УДК 681.3:664.1

ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОТИ СТАНЦІЇ ДЕФЕКОСАТУРАЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕОРІЇ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ

В.І. Заїка[1]*, аспірант;*
В.Д. Кишенько[2]*, канд. техн. наук, доцент,*

[1] Сумський технікум харчової промисловості НУХТ,
вул. Пролетарська, 60, 40030, Суми, Україна;
E-mail: zaikavladimir@gmail.com
[2] Національний університет харчових технологій,
вул. Володимирська, 68, 01601, Київ, Україна.

У статті розглядається аналіз часових рядів за допомогою алгоритмів нелінійної динаміки: визначення показника Херста, кореляційної розмірності, відновлення фазового простору.

Ключові слова*: детермінований хаос, фазовий простір, показник Херста, кореляційна розмірність, цукрове виробництво.*

ВСТУП

Відомі моделі керування станцією дефекосатурації цукрового заводу та традиційні аналітичні методи аналізу функціонування і прогнозування поведінки цього складного об’єкта при їх використанні все частіше стикаються з проблемами, викликаними недостатньою ефективністю реалізації прикладних функцій АСУТП в реальних виробничих умовах. Одним із напрямків розвитку сучасних систем автоматизації та створення єдиного інформаційного простору підприємства для об’єктивної і оперативної оцінки стану підприємства, оперативного прийняття своєчасних і ефективних управлінських рішень є створення інтегрованих систем управління виробництвом, які вирішують задачу інтеграції традиційних АСУТП і АСУП [1,2].

Класичні, на основі концепції лінійності, підходи були розроблені для опису стійких і не радикально мінливих процесів, що змінюються в околі стану рівноваги. Традиційні моделі управління технологічними процесами і традиційні аналітичні методи аналізу показників ефективності і прогнозування все частіше і частіше натикаються на проблеми, що не мають ефективного вирішення в рамках відомих рішень.

У зв'язку із цим, останнім часом інтенсивно розвивається альтернативний підхід до аналізу нелінійностей, а саме підхід, що базується на теорії детерміністичного хаосу, який пропонує пояснення іррегулярному поводженню і аномаліям у системах, які, не є по своїй природі стохастичними.

Головна ідея застосування методів хаотичної динаміки до аналізу часових рядів полягає в тому, що основна структура хаотичної системи, що містить у собі всю інформацію про систему, може бути відновлена через вимірювання тільки однієї спостережуваної характеристики цієї динамічної системи, фіксованої як часовий ряд.

ПОСТАВЛЕННЯ ЗАВДАННЯ

В результатів наших досліджень встановлено, що зміни технологічного процесу сокоочистки відбуваються настільки інтенсивно, а їхні якісні показники бувають настільки непередбачуваними, що для аналізу і прогнозування показників якості очищення дифузійного соку як вихідних величин станції дефекосатурації, синтез нових аналітичних і обчислювальних підходів, які беруть свій початок у різних областях знань і є адекватними складній фізико-хімічній природі технологічних процесів, став насущною практичною необхідністю. Потрібно вивчати динаміку процесів, що відбуваються в багатокомпонентних дисперсних системах із лабільними властивостями продуктів, і розглядати причини та механізми виникнення нових режимів і дисипативних просторово-часових структур, оцінювати характерні масштаби і швидкості перехідних процесів, передбачати ймовірні зміни системи з метою забезпечення можливості керування важкопередбачуваними динамічними режимами, які виникають у складних технологічних системах, причому алгоритми керування повинні докорінно відрізнятись від класичних, враховуючи сучасні здобутки теорії нелінійної динаміки.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ХАОТИЧНОЇ ДИНАМІКИ

10. Підходи до проблеми аналізу нелінійностей

У теорії складних систем досліджуються, головним чином, нелінійні системи зі зворотнім зв'язком. Технологічний процес очистки дифузійного соку на станції дефекосатурації можна віднести до таких систем. Останні роки ознаменувалися підвищеним інтересом до пошуку нелінійних моделей, які могли б адекватно відтворювати складні патерни динамічних процесів, оскільки вже стало ясно, що лінійний підхід до аналізу вихідних параметрів не дозволяє змоделювати нерегулярне поводження складної системи, характерне для більшості технологічних процесів цукрового виробництва. Існує кілька конкуруючих підходів, які використовують ідею нелінійності. Традиційні моделі є стохастичними. Однак ті обмеження, які використовуються при побудові моделі з метою зробити її придатною для практичного використання, за своєю суттю, нівелюють внутрішню «складність», яка властива динамічному процесу [3, 4].

Інший підхід до аналізу складних систем заснований на теорії детермінованого хаосу [4]. Детермінований хаос пропонує пояснення нерегулярної поведінки та аномалій у системах, які не є стохастичними. Ця теорія представляє широкий вибір потужних методів для аналізу складних технологічних процесів, включаючи відновлення атрактора у фазовому просторі, обчислення показників Ляпунова, узагальнених розмірностей та ентропій, нелінійне прогнозування і редукцію шумів, а також тести на хаос.

У зв'язку із цим, останнім часом інтенсивно розвивається альтернативний підхід до аналізу нелінійностей, а саме підхід, що базується на теорії детермінованого хаосу, яка пропонує пояснення іррегулярному поводженню і аномаліям у системах, які, не будучи за своєю природою стохастичними, поводяться подібним чином. Теорія хаосу пропонує зовсім нові концепції і алгоритми для аналізу часових рядів технологічних змінних, які можуть привести до більш глибокого і повного розуміння процесів [5].

В роботі розглядається застосування теорії складних систем в аналізі показників технологічного процесу очистки дифузійного соку на станції дефекосатурації методами нелінійної динаміки.

Часовим рядом називається послідовність подій, значень параметрів технологічного процесу, спостережуваних через деякі, як правило, рівні інтервали часу. Далі, говорячи про часовий ряд, будемо мати на увазі послідовність значень контрольованих параметрів процесу сокоочистки.

11. Визначення показників часового ряду динамічної системи

У роботі розглянуті результати застосування лише одного методу, який дозволяє визначити наявність детермінованого хаотичного компонента в динаміці зміни вихідних показників станції дефекосатурації.

Головна ідея застосування методів хаотичної динаміки до аналізу часових рядів полягає в тому, що основна структура хаотичної системи, що містить у собі всю інформацію про систему, а саме атрактор динамічної системи (підмножина фазового простору, яка притягує траєкторії в межі нескінченного часу), може бути відновлена через вимірювання тільки однієї спостережуваної характеристики цієї динамічної системи, зафіксованої як часовий ряд. Згідно із методом Грасбергера і Прокаччі процедура реконструкції фазового простору і відновлення хаотичного атрактора системи при динамічному аналізі часового ряду зводиться до побудови так званого фазового простору з певною розмірністю.

Розмірністю вкладення m називається найменша ціла розмірність простору, що містить весь атрактор. Вона відповідає кількості незалежних змінних, які однозначно визначають усталений рух динамічної системи.

Множина, що відповідає дивному атрактору, фрактальна. Фрактальна множина (самоподібний об'єкт) - характеризується дробовою фрактальною розмірністю (точніше, цілим спектром по-різному визначених розмірностей, однакових для регулярних фракталів, але розрізняються для природних систем).

Важливою кількісною характеристикою атрактора, що несе інформацію про ступінь складності поводження динамічної системи, є кореляційна розмірність D_c. Алгоритм розрахунку D_c заснований на обчисленні кореляційного інтеграла, у якості якого виступає функція $C(\delta)$, для кожного δ рівна нормованому числу пар точок розглянутого об'єкта, відстань між якими не перевищує δ:

$$C(\delta) = \frac{1}{n^2}\sum \varepsilon(\delta - | y_i - y_j |), \tag{1}$$

де $\varepsilon(x) = \begin{cases} 0, & якщо \quad x \le 0, \\ 1, & якщо \quad x > 0. \end{cases}$

– функція Хевісайда для всіх пар значень i і j, якщо $i \neq j$, $|y_i - y_j|$ – абсолютна величина відстані між точками множини, $i, j = 1,2,3,\ldots,n$, де n - кількість точок.

Величина кореляційної суми залежить від δ: при відносно малих значеннях δ ця залежність має такий вигляд

$$C(\delta) \to \delta^{Dc} \tag{2}$$

при цьому досліджувана множина фрактальна, а величина D_c – кореляційна розмірність. Для практичного обчислення кореляційної розмірності на графіку $ln(C(\delta)) = f(ln\ (\delta))$ виділяють область лінійної залежності (області скейлінгу) і функція апроксимується прямою лінією методом найменших квадратів. Тоді тангенс кута нахилу графіка є розмірністю D_c.

Для відомої динамічної системи m і D_c легко визначити – адже відомі всі компоненти вектора змінних $X(t)=\{X_1(t),\ldots,X_m(t)\}$, які описують поведінку системи у фазовому просторі (так, для системи Лоренца D_c=2,05, m=3). Однак при вивченні природних систем, у тому числі технологічних процесів сокоочистки, зазвичай доводиться мати справу із сигналом, що виглядає досить складно і здається схожим на випадковий. Для технологічних об'єктів вимірювання всіх параметрів, що характеризують систему, неможливо – хоча б тому, що вони не всі відомі, або не є важливими. Однак Такенс показав, що можна відновити деякі властивості атрактора (наприклад, m і D_c) за часовою послідовністю (часовим рядом) однієї із складових вектора $X(t)$.

Методика заснована на побудові псевдоатрактора, де компонентами вектора служить сама послідовність, але взята з деякою часовою затримкою $Xp(t)=\{X(t),\ X(t+\tau),\ X(t+2\tau)...,X(t+(m\text{-}1)\tau)\}...$ Оскільки компоненти вектора, що характеризує динамічну систему, незалежні, то величина τ вибирається за першим значенням, при якому автокореляційна функція дорівнює 0 (або досягає мінімуму). Оскільки заздалегідь розмірність вкладення m невідома, то процедура зводиться до наступного:

– послідовно збільшують розмірність фазового простору і додають компоненти псевдовектора $Xp(t)$;

– при кожному m = 2, 3,...обчислюють кореляційну розмірність D_c і будують залежність $D_c(m)$. Спочатку при додаванні нових компонентів псевдовектора кореляційна розмірність росте. Це значить, що ми ще не досягли потрібної кількості вимірів, і, відповідно, потрібної складності, ступінь якої характеризує D_c;

– починаючи з деякої розмірності m, кореляційна розмірність D_c досягає насичення і перестає змінюватися. Значення m, при якому це відбулося, є оцінкою мінімальної розмірності вкладення, а значення D_c – оцінкою кореляційної розмірності атрактора.

Виходячи з визначення розмірності вкладення, вона відповідає числу незалежних змінних, що описують систему. Таким чином, відновлюючи розмірність вкладення, ми одержуємо інформацію про складність системи. Відповідно до цього є можливість відрізнити динамічну систему зі складним поводженням (яка характеризується кінцевим m), і випадковий (стохастичний) шум, що описується нескінченно більшим числом незалежних змінних.

Для повністю випадкової системи збільшення m на одиницю приводить до збільшення D_c також приблизно на 1, тобто $D_c \sim m$.

Відзначимо, що даний метод ставить певні обмеження до довжини ряду, якщо досліджувана система описується досить великим числом змінних.

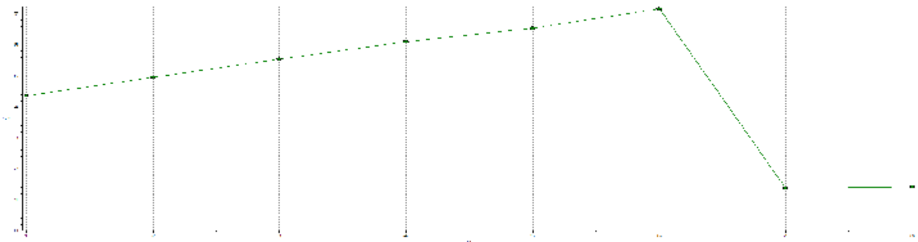
Існує оцінка залежності мінімальної необхідної довжини ряду N_{min} від кореляційної розмірності:

$$N_{\min} = 10^{2+0.4D_c} \tag{3}$$

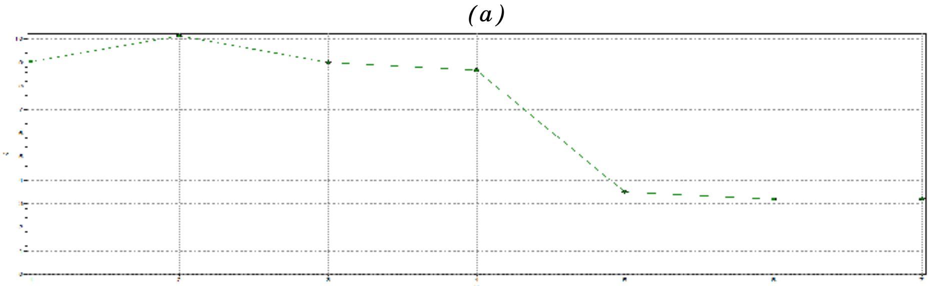
На практиці для з'ясування наявності хаотичної детермінованості в досліджуваному ряді експериментальних даних аналізують властивості кореляційної суми $C_m(r)$ і поводження кореляційної розмірності $D_m(r)$ залежно від розмірності вкладення m. Кореляційна сума $C_m(r)$ — це ймовірність того, що пари точок на відновленому атракторі в m — мірному фазовому просторі перебувають в межах відстані r одна від одної. Якщо графік функції $logC_m(r)$ відносно $log\ r$ має чітко виражену лінійну ділянку, це вказує на самоподібну геометрію атрактора, що у свою чергу говорить про хаотичну детермінованість. Кореляційна розмірність обчислюється як середній нахил зазначеного вище графіка, а помилка обчислення береться як половина різниці максимального і мінімального нахилу. При збільшенні розмірності вкладення кореляційна розмірність збільшується. Однак для хаотичних даних кореляційна розмірність буде, в остаточному насичуватися при її істинному значенні. Для випадкових даних такого насичення не спостерігається, і кореляційна розмірність росте монотонно. Щоб пояснити таке поводження кореляційної розмірності помітимо, що у рамках методу Грасбергера і Прокаччі кореляційна розмірність для реальних хаотичних систем є наближенням для фрактальної розмірності дивного атрактора. Фрактал, вкладений у простір з більш високою розмірністю, зберігає свою розмірність через нелінійні кореляції між точками. Тому для детермінованого хаотичного часового ряду кореляційна розмірність сходиться до її істинного значення. Для випадкової послідовності, як ми вже відзначали вище, точки відновленого «псевдоатрактора» утворять безструктурну хмару у фазовому просторі поза залежністю від його розмірності.

Ця величина кореляційної розмірності, яка характеризує ступінь взаємного впливу сусідніх точок графіка, відіграє важливу роль у теорії інформації і в інших областях сучасної науки. Розглянемо, наприклад, дві часові послідовності параметрів роботи станції дефекосатурації, які представляють собою історичні дані показників величини pH I-ї та II-ї сатурації.

Для обчислення кореляційної розмірності атрактора динамічної системи, який «керує» її динамікою варто будувати фазовий простір по детрендованих логарифмах розмірів. Результати обчислення кореляційних розмірностей залежно від розмірності фазового простору представлені на рис. 1.



(а)



(б)

Рисунок 1 – Залежність кореляційної розмірності від розмірності вкладення для величини pH I-ї (Correlation entropy=4.368) (а) та II-ї (Correlation entropy=3.187) (б) сатурації за одну добу роботи

Для дослідження хаотичного поводження і фрактальної структури проводилося обчислення показника Херста H (метод нормованого розмаху). Показник Херста $H=H(m)$, який характеризує фрактальну розмірність розглянутого часового ряду, одержуємо зі співвідношення [6] "розмах накопичених сум R – середньоквадратичне відхилення S" $R/S=(a\cdot m)H$, $H=H(m)$. Логарифмуючи обидві частини цієї рівності і прийнявши значення $a=1/2$, одержуємо послідовність координат (x_m, y_m) точок, H–траєкторії ординати яких $y_m=H(m)=log(r(m)/S(m)/log(m/2))$ і абсциси $x_m=m$, $m=3, 4, ..., n\text{-}1$.

Необхідна для фрактального аналізу ряду R/S — траєкторія представляється в логарифмічних координатах послідовністю точок, абсциси яких $x_m=log(m/2)$, а ординати $y_m=log(R(m)/S(m))$. З'єднуючи відрізком сусідні точки (x_m, y_m) та (x_m+1, y_m+1), $m=3, 4, ..., n-1$, одержуємо графічне подання R/S–траєкторії (H–траекторії) у логарифмічних координатах (у декартових координатах).

У відповідності зі значенням показника Херста H, всі часові ряди можуть бути класифіковані на три типи [6]:

Часові послідовності, для яких H більше 0,5, відносяться до класу персистентних — зберігають наявну тенденцію. Для процесу з H>0,5 тенденція до збільшення в минулому означає тенденцію до збільшення в майбутньому. І навпаки, тенденція до зменшення в минулому. Чим більше H, тим сильніше тенденція.

Значення H у околиці $0,4<H<0,6$ визначають собою область, що відповідає «хаотичному поводженню» часового ряду, як результат, найменшої надійності прогнозу. При H=0,5 ніякої вираженої тенденції процесу не виявлено, і немає підстав вважати, що вона з'явиться в майбутньому. Випадок H<0,5 характеризується антиперсистентністю — ріст у минулому означає зменшення в майбутньому, а тенденція до зменшення в минулому робить імовірним збільшення в майбутньому. І чим менше H, тим більше ця ймовірність. У таких процесах після зростання змінної зазвичай відбувається її зменшення, а після зменшення - зростання. Фрактальна розмірність D часового ряду визначається через показник Херста за формулою H = 2 –D. Фрактальна розмірність є показником складності поведінки об'єкта: аналізуючи змінювання фрактальної розмірності в різних сегментах часового ряду змінювання технологічного параметру, можна здійснювати діагностування і передбачення нестабільних станів, що є особливо важливим для задач керування.

Значення кореляційних розмірностей та відповідних розмірностей фазового простору технологічних параметрів pH I-ї та II-ї сатурації, отримані при дослідженні часових рядів історичних даних роботи станції дефекосатурації за 10 діб, наведені в таблиці 1.

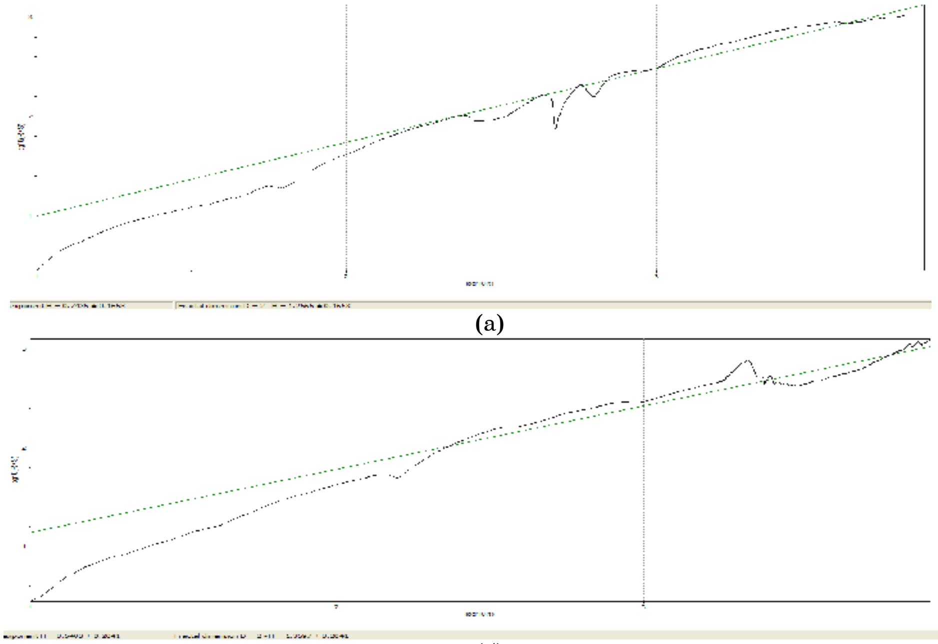
Таблиця 1 – Залежність кореляційної розмірності величини pH I-ї та II-ї сатурації за 10 діб роботи станції дефекосатурації

Доба роботи станції дефеко-сатурації	*Кореляційна розмірність (Correlation entropy) I-ї сатурації, D_2*	*Розмірність фазового простору, m*	*Кореляційна розмірність (Correlation entropy) II-ї сатурації, D_2*	*Розмірність фазового простору, n*
1	4,368	6	3,187	7
2	5,868	7	4,386	6
3	3,333	4	2,985	3
4	2,884	6	1,342	4
5	2,474	5	1,268	6
6	2,505	6	1,108	6
7	2,408	4	1,088	4
8	0,185	1	0,068	2
9	1,437	3	0,886	3
10	5,712	6	4,284	7

Перебування значення H у околиці 0,3±0,1, відповідні відрізки часового ряду свідчать про властиві розглянутому відрізку часового ряду властивості антиперсистентності, часовий ряд реверсує частіше, ніж ряд випадковий (часте повернення до середнього).

Твердження про те, що часовий ряд має довгострокову пам'ять можна обґрунтувати також за допомогою процедури перемішування елементів цього часового ряду. Якщо в даному часовому ряді випадковим чином перемішати його елементи і отриманий ряд подати на вхід алгоритму R/S-аналізу, то на виході цього алгоритму максимальне значення показника Херста і H-траєкторії виявиться явно менше в порівнянні зі значеннями *H* для вихідного часового ряду у випадку, якщо цей часовий ряд має довгострокову пам'ять (рис. 2).

В дослідженні обчислювалося значення показника Ляпунова. Він виявився більше нуля. Як відомо, наявність позитивного показника Ляпунова характеризує залежність динамічної системи від початкових даних, що є одним з головних ознак детермінованого хаосу. Саме ця властивість відповідає за нерегулярне поводження детермінованих хаотичних систем, які часто за «зовнішніми» проявами інтерпретуються як випадкові, не будучи такими.



(а)

(б)

Рисунок 2 – Показник Херста для тестових прикладів, відповідно до рисунку 1 (а) H=0.7435±0.1653 та (б) H=0.6403±0.2041

Значення показника Херста та фрактальної розмірності величин pH I-ї та II-ї сатурації, отримані при дослідженні часових рядів історичних даних роботи станції дефекосатурації за 10 діб, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Залежність показника Херста величини pH I-ї та II-ї сатурації за 10 діб роботи станції дефекосатурації

Доба роботи станції дефеко-сатурації	*Показник Херста I-ї сатурації, H*	*Фрактальна розмірність, D*	*Показник Херста II-ї сатурації, H*	*Фрактальна розмірність, D*
1	0,7435	1,2565	0,6403	1,3597
2	0,7775	1,2225	0,8848	1,1152
3	0,8864	1,1136	0,6486	1,3514
4	0,2836	1,7164	0,2424	1,7576
5	0,8602	1,1398	0,6688	1,3312
6	0,3697	1,6303	0,2862	1,7138
7	0,6108	1,3892	0,5428	1,4572
8	0,6848	1,3152	0,8886	1,1114
9	0,6845	1,3155	0,4646	1,5354
10	0,8462	1,1538	0,6862	1,3138

З показником Ляпунова безпосередньо зв'язаний горизонт передбачуваності хаотичної системи: за час обернено пропорційному показнику Ляпунова система повністю втрачає інформацію про свій початковий стан. Таким чином, прогноз динаміки хаотичної системи на часах більший горизонту передбачуваності в принципі неможливий.

ВИСНОВОК

У статті запропоновано застосування методу R/S-аналізу для виявлення детермінованого хаосу в динамічній системі станції дефекосатурації.

В результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень установлено, що поводження технологічної системи сокоочистки цукрового виробництва підкоряється законам теорії динамічного хаосу. Встановлено, що даний об'єкт є суттєво нестаціонарним: змінюється структура (розмірність вкладення), тому для ефективного керування необхідно використовувати адаптивні алгоритми, в яких за допомогою методів нелінійної динаміки ідентифікуються критичні змінювання.

Експериментальні дослідження часових рядів історичних даних роботи технологічного комплексу станції дефекосатурації за показниками Херста та Ляпунова дозволяють зробити висновок про можливість короткострокового прогнозування поведінки динамічної системи.

Підвищення глибини прогнозу можливе за рахунок аналізу інших параметрів системи, таких як витрата дифузійного соку та його якісні показники, витрата вапнякового молока на дефекатори, тиск сатураційного газу на сатураторах, а також за умови переведення технологічного процесу до класу персистентних – з наявною тенденцію.

SUMMARY

PREDICTION OF STATIONS USING DEFEKOSATURATSIYI DETERMINISTIC CHAOS THEORY

V.I. Zayika[1], V.D. Kishenko[2]

[1] *Sumy college food industry NUFT,*
E-mail: zaikavladimir@gmail.com
[2] *National University of Food Technologies,*

In the article the analysis of time series using nonlinear dynamics algorithms: determination of Hearst, correlation dimension, recovery phase space.

Keywords: *deterministic chaos, phase space, the rate of Hearst, correlation dimension.*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пупена О. М. Інтеграція систем управління / Пупена О. М., Ельперін І. В. // Харчова і переробна промисловість. – 2005. - №1. – С. 9-11.
2. Трегуб В.Г. Структуризація системи управління при проектуванні сучасних систем автоматизації цукрових виробництв / В.Г. Трегуб, А.П. Ладанюк // Цукор України. – 2005. – № 4. – С.34-36
3. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. - М.: Мир, 1988. — 240 с.
4. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. - М.: Мир, 1991. — 368 с.
5. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы/ Б.Мандельброт. - М.: Институт компьютерных исследований, 2002. — 656 с.
6. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. - М: Мир, 2000.- 305с.

Надійшла до редакції 16 травня 2012 р.