

УДК 681.5.015:622.24

Семенцов Г.Н., д.т.н., проф., Гутак О.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

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

У статті досліджено теоретико-методологічні засади ідентифікації хаотичної поведінки нелінійних об'єктів керування, що функціонують за умов невизначеності та наявності завад на прикладі технологічного комплексу, призначеного для буріння свердловин. Визначено основні перешкоди на шляху ідентифікації поведінки цього об'єкта, зокрема, розвиток об'єкта в часі, змінний характер апріорі невідомих нелінійностей, стохастичний характер збурень. Обґрунтовано необхідність розроблення методу виявлення розладнань на основі обчислення показника Херста. Запропоновано алгоритм та пристрій для обчислення показника Херста для ідентифікації хаотичної поведінки нестационарних об'єктів.

Ідентифікація, нелінійний об'єкт, хаотична поведінка, показник Херста, алгоритм, пристрій контролю.

Постановка проблеми. В умовах, коли ведеться буріння глибоких свердловин на сланцеві поклади та застосовуються високопродуктивні долота нового покоління типу РДС з проходкою на одне долото до 6000 м, особливої уваги набуває проблема виявлення розладнань в технологічному процесі, які проявляються як хаотична поведінка об'єкта керування, що функціонує в умовах апріорної та поточної невизначеності. Зміна умов буріння може бути викликана переходом долота межі пластів гірських порід з різними фізико-механічними і абразивними властивостями зон з аномально високими або аномально низькими пластовими тисками, продуктивних горизонтів тощо.

Проте, в існуючих системах контролю і управління процесом буріння методи виявлення розладнання і хаотичної поведінки об'єктів керування не стали ще основним чинником підвищення ефективності процесу буріння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Базові концептуальні положення теорії хаосу сформульовано такими зарубіжними вченими, як Е. Лоренц [1], Т.У. Лі, І.А. Йорк, М. Вагенкнехт [2], Р. Кемпф, І.А. Адамі [3], Р.Е. Клоеден [4]. Значні напрацювання в цій галузі науки мають і вітчизняні науковці Є.В. Бодяньський [5], О. Соколов [6] та ін.

Водночас, узагальнення напрацювань з означеної проблематики, накопичений досвід та отримані результати щодо ідентифікації хаотичної поведінки нелінійних об'єктів керування дозволяють зробити висновок про незавершеність досліджень у цьому напрямі та актуалізують потребу розгляду зв'язку між розладнанням в технологічному процесі буріння і його хаотичною поведінкою.

Мета статті – розроблення методу і пристрою для ідентифікації хаотичної поведінки об'єктів керування, що функціонують за умов невизначеності та наявності завад на основі показника Херста.

Основні результати досліджень. Ідентифікація хаотичної поведінки об'єктів керування, що функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності щодо їхньої структури та параметрів, є важливим науково-прикладним завданням для нафтогазовидобувної галузі промисловості, зокрема для керування процесом буріння свердловин і розробки нафтових і газових родовищ [1]. 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 [3,10]. Вони не достатньо точно описуються за допомогою традиційних математичних моделей, прийятних 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 [1,7], 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 [1], а також теорія нейродинаміки, в основі якої лежать методи теорії штучних нейронних мереж, фракталів і хаосу [5]. Однією з перших моделей хаосу була модель Едварда Лоренса [1], яка була запропонована в шістдесятих роках минулого століття для дослі-

джені руху конвективних шарів в атмосфері у вигляді трьох нелінійних звичайних диференціальних рівнянь:

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

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 [1] 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. Саме такий фазовий портрет був названий «дивним атрактором».

Відомі також моделі хаосу для діагностування і прогнозування порушень біоелектричної активності [8,11], результатом досліджень хаотичної поведінки в базах правил моделей Такагі-Сугено, в моделях типу Мамдані [2,3,4,12] та ін.

Проте, оскільки теорія хаосу знаходиться на початковому етапі розвитку, наявні результати мають локальний характер. Невирішеною залишилась кількісна оцінка хаосу. У зв'язку з цим актуальною і доцільною є розробка теоретичних основ і математичного забезпечення обробки експериментальних даних в реальному часі на базі засобів обчислювального інтелекту, досліджування характеристик хаотичних і стохастичних часових послідовностей. Вирішенню цієї задачі сприяє використання показника Херста (Hurst exponent) [5], який дає змогу кількісно оцінити прояви хаотичної поведінки об'єкта.

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 [7]:

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

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, що вимірюється, обертання долота $N = F^\gamma n^\delta$;

$$k_2 = \alpha_1^* d^{\beta_1^*};$$

$$\alpha_2 = (\beta_1^* - \gamma_1 \beta_1^*);$$

$$\beta_2 = (\beta_1^* - \delta_1 \beta_1^*),$$

α_1^*, β_1^* – коефіцієнти моделі: $\frac{d\varepsilon^*}{dt} = \alpha_1^* \left(\frac{Fnd}{N} \right)^{\beta_2}$.

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 змінення властивостей (розладнань) об'єкта і системи керування. Ця проблема розглядалась у роботі [13] для двох випадків: коли апріорний розподіл моменту розладнання відомий і, коли апріорний розподіл моменту розладнання невідомий. Для другого випадку розглянуті алгоритми Пейджа, Неймана-Пірсона, алгоритм кумулятивних сум та ін.

В [7] були розглянуті методи і алгоритми виявлення моменту зміни умов буріння, які ґрунтуються на використанні рекурентного G -алгоритму кумулятивних сум, Z -алгоритму і комбінованого GZ -алгоритму.

Розглянемо тепер можливості виявлення моменту зміни умов буріння, тобто моменту розладнання за допомогою обчислення показника Херста в реальному часі. Він дозволяє вирішувати проблеми раннього виявлення змінення властивостей об'єктів керування і використовується для діагностування та прогнозування порушень [8]. Оскільки величини F, n , які входять до математичної моделі (2), суттєво змінюються в часі, причому випадково [14], 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

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

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

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 $n = \text{const}$. Це свідчить про те, що виявлення розладнань процесу буріння як нелінійного динамічного об'єкта керування, що функціонує за умов невизначеності щодо своїх параметрів і структури, та при цьому демонструє як хаотичну поведінку [14], яка викликана власними характеристиками, так і стохастичну, яка викликана наявністю зовнішніх збурень, є важливим науково-практичним завданням. 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 [5, 8, 11]

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

де k – дискретний поточний час;

$R(k)$ – розмах послідовності накопичених відхилень $x(i, k)$, що обчислюється відповідно до

$$R(k) = \max_{1 \leq i \leq k} x(i, k) - \min_{1 \leq i \leq k} x(i, k);$$

$S(k)$ – середньоквадратичне відхилення;

α – невід'ємний параметр, що обирається у загальному випадку суто із емпіричних припущень.

Саме коефіцієнт H і отримав назву показника Херста. Середньоквадратичне відхилення визначається за формулами

$$S(k) = \sqrt{D(k)}, \quad (7)$$

$$S(k) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (y(i) - \bar{y}(k))^2}, \quad (8)$$

де $D(k)$ – дисперсія послідовності $y(i)$;

$\bar{y}(k)$ – середнє значення дискретної послідовності $y(i)$.

Формула для визначення середнього значення дискретної послідовності наступна

$$\bar{y}(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y(i). \quad (9)$$

Поточне середнє значення дискретної послідовності визначається

$$\bar{y}(i) = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i y(j), \quad (10)$$

Визначаємо послідовність накопичених відхилень $x(i, k)$, що обчислюється відповідно

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

Отже, показник Херста визначається за формулою

$$H(k) = \log_{ak} \left(\frac{R(k)}{S(k)} \right). \quad (11)$$

Ці всі формули використовуються для стаціонарних об'єктів.

Для нестаціонарних об'єктів запропоновано [5] метод обчислювання показника Херста на ковзному вікні. Послідовність розрахунку наведена нижче:

$$\frac{\bar{R}(k)}{\bar{S}(k)} = w^H, \quad (12)$$

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

$$\bar{S}(k) = \sqrt{\frac{1}{w} \sum_{i=k-w+1}^k (y(i) - \bar{y}(k))^2}. \quad (13)$$

Формула для визначення середнього значення дискретної послідовності наступна

$$\bar{y}(k) = \frac{1}{w} \sum_{i=k-w+1}^k y(i). \quad (14)$$

Поточне середнє значення дискретної послідовності визначається так

$$\bar{y}(i) = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i y(j). \quad (15)$$

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

$$x(i, k) = \sum_{i=k-w+1}^k (y(i) - \bar{y}(i)). \quad (16)$$

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

$$R(k) = \max_{k-w+1 \leq i \leq k} x(i, k) - \min_{k-w+1 \leq i \leq k} x(i, k), \quad \bar{R}(k) = \frac{1}{w} \sum_{i=k-w+1}^k R(i), \quad (17)$$

$$\bar{S}(k) = \frac{1}{w} \sum_{i=k-w+1}^k S(i). \quad (18)$$

Отже, показник Херста для нестаціонарних об'єктів визначається за формулою

$$H(k) = \log_w \left(\frac{\bar{R}(k)}{\bar{S}(k)} \right). \quad (19)$$

Розроблено блок-схему алгоритму обчислення показника Херста для нестаціонарних об'єктів (рис. 1).

Розроблено програми, які реалізують алгоритм обчислення показника Херста для нестаціонарних об'єктів в середовищах Matlab, PASCAL.

За допомогою даних функціональних блоків в пакеті Simulink 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).

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 $netsum2$.

$netsum \rightarrow gain \rightarrow netsum1 \rightarrow unit\ delay \rightarrow netsum$ – реалізує функцію знаходження середнього значення вхідного масиву. На виході $netsum2$ 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 на рис. 3.

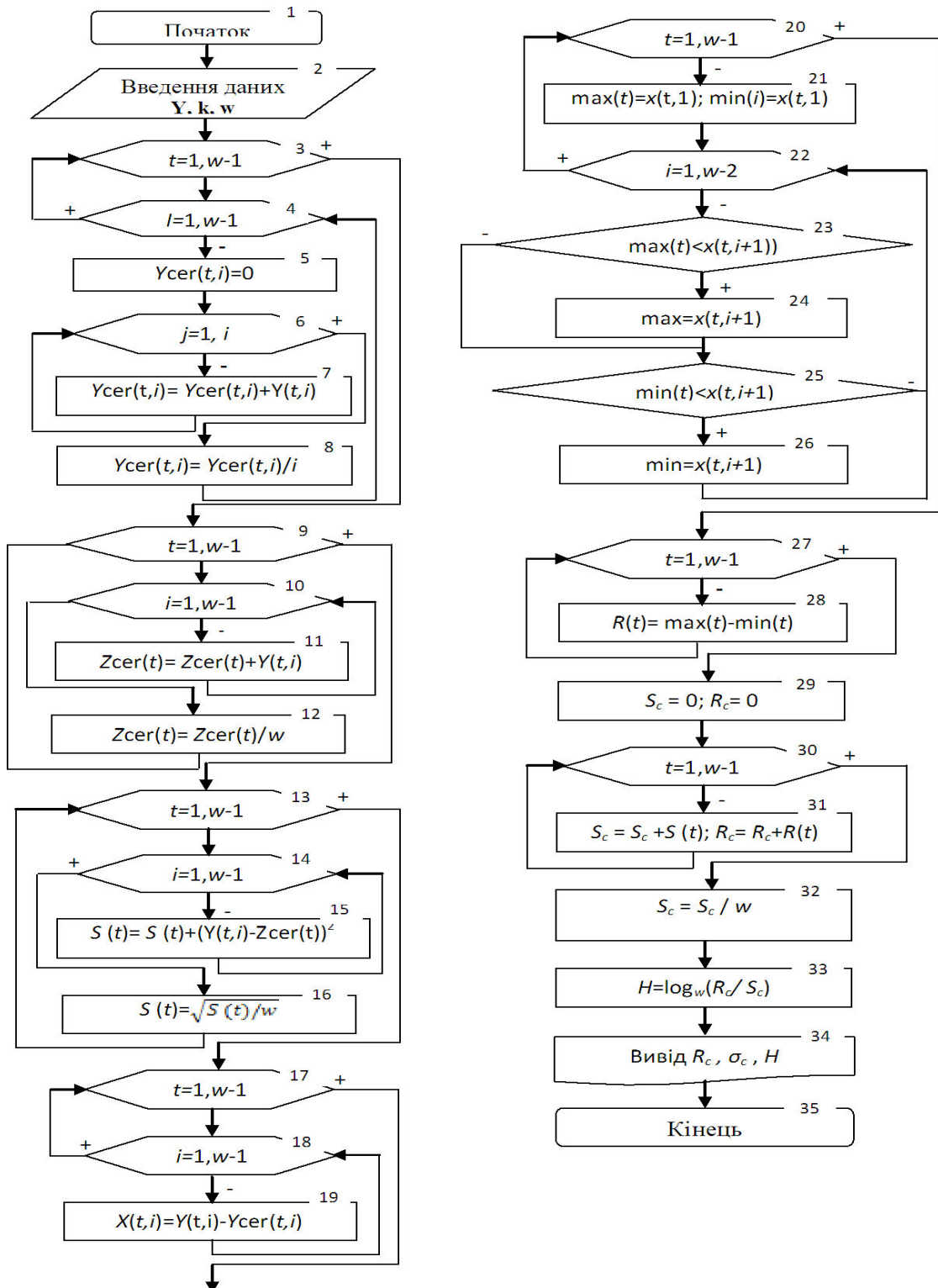


Рис. 1. Блок-схема алгоритму обчислення показника Херста для нестационарних об'єктів

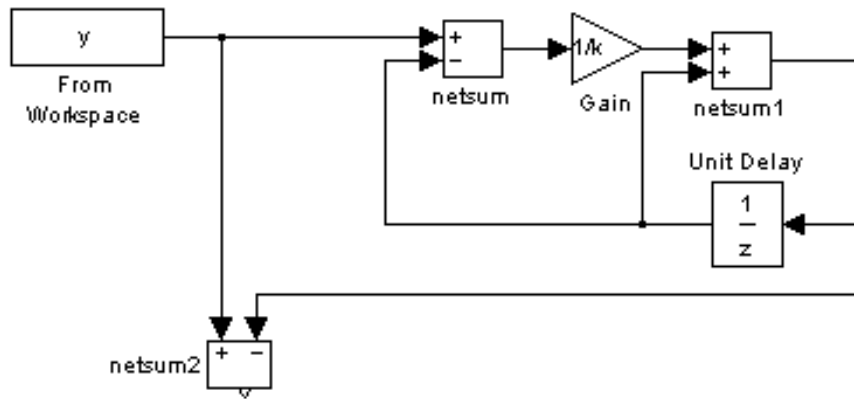


Рис. 2. Схема пристрою, яка реалізує $y(k+1) - \bar{y}(k+1)$

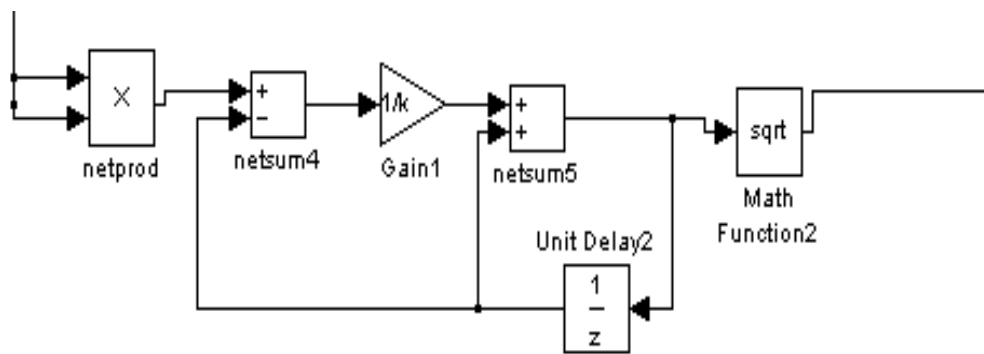


Рис. 3. Схема пристрою, яка реалізує знаходження D і S

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.

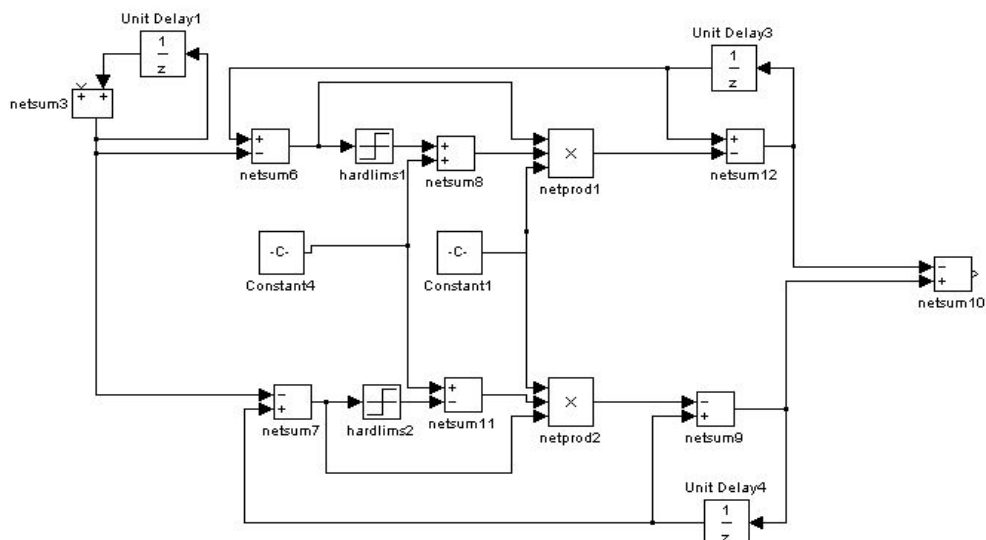


Рис. 4. Схема частини пристрою, яка реалізує знаходження $x(i, k)$ і $R(x)$

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, отримуємо пристрій розрахунку показника Херста (рис.5).

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.

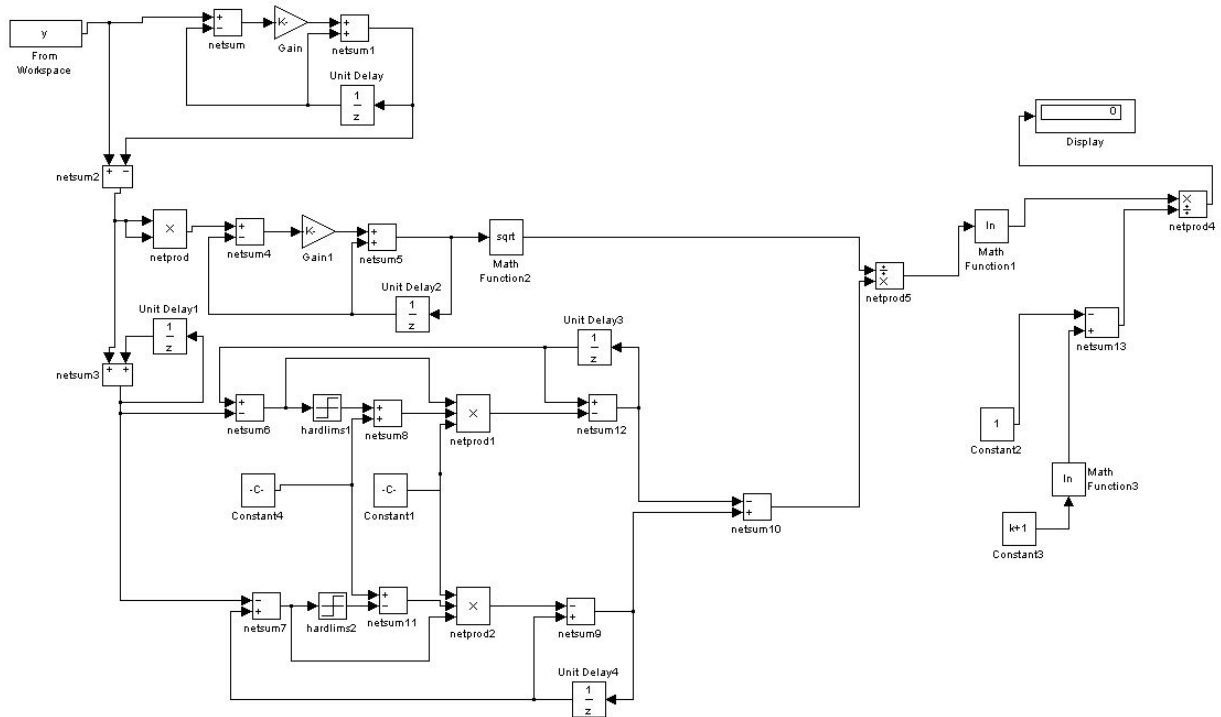


Рис.5. Пристрій для обчислення показника Херста

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: $H1 = 0.64$; $H2 = 0.86$; $H3 = 0.75$; $H4 = 0.74$; $H5 = 0.82$.

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 розроблено алгоритм розрахунку показника Херста, програмне забезпечення і удосконалено пристрій пошуку коефіцієнта хаотичності, розроблений в пакеті програм Matlab 6.5. На основі проведених досліджень встановлено, що всі сигнали, що розглядалися, характеризуються певною хаотичністю. Це дає змогу з врахуванням особливостей технологічного процесу виявити момент зміни умов буріння (розладнання) за допомогою обчислення показника Херста в реальному часі.

1. Соколов В.А. Синергетическое моделирование разработки нефтяных залежей / В.А.Соколов // Нефтяное дело. – 2006. – №1. – том 4. – С.95-103.

2. 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.

3. R.Kempf. Regularity and chaos in recurrent fuzzy systems / R.Kempf, J.Adamy // Fuzzy Sets and Systems, vol. 140,2003. - P.259-284.

4. Kloeden P.E. Chaotic iteration of fuzzy sets / P.E.Kloeden // Fuzzy Sets and Systems 42. – 1991. – P. 37-42.

5. Бодянский Е.В. Динамическая реконструкция хаотических сигналов на основе нейросетевых технологий / Е.В.Бодянский, И.П.Плисс, А.П.Чапланов // Радиоэлектроника и информатика, 2002. – №3(20). – С.62-64.

6. Sokolov O. Optimal control in the switched fuzzy models of management processes / O.Sokolov, M.Datcenko, O.Sokolov// Нафтогазова енергетика, № 2(20), 2013. – С. 152-158.

7. Горбійчук М.І. Оптимізації процесу буріння глибоких свердловин / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенцов. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 493 с.

8. Пліс І.П. Хаос-нейродинамічні нейронні мережі для діагностики і прогнозування порушень біоелектричної активності / І.П.Пліс, О.П.Чапланов, О.В.Шило; труды междунар.конф. «Теория и техника передачи приема и обработки информации» . – Харьков: ХНУРЭ, 2004. – С.311-312.

9. Гасанов Р.А. Разработка автоматизированной системы для прогнозирования показателей бурения на основе нейронных моделей / Р.А.Гасанов, Г.Н.Меджидов, Р.Б.Алекперов, К.С.Керимов, Н.А.Меджидов // Нефтяное хозяйство. – 2001, №10. – С.40-42.

10. Крижанівський Є.І. Мобільні установки для буріння, ремонту і обслуговування свердловин / Є.І.Крижанівський, Ю.В.Міронов, Л.І.Романишин. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 217 с.

11. Гончаренко З.В. Идентификация хаотических сигналов в реальном времени / А.П.Чапланов: труды междунар.конф. «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» . – Харьков: ХНУРЭ, 2003. – 532 с.

12. Li T.Y. Period three implies chaos / T.Y.Li, J.A.Yorke // Amer.Math.Mothly 82. – 1975. - P. 985-992.

13. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств случайных величин (независимые наблюдения, скалярный параметр) / И.В.Никифоров // Измерения, контроль, автоматизация. – 1988. – №2(66). - С.21-30.

14. 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.