



УДК 681.513.6:622.24

IDENTIFICATION OF CHAOTIC BEHAVIOR OF NONLINEAR CONTROL OBJECTS OPERATING UNDER CONDITIONS OF UNDETERMINATION AND THE PRESENCE OF INTERFERENCES

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ХАОТИЧНОЇ ПОВЕДІНКИ НЕЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ, ЩО ФУНКЦІОНУЮТЬ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА НАЯВНОСТІ ЗАВАД

Zvarych H. / Зварич Г.Г.

ORCID: 0000-0002-7866-542X

Mateik H. / Матеїк Г.Д.

0000-0003-0286-389X

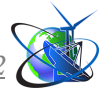
*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Ivano-Frankivsk, Karpatskaya, 15, 76019**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, вул.Карпатська, 15, 76019*

Анотація. В роботі запропоновано використання раннього виявлення розладнань нелінійних об'єктів керування на прикладі процесу буріння. Розв'язано задачу відновлення показника Херста в процесі буріння свердловини, для чого запропоновано відповідне математичне, алгоритмічне і програмне забезпечення.

Ключові слова: ідентифікація хаосу, об'єкт керування, невизначеність, розладнання, показник Херста, реальний час.

Вступ.

Ідентифікація хаотичної поведінки об'єктів керування, що функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності щодо їхньої структури та параметрів, є актуальним науково-прикладним завданням для нафтогазовидобувної галузі промисловості, зокрема для керування процесом буріння свердловин і розробки нафтових і газових родовищ [1,2]. Це обумовлено тим, що ці об'єкти керування відносяться до класу погано визначених об'єктів, що розвиваються в часі і мають нелінійні статичні та динамічні характеристики [3,4]. Вони не достатньо точно описуються за допомогою традиційних математичних моделей, прийнятих в теорії ідентифікації. Проблема ідентифікації ускладнюється тим, що тип нелінійності об'єкта апріорі невідомий, її характер може змінюватися з часом, об'єкт розвивається в часі, змінює свою структуру, можливе виникнення коливних режимів [1,2], а також дивних атракторів [1]. Збурення також мають стохастичний характер. У цьому випадку прийнятним математичним апаратом є



теорія синергетичних моделей у вигляді систем нелінійних звичайних диференціальних рівнянь [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_1 x_1 + a_2 x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} &= b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_3, \\ \frac{dx_3}{dt} &= c_1 x_3 + c_2 x_1 x_2 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де x_1, x_2, x_3 – коефіцієнти системи; $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$ – параметри моделі.

Ця модель стала відомою у світі у зв'язку з тим, що вона крім монотонних і коливних еволюцій мала також хаотичну. Її фазовий портрет має вигляд крил «метелика», тобто сукупність хаотичних траєкторій, поведінку яких в часі передбачити неможливо, але вони знаходяться у замкненому фазовому просторі.

Результати.

Виходячи з сучасного стану в області моделювання процесу буріння, впливає, що для оптимального керування зручно і доцільно математичну модель поглиблення свердловин шукати у вигляді диференціальних рівнянь [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= \frac{1}{\varepsilon^*(t)} k_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}, \\ \frac{d\varepsilon^*}{dt} &= k_2 F^{\alpha_2} n^{\beta_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де h – проходка долота; ε^* – відносне зношення оснащення долота; $k_1 = c_1 d^2$, c – невідома змінна, яка повинна визначатися в процесі ідентифікації; d – діаметр долота; F – осьова сила на долото; n – швидкість обертання долота; $\alpha_1 = 1 - \gamma$, $\beta_1 = 2 - \delta$ – невідомі коефіцієнти, які повинні бути визначені в процесі ідентифікації моделі; γ, δ – показники ступеня в рівнянні потужності, обертання долота $N = F^\gamma n^\delta$.

Праві частини математичної моделі (2) є випадковими і коефіцієнти її підлягають ідентифікації в процесі буріння. Ідентифікація повинна здійснюватися при переході долота в породи з іншими властивостями, і цей момент повинен бути виявлений за допомогою математичної моделі. Тобто виникає проблема раннього виявлення змінності властивостей (розладнань)



об'єкта і системи керування. Розглянемо тепер можливості виявлення моменту зміни умов буріння, тобто моменту розладнання за допомогою обчислення показника Херста в реальному часі, що дає змогу вирішувати проблеми раннього виявлення змінності властивостей [1].

Оскільки величини F , n , які входять до математичної моделі (2), суттєво змінюються в часі, причому випадково, то праві частини рівнянь є випадковими функціями часу. Для виділення постійних складових у величинах F , n введемо для розгляду величини F_0 , n_0 такі, що

$$\begin{aligned} n(t) &= n_0 + \xi_n(t) = n_0 \left(1 + \frac{\xi_n(t)}{n_0} \right), \\ F(t) &= F_0 + \xi_F(t) = F_0 \left(1 + \frac{\xi_F(t)}{F_0} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Величини F_0 , n_0 вибираємо довільно, причому не обов'язково повинні бути середні значення F , n . Важливо лише те, що ми їх визнали постійними і їх величина нам відома.

З урахуванням (3) праву частину рівнянь (2) можна привести до вигляду

$$\frac{1}{\xi_n(t)} k_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1} = \frac{1}{\xi^*(t)} k_1 F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1} \left(1 + \frac{\xi_F(t)}{F_0} \right)^{\alpha_1} \left(1 + \frac{\xi_n(t)}{n_0} \right)^{\beta_1}. \quad (4)$$

$$k_2 F^{\alpha_2} n^{\beta_2} = k_2 F_0^{\alpha_2} n_0^{\beta_2} \left(1 + \frac{\xi_F(t)}{F_0} \right)^{\alpha_2} \left(1 + \frac{\xi_n(t)}{n_0} \right)^{\beta_2}. \quad (5)$$

З аналізу (4) і (5) видно, що праві частини рівнянь математичної моделі процесу буріння є випадковими, керувальні дії F і n змінюються в часі. Якщо, наприклад, змінами потужності на долоті знехтувати, то для того, щоб експериментальна математична модель була справедлива, необхідно при бурінні (навіть в ізотропних породах) підтримувати $F = \text{const}$ і $n = \text{const}$.

Для розрахунку показника Херста H використовується величина розмаху її дисперсії. Показник Херста обчислюється за наступним алгоритмом. Для дискретної послідовності $y(1), y(2), y(3), \dots, y(i), \dots, y(k)$ показник Херста H можна записати у формі [1, 3]:

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



де k – дискретний поточний час; $R(k)$ – розмах послідовності накопичених відхилень $x(i, k)$; $S(k)$ – середньоквадратичне відхилення; α – невід’ємний параметр, що обирається у загальному випадку суто із емпіричних припущень.

Саме коефіцієнт H і отримав назву показника Херста. Отже, показник Херста визначається за формулою

$$H = \log_{\alpha k} \left(\frac{R(k)}{S(k)} \right). \quad (7)$$

Ці всі формули використовуються для стаціонарних об’єктів. Для нестаціонарних об’єктів запропоновано метод обчислювання показника Херста на ковзному вікні. Послідовність розрахунку наведена нижче:

$$\frac{\bar{R}(k)}{\bar{S}(k)} = w^H, \quad (8)$$

де $\bar{R}(k)$, $\bar{S}(k)$ – усереднені значення $R(k)$ та $S(k)$ на ковзному вікні; w – довжина ковзного вікна.

Середньоквадратичне відхилення визначається за формулою:

$$\bar{S}(k) = \sqrt{\frac{1}{w} \sum_{i=k-w+1}^k (y(i) - \bar{y}(k))^2}. \quad (9)$$

Формула для визначення середнього значення дискретної послідовності наступна

$$\bar{y}(k) = \frac{1}{w} \sum_{i=k-w+1}^k y(i). \quad (10)$$

Поточне середнє значення дискретної послідовності визначається так

$$\bar{y}(i) = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i y(j). \quad (11)$$

Послідовність накопичених відхилень $x(i, k)$, що обчислюється за формулою:

$$x(i, k) = \sum_{i=k-w+1}^k (y(i) - \bar{y}(i)). \quad (12)$$

Знаходимо середні значення розмаху послідовності накопичених відхилень і середнє значення середньоквадратичних відхилень:

$$R(k) = \max_{k-w+1 \leq i \leq k} x(i, k) - \min_{k-w+1 \leq i \leq k} x(i, k), \quad \bar{R}(k) = \frac{1}{w} \sum_{i=k-w+1}^k R(i). \quad (13)$$

Отже, показник Херста визначається за формулою:



$$H = \log_w \left(\frac{\bar{R}(k)}{\bar{S}(k)} \right). \quad (14)$$

Розроблено програми, які реалізують алгоритм обчислення показника Херста для нестационарних об'єктів в середовищах Matlab, PASCAL. Нижче наведено функціональні блоки, які використані для створення пристрою для обчислення показника Херста в пакеті Simulink (рис. 1).

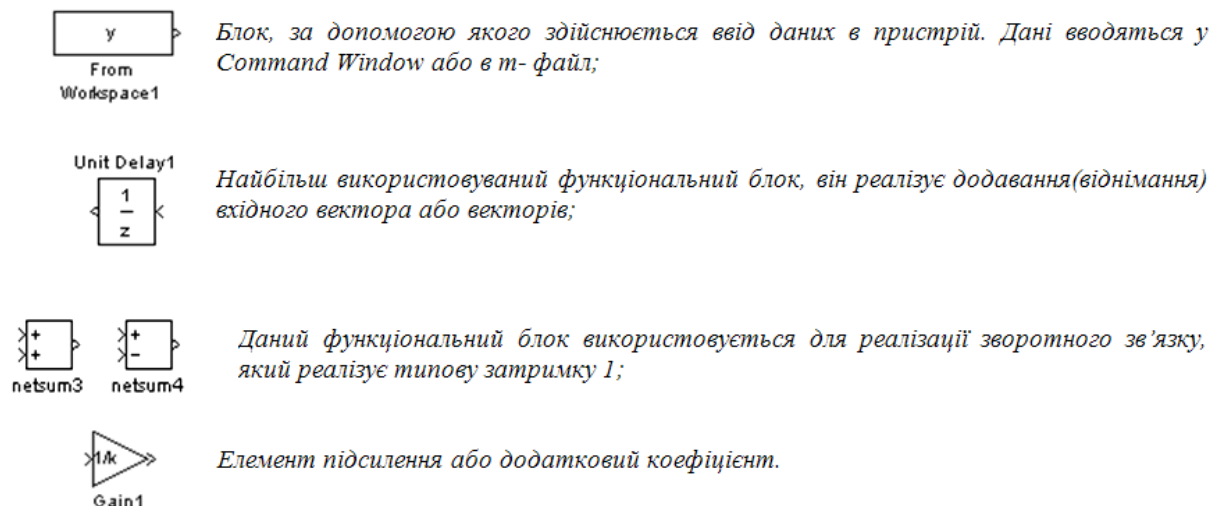


Рисунок 1 – Функціональні блоки для обчислення показника Херста в пакеті Simulink

Джерело: [7]

За допомогою даних функціональних блоків реалізуємо функцію знаходження середнього значення вхідного вектора, а також різницю між середнім значенням і поточним вхідним масивом даних. Схема реалізації даного алгоритму наведена нижче (рис.2).

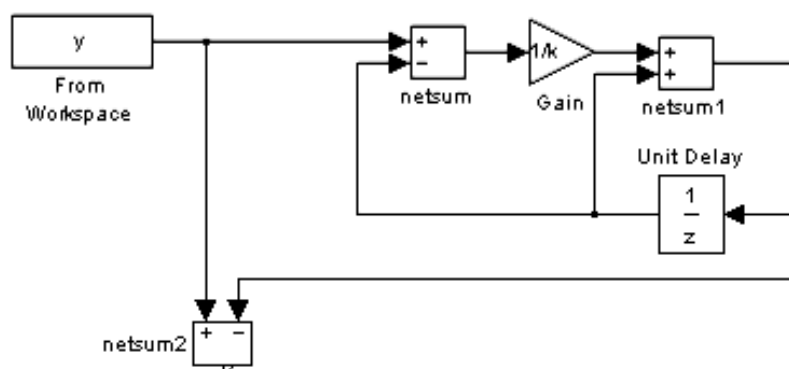


Рисунок 2 - Схема пристрою, яка реалізує $y(k+1) - \bar{y}(k+1)$

Джерело: [6]



Аналізуючи функції блоків, можна дану схему описати так: на вхід пристрою подається масив даних y . Від даного блоку виходять дві стрілки, які з'єднуються з блоками netsum і netsum2 $\text{netsum} \rightarrow \text{Gain} \rightarrow \text{netsum1} \rightarrow \text{unit delay} \rightarrow \text{netsum}$ – реалізує функцію знаходження середнього значення вхідного масиву. На виході netsum 2 маємо різницю між середнім значенням і поточним вхідним масивом даних. Реалізуємо знаходження дисперсії і середньоквадратичного значення послідовності. Схема реалізації знаходження дисперсії і середньоквадратичного відхилення значення наведена нижче (рис.3).

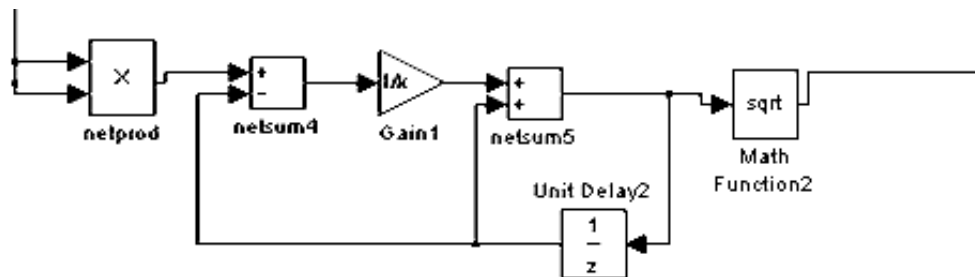


Рисунок 3 - Схема пристрою, яка реалізує знаходження D і S

Джерело: [6]

Дані масиву подаються на вхід функціонального блоку Netprod, за допомогою якого масив множиться сам на себе. Далі від вихідного значення віднімається середнє значення масиву. В результаті отримуємо значення дисперсії даного масиву, яке подається на вхід функціонального блоку знаходження кореня квадратного, на виході якого маємо середньоквадратичне значення масиву даних.

Реалізуємо знаходження послідовності накопичених відхилень $x(i, k)$, а також розмах послідовності накопичених відхилень $R(x)$. Схема частини пристрою, яка реалізує пошук $x(i, k)$ і $R(x)$ наведена на рис.4.

Верхня частина даної схеми реалізує пошук максимального значення послідовності накопичених відхилень $x(i, k)$, відповідно нижня частина реалізує знаходження мінімального значення. Ці значення подаються на блок netsum10, за допомогою якого здійснюється знаходження $R(x)$. Отже, з'єднавши дані частини схеми, отримаємо пристрій розрахунку показника Херста (рис.5).

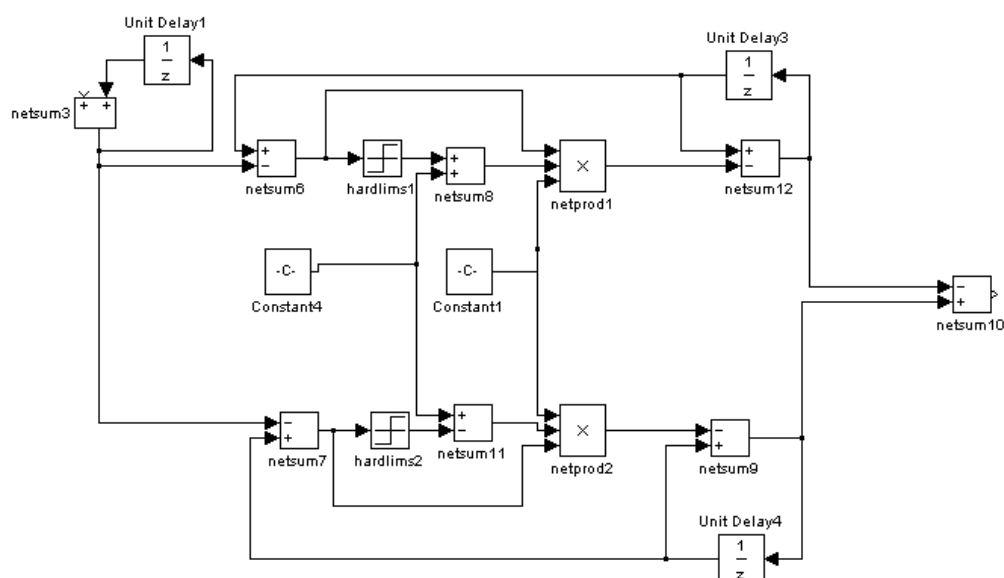


Рисунок 4 - Схема частини пристрою, яка реалізує знаходження $x(i, k)$ і $R(x)$

Джерело: [6]

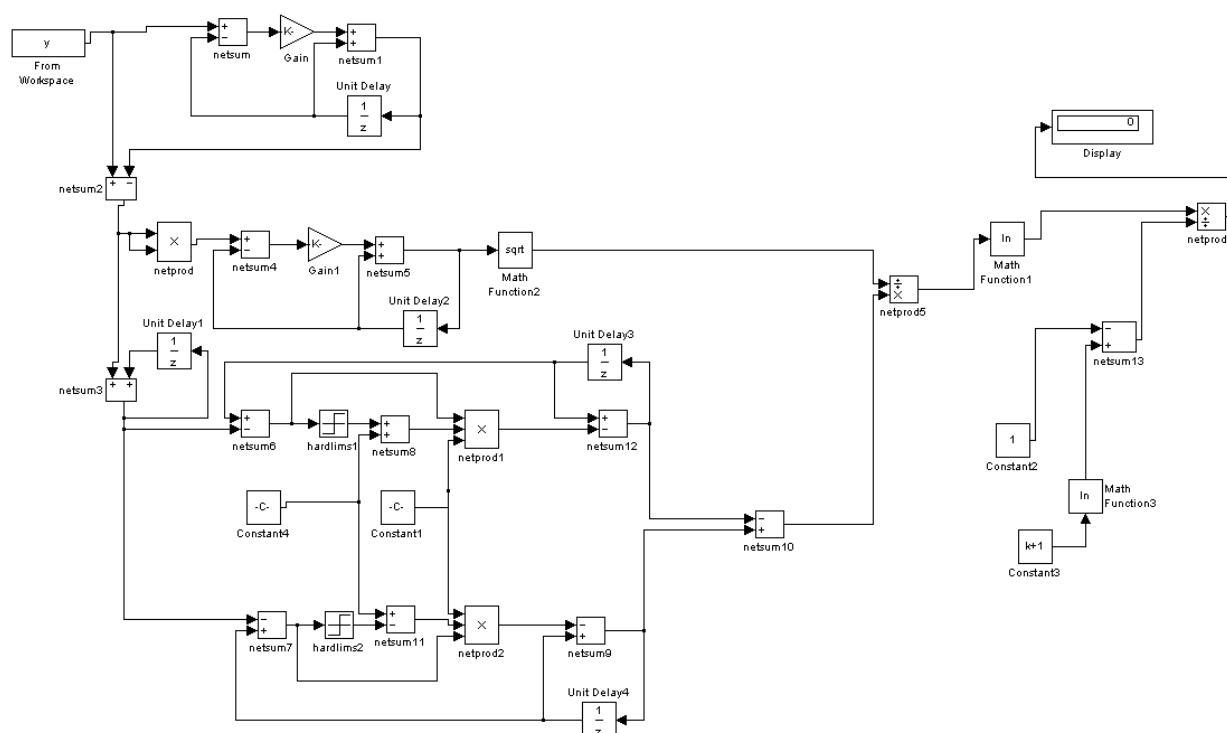


Рисунок 5 - Пристрій для обчислення показника Херста

Джерело: [4]

Як видно на рисунку, значення середньоквадратичного відхилення і розмаху послідовності накопичених відхилень $R(x)$ подаються на блок netprod5, де відбувається ділення $R(x)/S$. Далі з отриманого значення знаходимо натуральний логарифм. Щоб знайти показник Херста, використовуючи блок netprod4, ділимо



отримане значення після логарифму на значення $\ln(k+1)-1$. В результаті в блоці Display отримуємо значення показника Херста.

Верифікація розробленого математичного алгоритмічного і програмного забезпечення, а також перевірка роботи пристрою обчислення показника Херста проведена для п'яти параметрів: осьова сила на долото $F(t)$, струм електродвигуна $I(t)$, потужність двигуна $N(t)$, механічна швидкість $v(t)$ і оцінка відносного зносу оснащення долота $E(t)$.

Отримано такі результати: $H_1 = 0.64$; $H_2 = 0.86$; $H_3 = 0.75$; $H_4 = 0.74$; $H_5 = 0.82$. Як бачимо показник Херста для всіх п'яти сигналів є більшим 0,5, але менше за 1, а отже всім сигналам властива хаотична поведінка. Здійснено порівняння результатів, які дали розроблені програми і пристрій обчислення показника Херста. Для аналізу було взято 3 випадкових сигнали: y_1 , y_2 , y_3 . Результати виконання програм дали такі результати: для y_1 показник Херста рівний $H = 0,85$; для y_2 – $H = 0,80$; для y_3 – $H = 0,85$.

При введенні даних в пристрій на виході ми отримали значення дещо відмінні від значень, які дають програми. Так при введенні першого масиву даних в результаті отримуємо значення показника Херста $H=0,92$, для другого масиву даних – $H=0,83$, для третього масиву – $H=0,87$. Аналізуючи дані значення, бачимо, що в першому випадку пристрій дає похибку, яка рівна 0,07, для другого масиву даних різниця між результатами експерименту, що дають програма і пристрій рівна 0,03, відповідно для третьої вибірки – 0,02.

Аналізуючи похибки, можна зробити висновок, що даний пристрій має похибку обчислень в межах від 0,02 до 0,07. Як бачимо з результатів експериментів, аналітичний метод знаходження показника Херста є точним і набагато легшим за своїм виконанням, але він ретроспективний. Проте пристрій має також як свої мінуси так і плюси. Як зазначалося вище, головним недоліком пристрою є похибка результату, перевагою можна назвати те, що він може використовуватись в реальному часі на промисловому об'єкті для прогнозування зміни певного параметра чи технологічного процесу загалом, а також для виявлення розладнання.

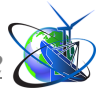


Висновок.

Для дослідження стохастичних сигналів на хаотичність у вимірювальних каналах системи автоматичного керування було розроблено алгоритм розрахунку показника Херста, програмне забезпечення і удосконалено пристрій пошуку коефіцієнта хаотичності, розроблений в пакеті програм Matlab 6.5. На основі проведених досліджень всі сигнали, що розглядалися, характеризуються повною хаотичністю. Це дає змогу з врахуванням особливостей технологічного процесу виявити момент зміни умов буріння (розладнання) за допомогою обчислення показника Херста в реальному часі.

Література:

1. Семенцов Г.Н. Ідентифікація хаотичних послідовностей за допомогою показника Херста / Г.Н.Семенцов, О.В.Фадєєва // Науковий вісник ІФНТУНГ. - 2006. – №2(14). - С.113-126.
2. Горбійчк М.І. Математичні методи оптимізації: [навч. посіб.]. Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. — 302 с.
3. Li T.Y. Period three implies chaos / T.Y.Li, J.A.Yorke // Amer.Math.Mothly 82. – 1975. - P. 985-992.
4. Kloeden P.E. Chaotic iteration of fuzzy sets / P.E.Kloeden // Fuzzy Sets and Systems 42. – 1991. – P. 37-42.
5. Sokolov A. Investigation of Chaotic Behavior of Fuzzy Takagi-Sugeno Model with Regard to Simulation and Control of Technological Processes / A.Sokolov, M.Wagenknecht // Scientific Report. Univ. of Zittau/Goerlitz IPM, 2003.
6. R.Kempf. Regularity and chaos in recurrent fuzzy systems / R.Kempf, J.Adamy // Fuzzy Sets and Systems, vol. 140,2003. - P.259-284.
7. "Crippled No Longer: Matlab Now Runs on AMD CPUs at Full Speed - ExtremeTech". – Режим доступу: <http://www.extremetech.com>. Retrieved October, 29. – 2020.



Abstract. The article considers the problem of early detection of disturbances in nonlinear control objects using the example of the well drilling process. An approach to identifying and analyzing chaotic behavior of the system is proposed, which allows to increase the efficiency of monitoring and diagnostics of the drilling process. Particular attention is paid to assessing the level of chaoticity of the drilling process by analyzing time series and detecting changes in its dynamics.

One of the key aspects of the study is the task of restoring the Hurst index, which allows to assess the degree of correlation properties of time series of drilling parameters and to detect early signs of instability or disturbances in the system. For this purpose, appropriate mathematical support has been developed, which includes methods of signal processing, fractal analysis and adaptive data filtering.

Key words: chaos identification, control object, uncertainty, disorder, Hurst exponent, real time.

Статтю надіслано: 24.02.2025 г.

© Зварич Г.Г., Матеїк Г.Д.