування формує два послідовні короткочасні імпульси, перший з яких відкриває входи запам'ятовуючого елемента ЗЕ. При цьому останній запам'ятовує закодоване лічильником число обертів породоруйнівного інструменту. Другий короткочасний імпульс встановлює лічильник ЛІЧ у нульовий стан, і відбувається черговий підрахунок числа обертів.

Закодоване попереднє значення числа обертів перетворюється цифро-аналоговим перетворювачем ЦАП на постійну напругу, яка подається на другий вхід ділильного блоку ДБ. Від задавача ЗП напруга, пропорційна збільшенню проходки  $\Delta h$ , подається на перший вхід ділильного блоку ДБ. В результаті поділу напруга на виході ділильного блоку ДБ пропорційна проходці або поглибленню породоруйнівного інструменту за один оберт. Після досягнення датчиком Д1 подальшого збільшення проходки  $\Delta h$  процес визначення повторюється, і відбувається черговий цикл перетворення. Інтервал вимірювання величини поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт складає від 0,02-мм до 0,30-мм.

Розроблений пристрій визначення величини поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт, принцип роботи якого заснований на використанні інтегральних характеристик збільшення проходки і числа обертів бурового снаряда на певному часовому інтервалі, дає можливість істотно зменшити мультиплікативні похибки за рахунок усунення проміжного диференціювання. При цьому оптимальне значення поглиблення за оберт визначається в залежності від конкретних геолого-технічних умов буріння.

Первинні перетворювачі датчиків приросту проходки і числа обертів бурового вала є ідентичними, і виконані у вигляді безконтактних перемикачів індуктивного типу. Конструктивно перетворювачі виконані в циліндричному

корпусі, в якому розміщений генератор, підсилювач і чутливий елемент. Генератор і підсилювач зібрані на одній друкованій платі. У торці корпусу розташований чутливий елемент, що має вигляд відкритої феритової чашки з котушкою індуктивності. Принцип дії датчиків заснований на зриві генерації синусоїдальних коливань у коливальному контурі генератора з наближенням до чутливого елемента металевого елемента, який відбувається в результаті відбору електромагнітної енергії з коливального контуру генератора.

Технічні параметри індуктивного перетворювача:

1. Зона чутливості, 0...4мм.
2. Частота включень, не більше 1000Гц.
3. Амплітуда вихідного сигналу, 22В (при живленні 24 В).
4. Напруга живлення, 12...27В.
5. Струм навантаження, не більше 100мА.
6. Вид струму живлення, постійний.
7. Залишкова напруга, не більше 1,8В.

Принципова схема перетворювального блоку зображена на рисунку 2.

Перетворювальний блок працює таким чином. Вихідний сигнал індуктивних перетворювачів напругою 22·В ділиться дільниками R3-R5 та R10-R12 навпіл для забезпечення нормальної роботи компараторів, зібраних на мікросхемах DA1.1 та DA1.2. Зміна вихідного сигналу індуктивних перетворювачів після дільників може відбуватися в межах від 5·В до 10·В в залежності від напруги живлення. З метою нормування, вихідний сигнал індуктивних перетворювачів подається на компаратори DA1.1 та DA1.2.

У зв'язку з порівняно повільною зміною вихідного сигналу датчиків, у принциповій схемі компараторів використана схема порівняння з додатним зворотним зв'язком, визначальною особливістю якого є гістерезис передавальної характеристики. В компараторах, за

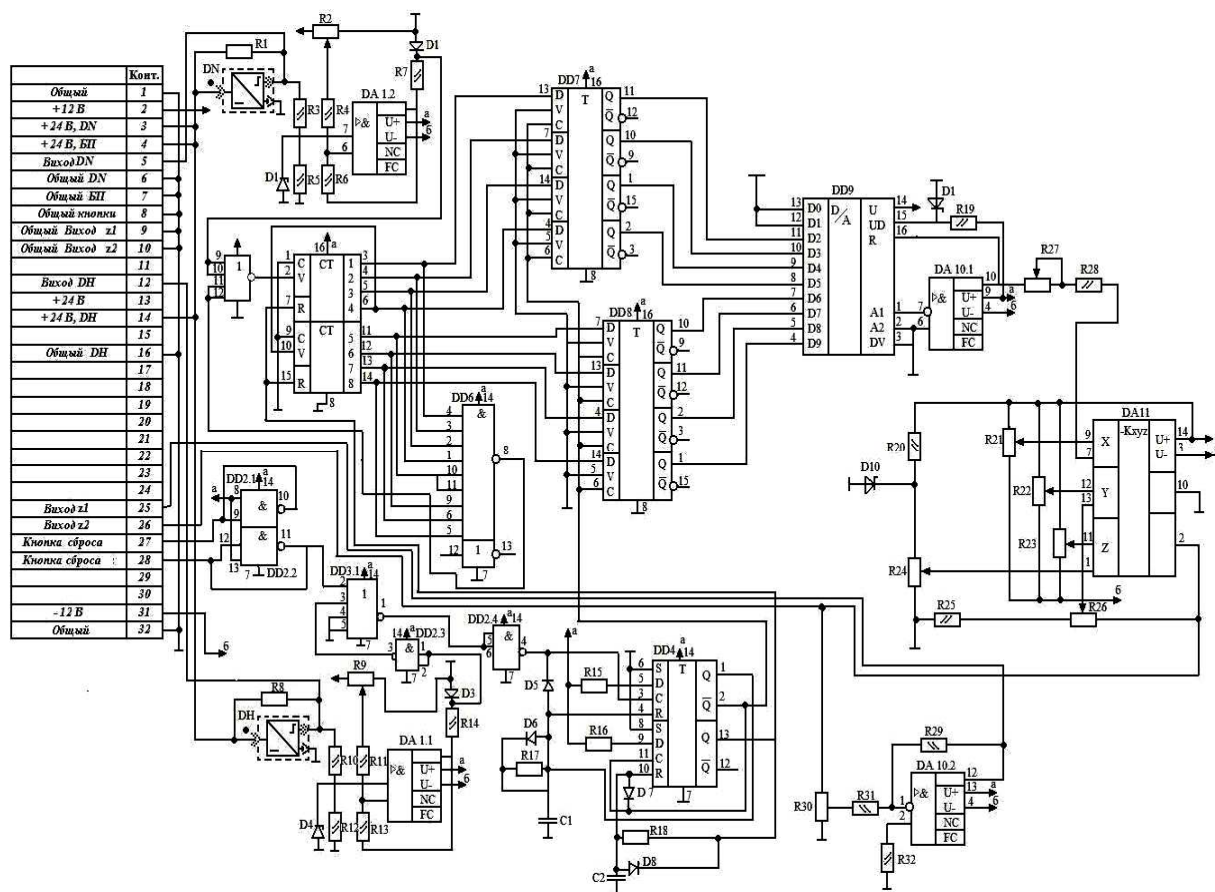


Рисунок 2 – Принципова схема пристрою вимірювання проходки за оберт

близької до нуля вхідної напруги, вихідна напруга додатна, а напруга на неінвертуючому вході визначає верхній поріг перемикавання:

$$U_6 = U_{cm} R_4 / (R_4 + R_6) = U_{cm} R_{11} / (R_{11} + R_{13}), \quad (6)$$

де  $U_{cm}$  – напруга стабілізації стабілітронів D1 та D3.

З досягненням вхідною напругою величини  $U_6$ , струм у ланцюзі стабілітрона змінює напрям, і рівень вихідної напруги операційного підсилювача (ОП) DA1.1 та DA1.2 перемикається в стан, протилежний вихідному. Після перемикавання, на неінвертуючому вході ОП встановлюється напруга, що відповідає нижньому порогу перемикавання  $U_n = -U_6$ . Для зворотного перемикавання компаратора амплітуда вихідної напруги повинна змінитися від  $U_n$  до  $U_6$ , тобто на напругу  $2U_6$ , яка визначає величину гістерезису.

В даному компараторі шуми та нестабільність вхідного сигналу не викликають коливань вихідної напруги поблизу точки порівняння. Використовуючи на виході компараторів стабілітрони D2 та D4 типу Д818, досягнуто рівень вихідної напруги близький до 8,5 В, що забезпечує надійну і стабільну роботу інших елементів схеми, виконаних за КМОП технологією.

Вихідний сигнал компаратора DA1.2 подається на рахунковий вхід двійкового лічильника DD5 типу К561ІЕ10. Лічильник містить два синхронні двійкові лічильники-дільники. Кожний лічильник виконаний на чотирьох D-три-

герах. Лінії С і V (тактова та дозволу тактів) взаємозамінні, лише відрізняються протилежними активними рівнями. Це дає змогу організувати рахунок за кожним фронтом такту: за додатним і від'ємним.

Схема лічильника виконана двокаскадною з роботою в асинхронному режимі. Компаратор DA1.2 інвертує вихідний сигнал датчика D2, тому рахунок організований за від'ємним фронтом вихідного сигналу компаратора. Для каскадування вихід 4 першого лічильника з'єднаний зі входом V другого. На тактові входи С подається напруга низького рівня з елемента DD6 блоку керування. Виходи лічильника DD5 з'єднані з входами запам'ятовуючого елемента числа обертів буринного вала, виконаного на базі D-тригерів DD7 і DD8 типу К561ТМ3. Мікросхема К561ТМ3 містить чотири D-тригери, кожний з яких має індивідуальний вхід D і два виходи Q та  $\bar{Q}$ . Вхід тактового імпульсу С загальний. Крім того, є спільний вхід перемикача полярності V. Якщо на вході V низький рівень, інформація від входу D з'явиться на виході Q під час низького рівня тактового імпульсу С. Якщо на вході V високий рівень, передача даних відбувається за високого рівня на вході С. Вихідний сигнал компаратора DA1.1 інвертується інвертором DD2.3 і надходить на вхід 3 мікросхеми DD3.1 блоку керування.

Блок керування виконаний на мікросхемах DD2, DD3, DD4, DD6 і працює так. У вихідно-

му положенні натисканням кнопки КН формується сигнал високого рівня що передається через схему усунення брязкоту, виконану на елементах DD2.1, DD2.2, на вхід 2 логічного елемента АБО-НЕ мікросхеми DD3.1, на виході якого формується при цьому сигнал нульового рівня. Проінвертований до високого рівня інвертором DD2.4, даний сигнал надходить на вхід формувача імпульсу перезапису інформації, який виконаний на мікросхемі типу K561TM2 (DD4). Формувач працює таким чином. За відсутності імпульсу на вході 3 першого тригера, напруга на виході Q1 близька до нуля, тому конденсатор C1 розряджений. З надходженням імпульсу з рівнем логічної одиниці напруга на виході Q1 зростає до такого ж рівня, і конденсатор C1 починає заряджатися через резистор R17. В момент, коли напруга на ньому, а, відповідно, на вході R1 досягає рівня одиниці, тригер перемикається, на виході Q1 знову встановлюється рівень нуля і конденсатор розряджається через той же резистор R17 і діод D6. При встановленні на виході Q1 рівня логічного нуля, з виходу напруга логічної одиниці подається на вхід другого тригера. При цьому напруга на виході Q2 також зростає до рівня логічної одиниці, і конденсатор C2 починає заряджатися через резистор R32. Коли напруга на конденсаторі C2 і, відповідно, на вході R2 досягає рівня логічної одиниці, тригер перемикається, на виході Q2 встановлюється рівень нуля, і конденсатор розряджається через резистор R32 і діод D7. Оскільки скидання лічильника здійснюється через R- вхід сигналом низького рівня, у схемі використаний інвертуючий вихід тригера. Таким чином, на виходах Q<sub>1</sub> і Q2 тригерів DD4 формуються два послідовні короткочасні імпульси логічної одиниці, які забезпечують перезапис інформації з виходів лічильника DD5 на вихід запам'ятовуючих елементів DD7 та DD8 і подальше скидання даних лічильника DD5.

При переміщенні бурильної колони на інтервал проходки  $\Delta h$ , на виході датчика збільшення проходки формується сигнал високого рівня, і спрацьовує компаратор DA1.1. Проінвертований інвертором DD2.3 сигнал високого рівня з виходу компаратора надходить на вхід 3 логічного елемента DD3.1. За допомогою блоку формування імпульсів здійснюється перезапис вихідного коду лічильника на виходи запам'ятовуючого елемента DD7, DD8 і подальше чергове скидання лічильника DD5 в нульовий стан. При переповненні лічильника числа обертів, на інтервалі збільшення проходки  $\Delta h$ , з виходу логічного елемента I схеми співпадання кодів DD6 надходить сигнал високого рівня на вхід C лічильника. При цьому рахунок припиняється до досягнення повного інтервалу збільшення проходки і подальшого скидання лічильника в нульовий стан.

Сигнали з виходів тригерів запам'ятовуючого елемента надходять на кодові входи цифро-аналогового перетворювача DD9, виконаного на мікросхемі K572ПА1 (десятирозрядний ЦАП). Використання в мікросхемі K572ПА1

МОП- транзисторів для реалізації перемикачів, що входять до ЦАП, дозволяє змінювати опорну напругу як за величиною, так і за знаком. Це дає можливість отримати властивості перемножувача опорної напруги та вхідного коду. У мікросхемі використана резисторна сітка, яка живиться безпосередньо від джерела опорної напруги  $U_{on}=8,5\text{ В}$  і виробляє двійково зважені струми, що надходять на МОП- перемикачі. З виходів ЦАП A1 та A2 отримують два струми  $I_1$  та  $I_2$ . Струм  $I_1$  змінюється пропорційно до керуючого коду  $N$ . Струм  $I_2$  – доповнюючий, визначається співвідношенням  $I_2=I_0-I_1$ , де  $I_0$  – максимальне значення струму  $I_1$ . Вихідна напруга ЦАП  $U_{вих}$  знімається з виходу додаткового підсилювача DA10.1, і визначається співвідношенням:

$$U_{вих} = -U_{on} \cdot N / N_{max}, \quad (7)$$

де  $N_{max}$  – максимальне значення керуючого коду.

Визначення поглиблення  $h_0$  породоруйнівного інструменту за оберт здійснюється згідно виразу:

$$h_0 = \Delta h / N, \quad (8)$$

де  $\Delta h$  – приріст проходки;

$N$  – число обертів породоруйнівного інструменту. Величина приросту проходки  $\Delta h$  залежить від кінематики привода і числа прорізів сталевго диска датчика проходки, і встановлюється задавачем проходки, виконаним на елементах DD9, R19, R21.

Число обертів породоруйнівного інструменту визначається лічильником DD5, значенням якого є вихідна напруга цифро-аналогового перетворювача DD9. Сигнали, пропорційні  $\Delta h$  і  $N$ , надходять на входи ділильного блоку, виконаного на інтегральному перемножувачі DA11 типу K525PC2.

Мікросхема K525PC2 є функціонально закінченим пристроєм. Цей перемножувач має три входи X, Y і Z і три входи регулювання зсувів  $X_{зс}$ ,  $Y_{зс}$  і  $Z_{зс}$ . Вихідний сигнал знімається з вбудованого операційного підсилювача. На інвертуючий вхід цього підсилювача через резистори подані сигнали, один з яких дорівнює добутку X·Y, а інший – Z. Послугуючи різним чином входи і вихід перемножувача, можна здійснювати, крім множення, операції ділення, добування квадратного кореня, зведення в квадрат. Для здійснення операції ділення вхід Y з'єднаний через підстроювальний резистор R27 з виходом перемножувача (вивід 2), а сигнали діленого N і дільника N подаються, відповідно, на входи Z та X. Регулювання масштабу перетворення можна проводити за допомогою дільника R26, R27, встановленого на вході Y.

Вхідні сигнали перемножувача K525PC2 можуть змінюватися в межах  $-10\text{ В} \dots +10\text{ В}$ . Похибка множення становить не більше 1%. Сигнал з виходу ділильного блоку через дільник напруги R28 подається на вхід операційного підсилювача DA10.2. З виходу операційного підсилювача знімається сигнал, пропорційний поглибленню  $h_0$  породоруйнівного інструменту за оберт.

Одиничний сигнал рівнем від 11,7 до 26,2·В надходить з датчиків збільшення проходки і обертів на дільник напруги. При цьому залишкова напруга не перевищує 0,4·В. Після дільника сигнал, розділений навпіл, подається на вхід компаратора. При цьому напруга на вході компаратора ІМ може змінюватися в межах від 5,5·В до 10·В. На виході компаратора напруга становить 11·В, яка після стабілізації приймає значення 10·В, що відповідає логічній одиниці. Для стабільної роботи компаратора на його інвертуючому вході виставляється поріг 2,5·В за допомогою підлаштування резистора R2.

У початковому положенні на входах і виходах лічильника K561IE10, (крім шістнадцятого виводу живлення +12·В), повинні бути сигнали, рівні логічному нулю. При подачі на вхід 2 лічильника сигналів від датчика обертів, на виходах лічильника отримуємо сигнал у двійковому коді. Керування роботою лічильника ведеться за допомогою мікросхем: K176ЛИ1, що працює за схемою І, та K561ЛЕ6, що працює за схемою АБО-НЕ. Один корпус мікросхеми K561ЛЕ6 виділений для дозволу такту вхідного сигналу з компаратора на лічильник. Половина входів задіяна для компаратора, решта – для дозволу входу. Поки лічильник не набрав максимуму, тобто поки всі 8 виходів не приймуть значення логічної одиниці, на виході K176ЛИ1 буде логічний нуль, який через K561ЛЕ6 не перешкоджає проходженню імпульсів від компаратора до лічильника. Але як тільки на виходах лічильника, і відповідно, на входах K176ЛИ1 будуть усі одиниці, то на виході K176ЛИ1 отримуємо логічну одиницю, яка переходить на вхід K561ЛЕ6, і тим самим закриває вхід лічильника до його скидання. Скидання лічильника проводиться за допомогою одновібратора, зібраного на мікросхемі K561ТМ2. На мікросхемі K561ТМ2 зібрано два одновібратори, які виробляють два послідовні короткочасні імпульси, перший з яких подається на дозвільний вхід мікросхем K561ТМ3, кожна з яких складається з чотирьох D- тригерів для зчитування і для заповнення коду K561IE10. Дозвільний сигнал подається на 6-й вивід мікросхем K561ТМ3. Другий короткочасний імпульс призначений для скидання лічильника в нуль після запису його вихідного коду на тригерах.

Керування роботою одновібратора проводиться за допомогою мікросхеми K561ЛЕ6. При подачі на всі чотири входи логічного нуля на виході маємо логічну одиницю. При всіх інших комбінаціях на вході маємо вихід – логічний нуль. У схемі, що застосовується для керування одновібратором, використані два входи: один від датчика проходки, інший – від кнопки скидання, два інших закорочені на корпус, тобто передбачена можливість підключення інших керуючих пристроїв. Для нормальної роботи приладу необхідно, щоб на входах 2, 3, 4, 5 мікросхеми K561ЛЕ6 був рівень логічного нуля.

Код кількості обертів після зчитування тригерами подається на ЦАП, виконаний на

основі мікросхеми K572ПА1 і одного операційного підсилювача мікросхеми K140УД20, відповідно до зростання порядку на входи 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4 мікросхеми K572ПА1. Решта два входи (12, 13) закорочені на корпус. На вихід 15 подається опорна напруга 8·В, стабілізована стабілітроном КД518Д. Вихід 16, з якого знімається аналоговий сигнал, знаходиться в зворотному зв'язку операційного підсилювача, вхід якого з'єднаний з виходом 1 K572ПА1. Отриманий аналоговий сигнал подається на вхід X аналогового дільника K525ПС2 (вхід 7), а на вхід Z – стабілізовану напругу 1·В. Вихід 2 є виходом дільника.

Аналоговий дільник напруги виконаний на базі аналогового перемножувача сигналів (АПС серії K525ПС2 з відповідною комутацією зовнішніх виводів. Налаштування дільника зводиться до налаштування перемножувача розривом в ланцюзі зворотного зв'язку. Одним з оптимальних способів настроювання мікросхеми перемножувача K525ПС2 є налаштування на змінному струмі за допомогою осцилографа. Вона складається з наступних етапів.

1. Налаштування виходу перемножувача. Спочатку потрібно заземлити виводи 7 та 13 мікросхеми. Потім, підстроюванням потенціометра R23, встановити на виході АПС напругу, рівну нулю (контроль здійснюється високочутливим осцилографом або цифровим вольтметром постійного струму).

2. Налаштування X-входу. Спочатку необхідно заземлити вхід X (вивід 7 мікросхеми); на вхід Y подати синусоїдальний сигнал амплітудою -10·В...+10·В, до виходу АПС підключити осцилограф. Потім підстроюванням потенціометра R21 домогтися на екрані осцилографа мінімального розмаху вихідного сигналу.

3. Налаштування Y-входу. Спочатку необхідно заземлити вхід Y (вивід 13 мікросхеми); на вхід X подати синусоїдальний сигнал як в п.2. Потім, підстроюванням потенціометра R22, домогтися на екрані осцилографа мінімального розмаху вихідного сигналу (при цьому на виході АПС повинно спостерігатися подвоєння частоти вхідного сигналу).

Установка масштабного коефіцієнта  $k=0,1$ . Попередньо необхідно з'єднати разом входи X і Y та подати на них напругу +7,0·В. До виходу АПС підключити вольтметр постійного струму. Підлаштуванням потенціометра R26 домогтися на виході АПС напруги +4,9·В.

На цьому настроювання АПС закінчується. Для підвищення якості настроювання, до виходу АПС можна підключити віднімаючий пристрій, до другого входу якого підключають вхідний синусоїдальний сигнал. На другий вхід АПС подають за чергою напругу постійного струму +10·В. При цьому на виході перемножувача спостерігається синусоїдальний сигнал з похибкою, обумовленою відхиленням масштабного коефіцієнта  $\Delta k$ . Це відхилення чітко видно на екрані осцилографа, що підключається до виходу віднімаючого пристрою. Підстроюванням потенціометра R26 необхідно домогтися

**Таблиця 1 – Залежність коду лічильника числа обертів бурильного вала від величини поглиблення за оберт**

Код лічильника	255	200	134	100	80	67	57	50	45	40
Поглиблення за оберт, мм	0,016	0,02	0,029	0,04	0,05	0,059	0,07	0,08	0,089	0,1

**Таблиця 2 – Результати лабораторних випробувань пристрою визначення величини поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт**

№ з/п	h, мм/об	U <sub>вих</sub> , В	h <sup>2</sup>	U <sup>2</sup> <sub>вих</sub>	h <sub>об</sub> · U <sub>вих</sub>
1	0,0156	1,28	0,0002434	1,6384	0,02
2	0,02	1,78	0,0004	3,1684	0,0356
3	0,029	3,02	0,000841	9,1204	0,0876
4	0,04	3,86	0,0016	14,90	0,1544
5	0,05	4,94	0,0025	24,404	0,247
6	0,059	5,98	0,00348	35,76	0,353
7	0,07	7,1	0,0049	50,41	0,497
8	0,08	8,15	0,0064	66,42	0,652
9	0,089	9,1	0,00792	82,81	0,081
10	0,1	10,03	0,01	100,6	1,003
Σ	0,5526	55,24	0,03829	389,23	3,859

мінімального значення напруги на виході віднімаючої схеми.

Для визначення статистичних характеристик пристрою проведені лабораторні випробування. Для задання певного значення величини поглиблення за оберт на лічильнику обертів встановлюється відповідний код за таблицею 1.

За результатами лабораторних випробувань розраховані статистичні характеристики пристрою визначення величини поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт. Результати випробувань наведені в таблиці 2.

Тут же наведені результати проміжних розрахунків для визначення відповідних характеристик.

Коефіцієнт кореляції між вихідною напругою U пристрою та проходкою h<sub>0</sub> за оберт визначаємо за формулою [1].

$$r = \frac{\sum (h_i - \bar{h})(U_i - \bar{U})}{(m-1) \cdot S_h \cdot S_U}, \quad (9)$$

де через S<sub>h</sub> та S<sub>U</sub> позначені вибіркові дисперсії:

$$S_h^2 = \frac{1}{m-1} \sum (h_i - \bar{h})^2; \quad (10)$$

$$S_U^2 = \frac{1}{m-1} \sum (U_i - \bar{U})^2, \quad (11)$$

де  $\bar{h}$  – середнє значення h;

$\bar{U}$  – середнє значення U;

m – число пар вибірових значень (h, U).

При обчисленнях скористаємося формулами [1]:

$$\sum (h_i - \bar{h})(U_i - \bar{U}) = \sum h_i \cdot U_i - \frac{\sum h_i \cdot \sum U_i}{m}; \quad (12)$$

$$(m-1)S_h^2 = \sum h_i^2 - \frac{1}{m}(\sum h_i)^2; \quad (13)$$

$$(m-1)S_U^2 = \sum U_i^2 - \frac{1}{m}(\sum U_i)^2. \quad (14)$$

Середні значення  $\bar{h}$  та  $\bar{U}$  є рівними:

$$\bar{h} = \frac{1}{m} \sum h_i = \frac{0,5526}{10} = 0,05526;$$

$$\bar{U} = \frac{1}{m} \sum U_i = \frac{55,24}{10} = 5,524.$$

Проміжні розрахункові величини рівні:

$$\sum (h_i - \bar{h})(U_i - \bar{U}) = 3,8593 - \frac{0,5526 \cdot 55,24}{10} = 0,8067;$$

$$(m-1) \cdot S_h^2 = 0,0383 - \frac{0,5526^2}{10} = 0,00775;$$

$$(m-1) \cdot S_U^2 = 389,23 - \frac{55,24^2}{10} = 84,1;$$

$$S_h^2 = \frac{0,00775}{9} = 0,000861;$$

$$S_U^2 = \frac{84,1}{9} = 9,3432;$$

$$S_h = \sqrt{0,000861} = 0,02934;$$

$$S_U = \sqrt{9,3432} = 3,0567;$$

$$r = \frac{0,8067}{9 \cdot 0,02934 \cdot 3,0567} = 0,9994.$$

Отримане значення коефіцієнта кореляції досить високе, тому перевірку на значущість не проводимо.

Визначимо форму залежності  $U = f(h)$ . Виходячи з лабораторних випробувань пристрою та фізичної аналогії, залежність  $U = f(h)$  передбачається лінійною. Згідно принципу найменших квадратів складаємо нормальні рівняння лінійної регресії:



$$\sum U_i - \sum (\alpha + \beta \cdot h_i) = 0; \quad (15)$$

$$\sum U_i \cdot h_i - \sum (\alpha + \beta \cdot h_i) \cdot h_i = 0. \quad (16)$$

Перетворивши дані рівняння, отримуємо:

$$m \cdot \alpha + \beta \cdot \sum h_i = \sum U_i; \quad (17)$$

$$\alpha \cdot \sum h_i + \beta \cdot \sum h_i^2 = \sum U_i \cdot h_i. \quad (18)$$

Коефіцієнт регресії  $\beta$  знаходимо за допомогою визначників:

$$\beta = \frac{m \cdot \sum h_i \cdot U_i - \sum h_i \cdot \sum U_i}{m \cdot \sum h_i^2 - (\sum h_i)^2}. \quad (19)$$

Підставляючи числові значення, одержимо:

$$\beta = \frac{10 \cdot 3,8593 - 0,5526 \cdot 55,24}{10 \cdot 0,0383 - 0,5526^2} = 104.$$

Вільний член регресії  $\alpha$  визначимо через  $\beta$  згідно співвідношення:

$$\alpha = \frac{\sum U_i - \beta \cdot \sum h_i}{m} = \frac{55,24 - 104 \cdot 0,5526}{10} = -0,223.$$

Враховуючи фізичну сутність залежності  $U = f(h)$  та несуттєвість вільного члена регресії  $\alpha$ , приймаємо, що

$$U_{вих} = 100 \cdot h. \quad (20)$$

Графік залежності  $U_{вих} = f(h)$  поданий на рисунку 3.

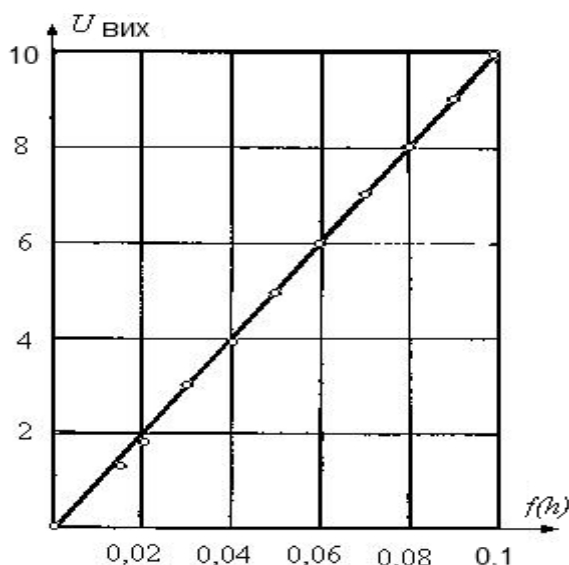


Рисунок 3 – Залежність вихідної напруги пристрою від величини поглиблення за оберт

Розроблений пристрій визначення величини поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт, принцип роботи якого заснований на використанні інтегральних характеристик збільшення проходки і числа обертів бурового інструменту на певному часовому інтервалі, дає можливість істотно зменшити мультиплікативні похибки за рахунок відміни проміжного диференціювання.

Отримані результати лабораторних випробувань та їх статистична обробка дали можливість встановити, що статична характеристика розробленого пристрою лінійна, а коефіцієнт кореляції між вихідною напругою пристрою і

заданою на вхід величиною поглиблення за оберт становить 0,99. Інформація про величину поглиблення породоруйнівного інструменту за оберт, що отримується за допомогою розробленого пристрою, може бути використана в системах оптимізації технологічного процесу буріння розвідувальних свердловин в якості точних значень критерію оптимізації.

### Література

1 Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

2 Величина углубки породоразрушающего инструмента за 1 оборот как определяющий фактор разработки параметров режима алмазного бурения / В.И. Васильев, В.А. Каулин, В.Н. Зорин // Пути повышения эффективности алмазного бурения. – Л.: ВИТР, 1988. – С. 23 – 27.

3 Исследование процесса износа керна при алмазном бурении / В.А. Каулин, П.П. Пономарев и др. // Обзор. Техн. и технол. геол.-развед. работ; орг. производства, – М.: ВИЭМС, 1986. – 64 с.

4 Исследование эффективности бурения с помощью системы MWD/ Техн. и технол. геол.-развед. работ; орг. пр-ва. Зарубеж. опыт: Экспресс-информация / ВНИИ экон. Минер.сырья и геол.-развед. работ (ВИЭМС). – 1989. Вып. 2. – с.9 – 15. – Ref. op.: Falkoner J.G., Normore D. MWD Bit effiaency model provides real= time answer / Oil & Gas Journal.– 1987.

5 Кибернетические системы в разведочном бурении. – М.: Недра, 1985.– 285 с.

6 Методические рекомендации по технологии высокооборотного алмазного бурения в монолитных и слаботрещинчатых горных породах. – М.: ВИТР, 1987. – 12 с.

7 Ресурсосберегающая технология алмазного бурения / [В.А. Бабышин, В.А. Глоба, О.П. Зайонц, В.И. Набока и В.А. Флянтиков // Разведка и охрана недр. – 1988. – №10. – С. 27 – 32.

8 Царицын В.В. Алмазное бурение / В.В. Царицын. – М.: Недра, 1975. – 104 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
20.04.12

Рекомендована до друку професором  
Мислюком М.А.