



УДК 681.513.6

CHAOTIC BEHAVIOR OF INDICATORS OF THE PROCESS OF WELL DRILLING WITH ELECTRIC DRILLS**ХАОТИЧНА ПОВЕДІНКА ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ****Lahoida A. / Лагойда А.І.**

ORCID: 0000-0002-0862-7786

Chyhur L. / Чигур Л.Я.

0000-0002-5653-9246

Lahoida L. / Лагойда Л.І.

ORCID: 0000-0002-2328-8276

*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 методи і засоби технічного обліку енергоресурсів, а також визначення рівня енергоспоживання при бурінні нафтових і газових свердловин, зокрема у напрямку моделювання і дослідження динамічних процесів формування питомих енерговитрат на поглиблення свердловин та інших інформаційно-енергетичних характеристик електробурів. Досліджується поведінка таких показників процесу буріння, як інформаційно-енергетичні характеристики електробурів для використання їх при побудові спеціалізованої автоматизованої комп'ютерної системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності при управлінні процесом формування питомих енерговитрат на буріння нафтових і газових свердловин.

Ключові слова: електробур, контроль, енергоресурси, інформаційно-енергетичні характеристики, процес буріння, показника Херста.

Вступ.

Відомо [1], що найбільш перспективним методом буріння нафтових і газових свердловин є буріння електробурами. Вони виготовляються промисловістю з двигунами потужністю до $N = 250$ кВт, напругою до 2500 В, частотою 50Гц. Призначені вони для буріння вертикальних, похило-направлених і розгалужено-горизонтальних нафтових і газових свердловин, а також для будівництва фундаментів і фундаментів опір мостів, для прокладання трубопроводів під водними та іншими перешкодами, на воду, тощо [2].

У зв'язку з дефіцитом енергоресурсів і з інтенсивним впровадженням комп'ютерно-інтегрованих технологій для оптимізації процесу буріння нафтових і газових свердловин, створення енергозощаджуючих технологій буріння свердловин є актуальною задачею. Проте, аналіз літературних джерел (наприклад, [1, 3, 4 та ін.]) показує недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку розробки методів і засобів технічного обліку енергоресурсів, а також визначення рівня енергоспоживання при бурінні нафтових і газових свердловин, зокрема у напрямку моделювання і дослідження динамічних процесів формування питомих енерговитрат на поглиблення свердловин та інших інформаційно-енергетичних характеристик електробурів. Це пояснюється тим, що буріння свердловин відноситься до класу погано визначених об'єктів, що функціонують за умов апріорної та поточної



невизначеності і перебувають під впливом різного типу зовнішніх завад.

У зв'язку з цим, метою даної роботи є дослідження поведінки таких показників процесу буріння, як інформаційно-енергетичні характеристики електробурів для використання їх при побудові спеціалізованої автоматизованої комп'ютерної системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності при управлінні процесом формування питомих енерговитрат на буріння нафтових і газових свердловин. Вибір процесу буріння обумовлений тим, що в комплексі задач видобування вуглеводнів витрати енергії на цей процес є найбільш вагомими, особливо при бурінні глибоких свердловин і бурінні на шельфі Чорного і Азовського морів.

Широке використання електричних двигунів для електробурів, а також приводів ротора бурових установок, насосів, лебідок вимагає не тільки підвищення їх якості, але й висуває одну з найбільш актуальних задач – необхідність дослідження їх інформаційно-енергетичних характеристик і розроблення інформаційних технологій для побудови системи технічного обліку споживаних енергоресурсів. Це в свою чергу вимагає більш детальних досліджень властивостей електродвигунів бурових установок як контрольованих об'єктів.

Виклад основного матеріалу.

Найбільш складним варіантом електричних двигунів у галузі є заглиблений двигун електробура. Асинхронні маслонаповнені двигуни з короткозамкненим ротором працюють на глибині до 5000 м в умовах високого гірничого тиску і температури $\approx 200^{\circ}\text{C}$. Живлення двигуна здійснюється по струмопідводу, що прикладений в середині бурильних труб. Одну фазу кабеля замінено колонною бурильних труб. Оскільки двигун електробура працює на вибої свердловини, тому безпосередньо виміряти його параметри неможливо, хоча дуже важливо встановити характер роботи електробура при різних глибинах і визначити умови, які визначають найбільш ефективні режими буріння свердловини.

Основною характеристикою електробура як контрольованого об'єкта є оператор $F(Z, t)$, за допомогою якого вхідні параметри $x(t)$ перетворюються у вихідні $y(t)$, тобто $y(t) = F(Z, t)x(t)$. Оператор $F(Z, t)$ залежить від вектора випадкових параметрів Z , часу t і є математичним описом роботи реального електробура.

Компонентами вектора вхідних параметрів $x(t)$ є осьове навантаження на долоті $P(t)$, напруга живлення $U(t)$, витрата бурового розчину $Q(t)$, частота змінного струму $f(t)$:

$$x(t) = x[F(t), U(t), Q(t), f(t)]. \quad (1)$$

Компонентами вектора вихідних змінних є показники процесу буріння: проходка $h(t)$, швидкість проходки $V(t)$, активна потужність $N(t)$, витрати електроенергії $W(t)$ та ін.:

$$y(t) = y[h(t), V(t), N(t), W(t)]. \quad (2)$$

Особливістю електробурів є випадковість вектора параметрів Z , яка зв'язана з особливостями процесів його виготовлення й експлуатації.



Під час виготовлення електробурів, наприклад, найбільш розповсюджених типів E240-8, E-215-8м, E164-8м та ін., спостерігається технічний розкид параметрів відносно своїх номіналів.

Під час буріння зміну параметрів електробурів викликають такі збурюючі фактори як пластові тиск і температура, фізико-механічні властивості гірських порід, нестабільність вхідних параметрів $x(t)$. Це дає підстави вважати електробури багатомірними керованими об'єктами з нелінійним нестационарним оператором $F(Z,t)$, на вході якого діє квазістационарний випадковий процес. Нижче розглядаються результати досліджень показників роботи електробура типу E240-8 як контрольованого об'єкта.

Аналіз технологічного процесу буріння свердловин показав [3], що найбільш інформативним параметром, який характеризує ефективність процесу буріння електробурами є питомі витрати електроенергії – $W(t)$, [кВт·год/м] на 1м пробуреної свердловини. Кількість енергії, витраченої на руйнування породи залежить від режиму буріння та конструктивних параметрів доліт і властивостей навколишнього середовища.

Для дослідження інформаційно-енергетичних характеристик електробура проведені вимірювання потужності N , що споживається двигуном електробура, проходки h , механічної швидкості проходки V , осьового навантаження на долото P при бурінні свердловини установкою "Уралмаш 4Е" в умовах Прикарпатського УБР із застосуванням електробура E240-8 ($P_{ном} = 210$ кВт, $U = 1700$ В, $I_n = 140$ А, $n_{ном} = 690$ об/хв, $f = 50$ Гц) з долотом типу 269,9С-ГНУ Дрогобицького долотного заводу. Умови буріння: середнє осьове навантаження на долото $P = 110$ кН, витрати бурового розчину $Q = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м³/с, густина його $\gamma = 1420$ кг/м³, порода – аргіліти бистрицької світи.

Питомі витрати електроенергії $W(t)$ визначені на основі діаграм потужності $N(t)$ і проходки $h(t)$ за формулою:

$$W(t) = \frac{N(t)}{\frac{\Delta h(t)}{\Delta t}} = \frac{N(t)}{V(t)}, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}.$$

Оскільки швидкість буріння на досліджуваному інтервалі глибини свердловини $V(t) = 1$ м/год., то діаграма $W(t)$ практично співпала з діаграмою активної потужності $N(t)$, що свідчить про наявність колінеарності цих двох показників процесу буріння.

Статистична обробка емпіричних даних по суті зводилась до [4,5]: визначення закону розподілу випадкових величин; вимірювання емпіричного розподілу по прийнятому теоретичному; порівняння емпіричних і теоретичних функцій по визначеним критеріям узгодження; ідентифікації хаотичних послідовностей за допомогою показника Херста.

Розрахунки статистичних характеристик вихідних даних проведені за допомогою ПК за стандартними програмами, що відповідають поставленій задачі.

Вся зона розсіювання питомих енерговитрат була розділена на групи. Для цього були визначені найбільше і найменше значення питомих енерговитрат. Розмах R дорівнює різниці між цими величинами:



$$R = W_{\max} - W_{\min} \quad (3)$$

Підставивши числові значення в (3), отримаємо розмах питомих витрат електроенергії $R=187,5$ кВт·год/м, який ділимо на 7 груп з інтервалами $h=26,78$ кВт·год/м. Кількість груп визначили за формулою Стерджеса.

Враховуючи, що значення випадкової величини W_i є трьох- і більше значними числами і об'єм вибірки $N > 25$, розрахунок параметрів електричного розподілу провели шляхом введення нової випадкової величини:

$$W_i'' = (W_i' - W_0)l^{-1}, \quad (4)$$

де W_i'' - нова випадкова величини;

W_i' - середина інтервалів;

l - величина інтервалу,

$$W_0 = \frac{\sum_{i=1}^k W_i'}{k}, \quad (5)$$

де k – кількість інтервалів.

Підставивши в (5) числові значення, отримали $W_0 = 3593,75$ кВт·год/м.

По формулі (4) були знайдені нові випадкові величини для кожного інтервалу і знайдені початкові моменти: $Q_1 = -0,33$; $Q_2 = 2,3$; $Q_3 = -1,81$; $Q_4 = 11,4$ і центральні моменти $m_2 = 2,19$; $m_3 = 0,36$; $m_4 = 10,47$.

Були обчислені середнє значення $\bar{W} = 3585,01$ кВт·год/м і середньквдратичне відхилення $S = 39,65$ кВт·год/м.

Оскільки відомі розмах (3) і середньквдратичне відхилення питомих витрат електроенергії, то була оцінена хаотичність процесу $W(t)$ за допомогою показника Херста H [5]:

$$\frac{R(k)}{S(k)} = (ak)^H, \quad (6)$$

де k – дискретний поточний час;

$S(k)$ - середньквдратичне відхилення;

a - невідомий параметр, що обирається у загальному випадку із суто емпіричних припущень;

$R(k)$ – розмах послідовності накопичених відхилень $W(i, k)$.

Після підстановки $R(k)$ і $S(k)$ в (6) отримали:

$$\frac{187,5}{39,65} = (ak)^H = 4,728, \quad (7)$$

тобто, якщо вибрати коефіцієнт $a = 2$, то показник Херста H буде > 2 , тобто процесу зміни питомих витрат енергії в часі властива хаотичність. Це дозволяє використовувати для аналізу методи хаосдинаміки – штучних нейромереж, фракталів.

Для виявлення емпіричного розподілу визначили показники асиметрії A і ексцесу E згідно формул [5]:

$$A = m_3(m_2^3)^{-\frac{1}{2}}, \quad (8)$$



$$E = m_4(m_2^2)^{-1}. \quad (9)$$

Підставивши у формули (8), (9) числові дані, одержали $A = 0,11$; $E = 0,82$. Оскільки асиметрія $A \neq 0$ і ексцес $E \neq 0$, тому вирівнювання ампіричного розподілу провели, користуючись узагальненою нормальною кривою Лапласа-Шарльє.

Порівняння емпіричної і теоретичної функцій розподілу частот провели за критерієм узгодження Пірсона χ^2 , який дорівнює $\chi^2 = 7,98$.

Після знаходження χ^2 визначили число k степенів вільності:

$$K = n - r - 1, \quad (10)$$

де n – число порівнюваних частот;

r – число параметрів теоретичної функції розподілу.

У нашому випадку $n = 7$, $r = 4$, оскільки закон розподілу Лапласа-Шарльє чотирьохпараметричний. Підставивши в (10) числові значення n і r , отримали $k = 2$. При $k = 2$ і $\chi^2 = 7,98$ найближче значення $P(\chi^2) = 0,0183 > 0,01$, тобто криві емпіричної і теоретичної функцій розподілу частот узгоджуються.

Досліджувана емпірична крива відповідає вибраному теоретичному закону, а це означає, що наступні дослідження стаціонарного процесу $W(t)$ можна проводити, використовуючи вибраний закон розподілу Лапласа-Шарльє.

Оскільки математичний апарат аналізу стаціонарних процесів базується на гіпотезі ергодичності, то була перевірена ергодичність процесу $W(t)$ за допомогою автокореляційної функції $R_{ww}(\tau)$:

$$R_{ww}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{W}(t)\dot{W}(t+\tau)dt, \quad (11)$$

де τ - зсув між миттєвими значеннями сигналу;

$\dot{W}(t)$ - центрований сигнал;

T – довжина реалізації $\dot{W}(t)$.

Враховуючи, що експериментально отримана реалізація $\dot{W}(t)$ є сукупністю дискретних значень через рівні проміжки часу Δt , інтервал (10) замінили сумою [5]:

$$R_{ww}(\tau) = R_{ww}(k\Delta t) \approx \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} \dot{W}(i\Delta t)\dot{W}(i\Delta t + k\Delta t). \quad (12)$$

Провівши необхідні обчислення, отримали оцінку нормованої автокореляційної функції.

Нелінійну апроксимацію автокореляційної функції $R_{ww}(k\Delta t)$ провели, користуючись рівнянням:

$$F(x, \alpha, \beta, \gamma) = e^{-\alpha|x|} \cos(\beta|x|) \cos(\gamma|x|), \quad (13)$$

де $\alpha = 0,95$; $\beta = -0,8$; $\gamma = 0,02$.

Похибка апроксимації складає 0,01. Оскільки автокореляційна функція $R_{ww}(k\Delta t)$ при $\tau \rightarrow \infty$ наближається до нуля, то даний процес є ергодичним.



Висновок.

Випадковий процес зміни питомих витрат електроенергії, що споживається електробуром у процесі буріння нафтових і газових свердловин, є стаціонарним ергодичним процесом з проявами хаотичної поведінки і з функцією розподілу Лапласа-Шарльє, що дає можливість застосовувати поряд із відомими методами методи хаосдинаміки для синтезу систем контролю і управління.

Література:

1. 3. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин / М.І. Горбійчук, Г.Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: Нова Зоря, 2003. – 493 с.
2. ДСТУ 3258-95 (ГОСТ 15880-96). Електробури. Загальні технічні умови. Київ: Держстандарт України. – 1997. – 25 с.
3. Ситников Н.Б. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин // Автореф.дис. д.т.н.: 05.13.07, Уральская горная академия. Екатеринбург. – 2000. – 41 с.
4. Семенцов Г.Н., Кузь Т.Я. Інформаційна модель контролю питомих енерговитрат на поглиблення свердловин // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2001. – №1. – С. 76-80.
5. Корольков Е.Е. Плисс И.П., Шило А.В., Чапланов А.П. Об одном нейросетевом алгоритме вычисления показателя Херста // Вестник национального технического университета "ХПИ". – №8. – Харьков: НТУ ХПИ, 2001. – С.48-50.

***Abstract.** Methods and means of technical accounting of energy resources are considered, as well as determination of the level of energy consumption when drilling oil and gas wells, in particular in the direction of modeling and research of dynamic processes of formation of specific energy consumption for deepening wells and other information and energy characteristics of electric drills. The behavior of such indicators of the drilling process as the information and energy characteristics of electric drills is investigated for their use in the construction of a specialized automated computer system for intelligent decision-making support under conditions of uncertainty in the management of the process of formation of specific energy consumption for drilling oil and gas wells.*

***Key words:** electric drill, control, energy resources, information and energy characteristics, drilling process, Hurst index*

Стаття відправлена: 19.09.2022 р.

© Лагойда А.І., Чигур Л.Я., Лагойда Л.І.