



УДК 681.5.015:622.243

MATHEMATICAL MODEL OF A THREE-LAYER CHISEL AS A LINK OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРЬОХШАРОШКОВОГО ДОЛОТА ЯК ЛАНКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ**

Mateik H. / Матеїк Г.Д.

0000-0003-0286-389X

Zvarych H. / Зварич Г.Г.

ORCID: 0000-0002-7866-542X

Pil N. / Пиль Н.В.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

Ivano-Frankivsk, Karpatskaya, 15, 76019

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

Івано-Франківськ, вул.Карпатська, 15, 76019

Анотація. Розглядаються статичні і динамічні властивості бурових доліт, як елементів системи автоматичного регулювання осьового навантаження на долото. Наведена функція передачі, а також алгоритмічна структура долота, як один із варіантів нелінійних систем Гаммерштейна.

Ключові слова: автоматичне регулювання, функція передачі, осьове навантаження, система Гаммерштейна.

Вступ.

Визначення функції передачі бурового долота як динамічної ланки автоматичної системи керування процесом поглиблення нафтових і газових свердловин, є актуальною науково-практичною задачею у зв'язку з створенням останнім часом глибинних пристроїв контролю швидкості обертання доліт і, як наслідок, замкнутих систем автоматичного регулювання, в яких долото є елементом цих систем. При цьому слід врахувати, що ефективність процесу буріння свердловин залежить від енергії, яка підводиться до бурового долота.

Проте, аналіз літературних джерел [1,2,3 та ін.] показує недостатній об'єм проведених досліджень в напрямку визначення статичних і динамічних властивостей бурових доліт як елементів систем автоматичного керування.

Тому метою даної роботи є визначення функції передачі бурового долота як елемента системи автоматичного керування на основі енергетичного підходу. На початку скористаємось очевидним твердженням, що енергія W_3 , яка підводиться із зовні до бурового долота, дорівнює сумі витрат енергії на руйнування гірської породи на вибої свердловини W_1 , на просування бурильного інструменту W_2 і тепло W_T за рахунок сил тертя при розтиранні породи, тобто:

$$W_3 = W_1 + W_2 + W_T. \quad (1)$$

Що стосується потужності N , яка витрачається на поглиблення вибою свердловини, то вона дорівнює сумі двох потужностей: N_1 – потужності, яка витрачається на обертання долота; N_2 – потужності, яка витрачається на поглиблення вибою свердловини [3]. Частка потужності N_1 в залежності від конструкції долота і його технічного стану, а також фізико-механічних і абразивних властивостей гірської породи, витрачається на подолання сил тертя



і перетирання сколотих шматків породи, якщо вони не відразу були винесені із свердловини, або потрапили знов в зону дії долота. Механічну потужність N_2 , яка витрачається на поглиблення вибою свердловини, можна записати у такому вигляді:

$$N_2 = F \cdot V, \quad (2)$$

де V - механічна швидкість буріння.

Тоді повна потужність N , яка витрачається на поглиблення вибою свердловини дорівнює:

$$N = \eta N_1 + FV. \quad (3)$$

В умовах прийнятих допущень модель бурового долота правомірно представити у вигляді алгоритмічної ланки типу "вхід – вихід", вхідною величиною якої є потужність N , яка підведена до долота, а вихідною – проходка h , (рис.1):

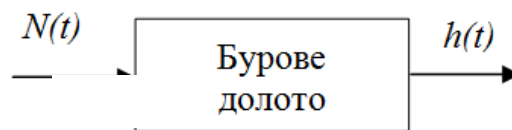


Рис. 1 – Модель "вхід – вихід" бурового долота

Джерело [3]

Диференціальне рівняння, яке моделює роботу долота з урахуванням прийнятих припущень, має такий вигляд [2]:

$$\frac{\pi D^2}{4} w p h = \eta(1 - \mu) N, \quad (4)$$

де w – питома енергоємність руйнування гірської породи,

D – діаметр долота, $p = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Рівняння, яке зв'язує вхідний і вихідний параметри цієї ланки запишемо, користуючись рівнянням (4), у такому вигляді:

$$S \frac{dh}{dt} = \eta(1 - \mu) N(t), \quad (5)$$

або у вигляді рівноцінного йому інтегрального рівняння:

$$h = k \int_0^t N(t) dt + h_0, \quad (6)$$

де h_0 - початкове значення проходки, $k = \frac{\eta(1 - \mu)}{wS}$, $S = \frac{\pi D^2}{4}$.

Після перетворення рівняння (5) за Лапласом отримаємо:

$$wSpH(p) = \eta(1 - \mu)N(p). \quad (7)$$

Тоді функція передачі долота $W(p)$, яка є відношенням зображення за Лапласом вихідної величини $H(p)$ до зображення за Лапласом вхідної величини $N(p)$ при нульових початкових умовах, дорівнюватиме:

$$W(p) = \frac{H(p)}{N(p)} = \frac{\eta(1 - \mu)}{wSp}, \quad (8)$$

або
$$W(p) = \frac{K}{p}. \quad (9)$$

$K = \frac{\eta(1 - \mu)}{wS}$ - коефіцієнт передачі долота.



Таблиця 1 - Форми зносу і закономірності зміни в часі відносного зносу μ зубців доліт по висоті при du/dt

Форми зносу зубців бурового долота	Закономірності зміни в часі відносного зносу μ зубців долота
	$\mu = \frac{h_0 - h_\pi}{h_\pi} \left(\sqrt{\frac{2ch_0t}{al(h_0 - h_\pi)^2} + 1} - 1 \right)$
	$\mu = \frac{h_0 - h_\pi}{h_\pi} \left(\sqrt{\frac{2ch_0 \cos(\frac{\alpha}{2} + \gamma)t}{al(h_0 - h_\pi)^2 \cos(\frac{\alpha}{2} - \gamma)} + 1} - 1 \right)$
	$\mu = \frac{\frac{tg\gamma}{2} + h_0 - h_\pi}{h_\pi} \left(\sqrt{\frac{2ch_0t}{al(\frac{tg\gamma}{2} + h_0 - h_\pi)^2} + 1} - 1 \right)$
	$\mu = \frac{h_0 - h_\pi}{h_\pi} \left(\sqrt{\frac{2ch_0 \sin(\gamma - \frac{\alpha}{2})}{al(h_0 - h_\pi)^2 \sin \gamma \cos \frac{\alpha}{2}} t + 1} - 1 \right)$
	$\mu = \frac{h_0 - h_\pi}{h_\pi} \left(\sqrt{\frac{2c(1 - \sin \frac{\alpha}{2})^2 t}{l(h_0 - h_\pi)^2 [\sin \alpha - (n - 2) \sin^2 \frac{\alpha}{2}]} + 1} - 1 \right)$
	$\mu = \frac{1}{3h_\pi} \left(\frac{3}{\pi} t + 1 \right)$

Авторська розробка



Тобто з позицій автоматизації бурове долото є динамічною інтегруючою ланкою з відповідними часовими і частотними характеристиками.

Проте при бурінні долотами з фрезерованим оснащенням або з вставним твердосплавним оснащенням відбувається зношення твердосплавних вставок і зубців шарошок. Закономірності зміни в часі відносного зносу μ зубців доліт по висоті h при різних формах затуплення і $d\mu/dt=c$ наведені в таблиці 1.

З таблиці 1 бачимо, що процес зношення зубців відбувається за нелінійними законами, що відповідає класичній кривій зношення Лоренца.

Нелінійний характер зміни зносу долота примушує представити функцію передачі (8) у вигляді добутку

$$W(p) = (1 - \mu) \frac{\eta}{wS} \cdot \frac{1}{p}, \tag{11}$$

а алгоритмічну структуру долота у вигляді двох послідовно з'єднаних ланок: нелінійного елемента і ідеальної інтегруючої ланки (рис. 2).

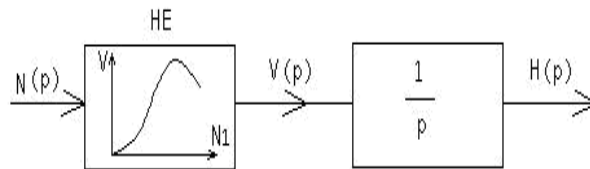


Рис. 2 Алгоритмічна структура бурового долота

Джерело [5]

Отже, маємо нелінійну модель Гаммерштейна [5] у вигляді з'єднання нелінійної безінерційної частини і лінійної динамічної ланки.

При бурінні долотами з твердосплавним і алмазним оснащенням і постійних параметрах режиму механічна швидкість буріння практично не змінюється в часі, оскільки абразивне зношення твердосплавних зубців і алмазів незначне.

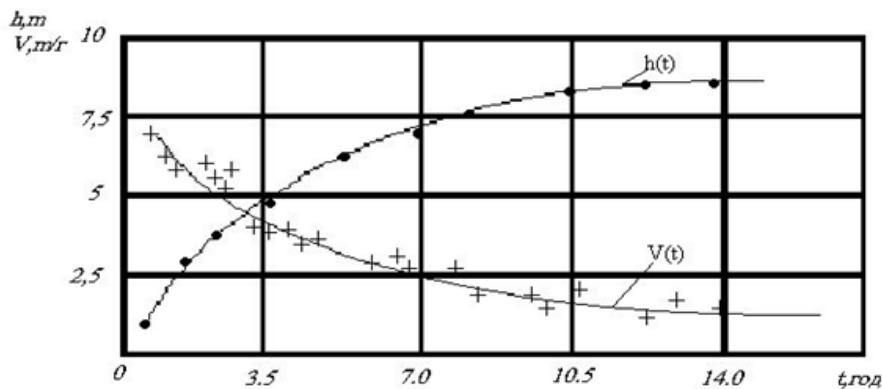


Рис. 3 Графіки зміни в часі механічної швидкості буріння $V(t)$ і проходки $h(t)$

Джерело [4]

На рис.3 зображено графік зміни проходки $h(t)$, одержаний при бурінні долотом 295,3 ТЗ в інтервалі 4820 – 4823,7м в однорідних цементованих пісковиках з постійним осьовим навантаженням на долото $F = 250\text{кН}$ (свердловина № 812 Надвірнянського УБР ВАТ "Укрнафта", спосіб буріння -



ротаторний, швидкість обертання долота – $n = 1 \text{ с}^{-1}$). Як видно з графіків, наведених на рис.3, проходка в часі змінюється за нелінійним законом, викликаним зношенням зубців долота. Після підйому долота для заміни встановлено, що понад 60% зубців були сколоті біля основи або випали.

На основі експериментальних досліджень і результатів обробки матеріалів, одержаних іншими дослідниками [2÷4] встановлено, що узагальненою математичною моделлю механічної швидкості буріння є модель, запропонована Р.А.Бадаловим:

$$V(t) = V_0(1 + m(n-1)V_0^{n-1}t)^{\frac{1}{n-1}}, \quad (13)$$

де V_0 - механічна швидкість буріння незатупленим долотом;

m – постійне число, яке використовується як коефіцієнт зносу, що є функцією осьового навантаження на долото і швидкості обертання.;

n – показник степеня, який може приймати будь-яке значення від 0 до 4 в залежності від властивостей долота і гірської породи, тобто $n \in [0,4]$.

Рівнянню (13) відповідає закономірність зміни поточного значення проходки h у часі:

$$h(t) = V_0^{-(n-2)} \left((1 + m(n-1)V_0^{n-1}t)^{\frac{n-2}{n-1}} (m(n-2))^{-1} \right), \quad (14)$$

і залежність проходки h від механічної швидкості буріння V :

$$h(v) = \frac{(V^{-\gamma} - V_0^{-\gamma})}{m\gamma}, \quad \gamma = n - 2. \quad (15)$$

Рівняння (13), (14) і (15) є важливими складовими математичної моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин.

Висновок.

Отже, з урахуванням прийнятих припущень алгоритмічну структуру бурового долота як динамічної ланки системи автоматичного регулювання параметрів режиму буріння, можна представити у вигляді послідовно з'єднаних нелінійного елемента і ідеальної інтегруючої ланки, тобто у вигляді нечіткої системи Гаммерштейна [4]. Це дозволяє використати передавальну функцію бурового долота як елемент системи автоматичного контролю і керування процесом поглиблення нафтових і газових свердловин.

Література:

1. Ситников Н.Б. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин: Автореф.дис....д-ра техн.наук 05.13.07 / Уральск.гос.горн.-геолог.академия. – Екатеринбург, 2000. – 41с.
2. Семенцов Г.Н., Кузь Т.Я. Теоретичні основи методу контролю твердості порід при поглибленні свердловини // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. № 7 (том 6), 2001. – С.91-98.
3. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин / М.І. Горбійчук, Г.Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: Нова Зоря, 2003. – 493 с.
4. Семенцов Г.Н. Оптимальное управление процессом бурения нефтяных



и газовых скважин / Дис... д-ра техн.наук: 05.13.07 . – М., 1990. – 244с.

5. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій і газовій промисловості. Ч.ІІ / М.І.Горбійчук. – Івано-Франківськ: Факел. – 1999. – 226с.

Abstract. *The static and dynamic properties of drill bits are considered as elements of the system of automatic adjustment of the axial load on the bit. The transfer function, as well as the algorithmic structure of the bit, is given as one of the variants of non-linear Hammerstein systems.*

Keywords: *automatic adjustment, transmission function, axial load, Hammerstein system.*

Стаття відправлена: 17.08.2022 р.
© Матеїк Г.Д., Зварич Г.Г., Пиль Н.В.