

УДК 0621.391

Розглянуті питання, що пов'язані з аналізом та підготовкою вхідної інформації, отриманої у виробничих умовах харчових виробництв, зокрема, в цукровій галузі, для організації ефективних дій в системах керування технологічними процесами. Ці задачі виконуються в рамках підсистем технологічного моніторингу, який передбачає встановлення ситуаційно значущих подій згідно із сценаріями керування. Вирішується проблема фільтрації часових рядів на основі вейвлет-перетворень та методів нелінійної динаміки і хаосу

**Ключові слова:** вейвлет-аналіз, колір шуму, фільтрація часових рядів

Рассмотренные вопросы, связанные с анализом и подготовкой входной информации, полученной в производственных условиях пищевых производств, в частности, в сахарной промышленности, для организации эффективных действий в системах управления технологическими процессами. Эти задачи выполняются в рамках подсистем технологического мониторинга, который предусматривает установление ситуационно значащих событий согласно сценариям управления. Решается проблема фильтрации временных рядов на основе вейвлет-преобразования и методов нелинейной динамики и хаоса

**Ключевые слова:** вейвлет-анализ, цвет шума, фильтрация временных рядов

The considered questions that connected with the analysis and preparation of the entrance information received under production conditions of food manufactures, in particular, in sugar manufactures, for the organisation of effective actions in control systems of technological processes. These problems are carried out within the limits of subsystems of technological monitoring which provides an establishment of situationally meaning events according to management scenarios. The problem of a filtration of time numbers on the basis of wavelet-transformations and methods of nonlinear dynamics and chaos dares

**Keywords:** the wavelet-analysis, colour of noise, a filtration of time numbers

# ФІЛЬТРАЦІЯ ВХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ПІДСИСТЕМАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЦУКРОВИМ ВИРОБНИЦТВОМ

**В. Д. Кишенько**

Кандидат технічних наук, доцент\*

Контактний тел.: 8 (044) 287-94-56, 8-050-696-54-11

E-mail: mjevgen@meta.ua

**Є. С. Проскурка**

Магістр\*

\*Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Національний університет харчових технологій  
вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01033

Контактний тел.: 8-050-351-29-60

E-mail: mjevgen@meta.ua

## 1. Вступ

Харчові виробництва, включаючи цукрову промисловість, відносяться до складних об'єктів керування [1]. Серед основних ознак таких об'єктів

можна виділити: високий рівень перешкод, значна невизначеність (характерна для більшості якісних показників сировини та продукції), складність поведінки, яка може мати навіть хаотичний характер. В таких умовах прийняття рішень по керуванню ви-

робничими процесами значно ускладнюється: виникає проблема знаходження необхідної альтернативи при умові ситуаційної залежності системи надання переваг.

Для забезпечення прийняття оптимального рішення необхідний повноцінний аналіз ситуацій, що склалися на об'єкті керування з урахуванням ретроспективи та прогнозу. Для цього застосовується підсистема технологічного моніторингу [2], яка включає такі групи блоків: обробка вхідно-вихідної інформації (виділення аномальних вимірювань, відновлення пропусків даних, фільтрації даних, визначення комплексних показників, фазифікації-дефазифікації), побудови необхідних моделей (структурна та параметрична ідентифікація), аналізу стану технологічного процесу (визначення типу технологічного режиму, класифікації ситуацій), технологічного прогнозування (прогнозування системних тенденцій, оперативне прогнозування, оцінка можливих наслідків керування, оцінка ефективності стратегії керування), зберігання інформації (бази даних та знань). Як бачимо, однією із основних задач технологічного моніторингу є фільтрація даних, отриманих від мікропроцесорних систем керування і в результаті лабораторних вимірювань. Враховуючи вищевказані особливості об'єктів керування харчових виробництв, доцільно застосовувати сучасні підходи до розв'язання задачі фільтрації (вейвлет-перетворення та методи нелінійної динаміки і хаосу).

## 2. Результати дослідження

Відомо, що часовий ряд складається з корисного сигналу та шумового компонента. В даній статі приведено спосіб фільтрації часових рядів за допомогою вейвлет-перетворень.

При використанні дискретного вейвлет-аналізу сигнал розкладається на апроксимуючі коефіцієнти, які представляють згладжений сигнал, і коефіцієнти, що деталізують, коливання.

Отже, перше припущення, шумовий компонент більше відображається в коефіцієнтах деталізації. Тому при видаленні шуму обробляють коефіцієнти деталізації.

Друге припущення полягає в тому, що шумовий компонент являє собою сигнал, менший за модулем, чим корисний. Тому найпростіший спосіб видалення шуму полягає в тому, щоб зробити нульовими значення коефіцієнтів, які менші деякого граничного значення. Ця процедура називається граничною обробкою (трешолдингом) коефіцієнтів.

Широке поширення отримали такі методи граничної обробки, як твердий трешолдинг і м'який трешолдинг [3]. При твердій граничній обробці зберігаються незмінними всі коефіцієнти, більші або рівні по абсолютній величині порогу  $\tau$ , а менші коефіцієнти перетворюються в нуль.

$$\{d_{j-m,k}\} = \begin{cases} 0, & |d_{j-m,k}| < \tau \\ d_{j-m,k}, & \tau \leq |d_{j-m,k}| \end{cases} \quad (1)$$

де  $m$  – глибина розкладу;  $j, k$  – індекси коефіцієнтів.

При м'якій пороговій обробці поряд зі перетворенням у нуль коефіцієнтів, за модулем менших, чим  $\tau$ , відбувається зменшення за модулем інших коефіцієнтів на величину  $\tau$

$$\{d_{j-m,k}\} = \begin{cases} 0, & |d_{j-m,k}| < \tau \\ |d_{j-m,k} - \tau|, & \tau \leq |d_{j-m,k}| \end{cases} \quad (2)$$

При вирішенні завдання шумоподавлення необхідно: оцінити спектральний склад шумового компонента, вибрати тип граничної обробки (трешолдинг) і критерій розрахунку самого порогу.

Таким чином, процедура видалення шуму з сигналу складається із трьох кроків.

1. Декомпозиція. Вибирається вейвлет і рівень розкладання  $N$ .

Обчислюється вейвлет-розклад вхідного сигналу до рівня  $N$ . Функцію  $f(t)$  можна розкласти на  $N$  рівнів за наступною формулою:

$$f(t) = cA_0 = cA_N + cD_N + cD_{N-1} + \dots + cD_1 \quad (3)$$

де  $\Psi_{j-1,k}(t)$  – материнська вейвлет функція;

$\Phi_{j-1,k}(t)$  – масштабна вейвлет функція;

$cA_N = \{a_{j-N,k}\} = \int_R f(t)\Phi_{j-N,k}(t) dt$  – коефіцієнти апроксимації глибини розкладу  $N$ ;

$cD_N = \{d_{j-m,k}\} = \int_R f(t)\Psi_{j-m,k}(t) dt$  – деталізуючі коефіцієнти глибини розкладу  $m=1..N$ ;

2. Гранична обробка коефіцієнтів, що деталізуються. Для кожного рівня від 1 до  $N$  вибирається поріг і застосовується гранична обробка коефіцієнтів, що деталізуються.

3. Реконструкція. Застосовується вейвлет-реконструкція, заснована на первісних апроксимуючих коефіцієнтах рівня  $N$  і модифікованих коефіцієнтах, що деталізують, рівнів від 1 до  $N$  [3].

$$f(t) \approx \sum_{k \in Z} a_{j-N,k} \Phi(t) + \sum_{k \in Z} d_{j-N,k} \Psi(t) + \dots + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \Psi(t) \quad (4)$$

За допомогою неперервного вейвлет-аналізу можливо спостерігати зміни в спектрограмах сигналу з шумом та очищеного сигналу від шумів (рис. 1 та рис. 2).

Неперервний вейвлет-аналіз здійснюється за формулою:

$$W_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{a,b}(t) f(t) dt \quad (5)$$

де  $\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ ,  $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  – функція материнського вейвлета,

$a$  – коефіцієнти масштабу;  $b$  – коефіцієнти зсуву;  $f(t)$  – функція, що досліджується.

Таблиця 1

Материнські вейвлети, що найчастіше використовуються для вейвлет-аналізу

haar (вейвлет Хаара)	
$\psi(x) = \begin{cases} -1, & 0.5 \leq x < 1 \\ 1, & 0 \leq x < 0.5 \\ 0, & x \geq 1 \end{cases}$	
mexh (вейвлет мексиканський капелюх)	
$\psi(x) = (1-x^2) \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$	
morl (вейвлет Морле)	
$\psi(x) = C \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \cdot \cos(5x)$ <p style="text-align: center;">C – константа, використовується для нормалізації</p>	

Результатом неперервного вейвлет-аналізу є трьохвимірний графік, осями якого є час (t), масштаб (a) та коефіцієнти неперервного вейвлет-перетворення (Wa,b), що потім проєктуються на площину і формують спектрограму з осями масштабу (a) та часу (t).

В таблиці 1 представлені материнські вейвлети, які застосовувалися для аналізу часових рядів цукрового виробництва.

Для неперервного вейвлет-аналізу сигналу витрати дифузійного соку на ділянці дефекосатурації цукрового заводу, використовувався материнський вейвлет Добеші другого порядку.

Сплески в нижній частині спектрограми (рис 1б) вказують на наявність шуму в сигналі.

Вибір аналізуючого вейвлета для аналізу сигналу, як правило, визначається тим, яку інформацію потрібно отримати із сигналу.

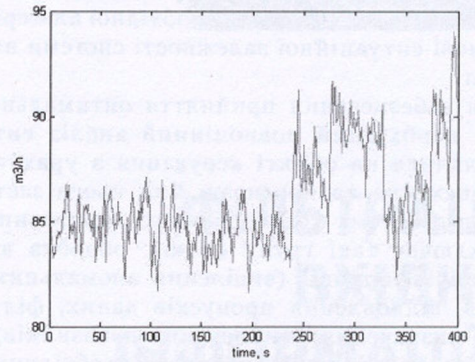
Кожний вейвлет має характерні риси в часі і у частотному просторі.

Формула материнського вейвлета Добеші задається наступним чином:

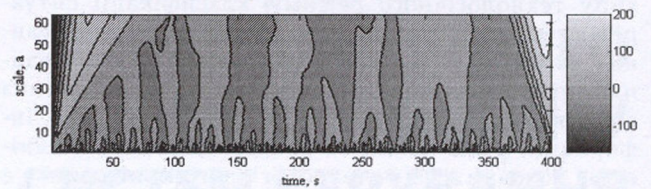
$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2M-1} g_k \varphi(2\pi - k) \quad (6)$$

$$\text{де } g_k = (-1)^k h_{2M-k-1}, \quad \varphi = \begin{cases} 0, & \pi < 0 \text{ і } \pi \geq 1 \\ 1, & 0 \leq \pi < 1 \end{cases}$$

M (ціле число) – число коефіцієнтів h.



а – графік сигналу витрати дифузійного соку



б – спектрограма вейвлет-аналізу сигналу

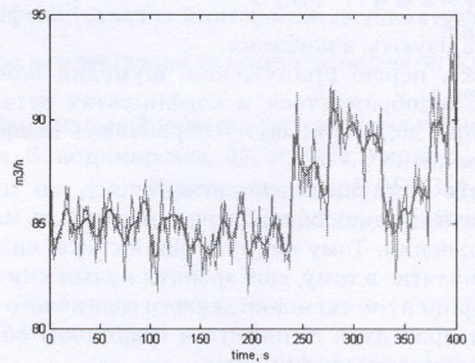
Рис. 1. Неперервний вейвлет-аналіз сигналу витрати дифузійного соку на ділянці дефекосатурації цукрового заводу

На рис. 2а товстою лінією показаний сигнал, очищений від шуму при використанні вейвлета Добеші другого порядку.

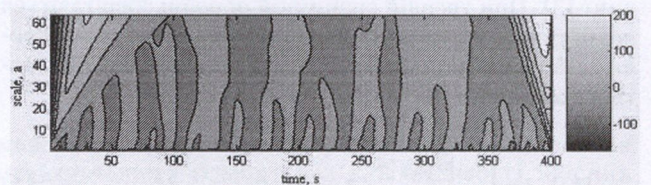
На спектрограмі рис. 2б відсутні сплески в нижній частині, що вказує на відсутність шуму в сигналі.

Враховуючи стабільність частотних спектрів промислових шумів, був проведений аналіз часових рядів технологічних параметрів цукрового виробництва з метою виявлення забарвлення шумів.

Для аналізу кольору шуму в сигналі використовувався коефіцієнт Херста [4].



а – сигнал витрати дифузійного соку



б – спектрограма очищеного сигналу

Рис. 2. Сигнал витрати дифузійного соку

Одним із способів обчислення коефіцієнта Херста  $H$  є аналіз так званої  $R/S$  статистики (нормованого розмаху). Позначимо через  $\xi_i$  - член часового ряду, тоді середнє значення ряду за час  $\tau$ :

$$M[\xi] = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi_i \quad (7)$$

Одержимо новий (кумулятивний) ряд, що представляє суму за час  $\tau$  щодо середнього значення  $M[\xi]$ :

$$X(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi_i - M[\xi], \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (8)$$

При цьому діапазон між максимальним і мінімальним значенням  $X(t, \tau)$  за час  $\tau$  позначається  $R(\tau)$ :

$$R(\tau) = \max(X(t, \tau)) - \min(X(t, \tau)), \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (9)$$

Тоді  $R/S$  статистика визначається безрозмірним відношенням діапазону

$R(\tau)$  до стандартного відхилення  $S(\tau)$ :

$$R/S = \frac{R(\tau)}{S(\tau)} = \frac{R(\tau)}{\sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi_i - M[\xi])^2}} \quad (10)$$

Херст показав, що багатьом природнім процесам справедлива залежність:

$$M \left[ \frac{R(\tau)}{S(\tau)} \right] \sim c \cdot \tau^H \quad (11)$$

де  $c$  - позитивна константа, не залежна від  $\tau$ .

Варто помітити, у випадку  $0.5 < H < 1$  говорять про персистентність процесу або про те, що процес має **тривалу пам'ять**. Інакше кажучи, якщо протягом деякого часу в минулому спостерігалися позитивні збільшення процесу, тобто відбувалося збільшення, то й надалі в середньому буде відбуватися збільшення, тобто, імовірність того, що процес на  $i+1$  кроці відхиляється від середнього в тому ж напрямку, що й на  $i$ -му кроці настільки велика, наскільки параметр  $H$  близький до 1.

У випадку  $0 < H < 0.5$  говорять про **антиперсистентність** процесу. Тут високі значення процесу чергуються з низькими, і навпаки. Інакше кажучи, імовірність того, що  $i+1$  кроці процес відхиляється від середнього в протилежному напрямку (стосовно відхилення на  $i$ -му кроці) настільки велика, наскільки параметр  $H$  близький до 0.

При  $H=0.5$  відхилення процесу від середнього є дійсно випадковими і не залежать від попередніх значень, що відповідає випадку броунівському руху.

Вираз (11) може використовуватися для оцінки коефіцієнта  $H$  по часовому ряду. Для цього необхідно прологарифмувати дві частини виразу (11):

$$\log \left( M \left[ \frac{R(\tau)}{S(\tau)} \right] \right) \sim H \cdot \log(\tau) + \log(c) \quad (12)$$

і побудувати графік залежності  $\log \left( M \left[ \frac{R(\tau)}{S(\tau)} \right] \right)$  від  $\log(\tau)$ . Нахил прямої, що апроксимує дану залежність, і є експонента  $H$ , що характеризує часовий ряд, який досліджується [4].

З виразу (12) випливає:

$$H = \frac{\log \left( \frac{R(\tau)}{S(\tau)} \right)}{\log(\tau \cdot c)} \quad (13)$$

Значення  $c = 0.5$  виходячи з джерел [5].

Однієї з основних фрактальних характеристик числового ряду є колір шуму [6, 7]. Значення  $H > 0.6$  визначає собою чорний колір шуму, рис. 3.

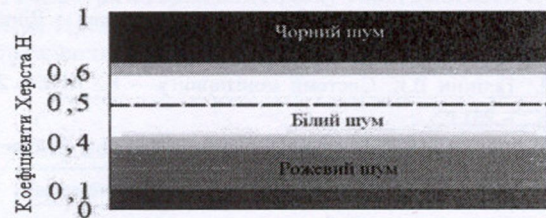


Рис. 3. Графік опису кольорів шуму за допомогою показника Херста

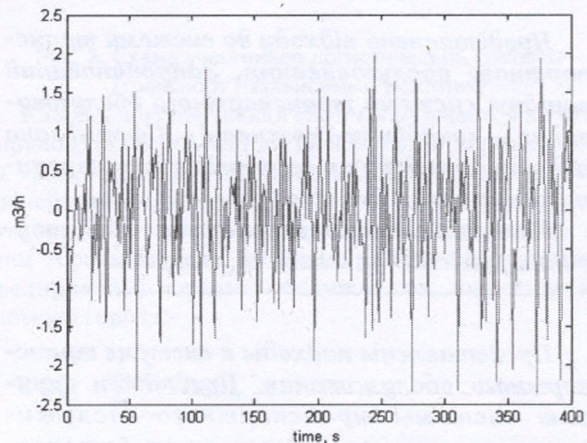


Рис. 4. Виділений шум з часового ряду витрати дифузійного соку на дефекосатурації (рожевий шум)

Чим більше значення  $H \in [0.6, 1]$ , тим більша трендова рівновага властива відповідному часовому ряду. Значення  $H$  у околиці  $0.4 < H < 0.6$  визначає собою нечітку [8] область білого шуму, що відповідає "хаотичному поведінню часового ряду". Значення  $H$  у околиці  $\sim 0.3 \pm 0.1$  визначає собою перебування часового ряду в області рожевого шуму. Рожевий шум говорить про властивий розглянутому числовому ряду властивості антиперсистентності. Значення  $H < 0.1$  відповідає коричневому шуму. Сірому шуму відповідає область не чітко розділеним областям чорного та білого шуму. [9]

Маючи сигнал з шумом та очищений сигнал витрати дифузійного соку можна дізнатися який шум присутній в сигналі. Для цього потрібно від сигналу з шумом відняти очищений сигнал, при цьому ми отримаємо сигнал шуму. Дізнавшись показник Херста у шумового сигналу ми дізнаємося, якого кольору шум.

Встановили (рис. 4), що для досліджуємих часових рядів витрати дифузійного соку показник Херста  $H=0.39$ , що відповідає рожевому шуму.

---

### 3. Висновки

---

Виявлені особливості часових рядів основних технологічних параметрів цукрового виробництва дають можливість створити необхідну базу даних для реалізації функціональних задач технологічного моніторингу та оптимального керування технологічними процесами виробництва цукру.

---

### Література

1. Ладанюк А.П. Основи системного аналізу. – Вінниця: Нова книга, 2004. – 176 с.
2. Галіцин В.К. Системи моніторингу. – К.: КНЕУ, 2000. – 231 с.
3. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК, 2005.

4. Петров В.В. То, что вы хотели знать о самоподобном телетрафике, но стеснялись спросить. – М.: МЭИ, ИРЭ, 2003.
5. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка. – М.: Мир, 2000. – 333 с.
6. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991.
7. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика». 2001. – 528с.
8. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
9. Перепелица В.А., Тамбиева Д.А., Комиссарова К.А. Исследование R/S-траектории одного временного ряда страхования. – Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ», <http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2-004/248.pdf>.