



jet.com.ua

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ ЖУРНАЛ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ISSN 1729-3774

6/6 (36)
2008

информационные технологии

інформаційні технології

information
technologies

новая экономика

нова економіка

new economy

промышленные технологии

промислові технології

industrial
applications

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ПИВА МЕТОДАМИ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ ТА ХАОСУ

В статті вирішуються задачі аналізу технологічних процесів виробництва пива за експериментальними даними. Виявлена складна поведінка технологічного об'єкта заторно-варочного відділення пивзаводу. Визначені основні показники хаотичності основних технологічних показників пивоваріння

М.Д. Місюра

Магістр, асистент*

Контактний тел.: 8 (044) 287-96-01, 8 (097) 972-76-00

e-mail: mdm@nuft.edu.ua

В.Д. Кишенько

Кандидат технічних наук, доцент*

*Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Національний університет харчових технологій

вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01033

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

e-mail: mdm@nuft.edu.ua

1. Вступ

Технологічні процеси харчових виробництв проявляють **складну поведінку** при відносно простих,

детермінованих внутрішніх законах функціонування. Моделі та методи, які використовуються при моделюванні поведінки складних технологічних систем, повинні враховувати їх важливі особливості, які від-

биваються в часових рядах спостережень за технологічними та режимними показниками (наприклад, високий рівень шуму, неоднорідність фазового простору, зміна параметрів системи із часом та ін.). При цьому особлива увага приділяється визначенню наявності нелінійностей та хаосу в динаміці, оскільки від цієї особливості кардинально змінюється поведінка технологічних об'єктів. Існують різноманітні тести і методи, які дозволяють встановити наявність нелінійностей та хаосу в часових рядах.

Різновид моделей і методів ставить перед дослідником проблему вибору: які сучасні моделі та методи доцільно використовувати при моделюванні складних технологічних систем. Тому задача досліджень полягає у комплексному аналізі технологічних процесів харчових виробництв для виявлення їх атрактивної поведінки з метою розробки алгоритмів прогнозування та управління.

Застосування нових тестів у комплексі із класичними методами нелінійної динаміки дозволяє істотно підвищити якість висновків про наявність або відсутність детермінованого хаосу в поведінці технологічних систем. Це дозволяє підвищити ефективність управління технологічними об'єктами, що є актуальною задачею.

До таких складних технологічних процесів відносяться процеси виробництва пива, що складаються з багатостадійних неперервно-періодичних процесів різної природи (теплові, масообміну, гідромеханічні, біохімічні), які є складними з точки зору керування [1].

2. Мета і завдання статті

Метою даної роботи є підвищення ефективності управління виробництвом пива шляхом аналізу технологічних процесів методами нелінійної динаміки та хаосу. Основні задачі, що забезпечують досягнення мети роботи, полягають у наступному [2]:

- спостереження за поведінкою системи в часі;
- отримання результатів спостереження, представлених у вигляді часових рядів;
- визначення основних показників хаотичності;
- аналіз поведінки технологічної системи.

Об'єктом дослідження є основні технологічні процеси виробництва пива.

Предметом дослідження є експериментальні дані, що представлені часовими рядами спостережень за значеннями технологічних показників.

Методи дослідження. Методи, що використовуються для вирішення поставлених задач, базуються на положеннях нелінійної динаміки і теорії хаосу, сучасної теорії автоматичного керування, методах системного аналізу, імітаційного моделювання.

3. Концепція і технологія моделювання складних систем

Розробка концепції моделювання складних технологічних систем ґрунтується на загальному підході теорії систем і системного аналізу. Проблема полягає в тому, що на сьогоднішній день теорія систем пропонує цілий

ряд визначень системи й кілька підходів до визначення складної системи. Елементи технологічних систем, що відносяться до одного типу, як правило, відрізняються один від одного значеннями технологічних показників, що характеризують їхній стан. Тому у визначення системи загального типу необхідно поряд із множиною елементів ввести множину властивостей елементів.

Система – це кіпцева множина функціональних елементів разом з їхніми властивостями й відносинами між ними, виділена із середовища відповідно до поставленої мети в рамках певного часового інтервалу [3]:

$$S_{\text{def}} \{A, V, R, Z, SR, \Delta T, \quad (1)$$

де A - множина елементів системи (підсистем, компонентів);

V - множина векторів властивостей елементів системи;

R - множина відносин між елементами множини A ;

Z - ціль, структура або множина цілей;

SR - зовнішнє середовище, з якого виділяється система;

ΔT - інтервал часу, протягом якого система зберігає свою цілісність.

Існує кілька підходів до визначення рівня складності системи. Ці підходи відрізняються один від одного тією характеристикою системи, що береться за основу класифікації. Так, цією основою може виступати кількість елементів системи, складність поведінки, рівень еволюційного розвитку. Найбільший інтерес представляє підхід – за основу класифікації прийняти ступінь організованості системи. За цією ознакою системи підрозділяються на добре організовані, погано організовані або дифузійні й системи, що самоорганізуються. Складність системи зростає при переході від добре організованих систем до погано організованих й при переході від дифузійних систем до систем, що самоорганізуються.

Аналіз ознак систем, які відносяться до класу харчових технологій, дозволяє зробити висновок, що більшість технологічних систем є такі, що самоорганізуються, тобто складними системами. Основна відмінність таких систем складається в присутності в системі активних елементів. Для моделювання добре організованих систем застосовуються традиційні методи аналітичного моделювання. При моделюванні погано організованих систем найпоширенішими методами є статистичні методи, методи теорії випадкових процесів.

Моделювання технологічних систем, що самоорганізуються, вимагає нових методів і моделей, які враховують основні риси таких систем:

- нестационарність;
- непередбачуваність поведінки;
- здатність до адаптації;
- здатність протистояти руйнівним тенденціям;
- здатність до альтернативної поведінки й до зміни власної структури.

Для моделювання таких систем доцільно застосовувати арсенал методів і моделей нелінійної динаміки й теорії фракталів.

Присутність у системі активних елементів – це не єдине джерело їхньої складності. Розглянемо джерела складності системи, опираючись на визначення систе-

ми (1), що дозволить забезпечити повноту переліку цих джерел.

До множини A відносяться технологічні агенти й технологічні об'єкти. Активність технологічних агентів і варіативність застосування технологічних об'єктів є джерелами складності технологічної системи. Технологічні агенти мають певну незалежність у межах системи, що дозволяє їм самостійно вести себе, прагнути досягти своїх індивідуальних цілей. Це приводить до конфліктності як між агентами, так і агентів із загальними цілями системи. Результати вирішення конфліктів залежать від великої кількості факторів, тому присутність активних технологічних агентів у системі є основним джерелом складності.

Елементи технологічної системи, що не є активними елементами, відносяться до технологічних об'єктів. Прикладами технологічних об'єктів є оснащення й устаткування підприємств, технології. Технологічні агенти використовують технологічні об'єкти у своїй діяльності різними способами, що дозволяє вважати технологічні об'єкти додатковим джерелом складності.

Властивості елементів технологічної системи V змінюються із часом, причому для властивостей технологічних об'єктів, ці зміни передбачувані й легко зрозумілі, у той час як більшість властивостей технологічних агентів змінюються в часі за складними нелінійними законами.

Структура зв'язків між елементами технологічної системи R також може виступати джерелом складності. Особливо у випадках, коли таких зв'язків багато й вони відрізняються високим рівнем різноманітності – зв'язки різні по своїй "силі" і типу (породження, підпорядкування, керування, партнерство і т.п.). У випадку, коли зв'язки змінюються в часі, можна говорити про динаміку структури системи.

Технологічні системи характеризуються тим, що їх ціль Z не є однозначною, вона як допускає декомпозицію, тобто має багаторівневу ієрархію цілей, так і містить у собі конфліктність – протиріччя між підцільми системи. Таким чином, структура цілей технологічної системи також є джерелом її складності.

Кожна технологічна система функціонує у зовнішньому середовищі SR . Постійні зміни зовнішнього середовища і їхній вплив на систему, нелінійність відгуку системи на дію зовнішніх факторів є джерелом складності, що змушує систему адаптуватися, змінювати своє поведінку й структуру.

Таким чином, джерелами складності технологічних систем виступають усі компоненти, наведені у визначенні (1), причому вплив різних джерел на результуючу складність системи не є адитивним: спостерігається своєрідний ефект посилення: наприклад, складність взаємодії із зовнішнім середовищем або складність структури цілей може підсилювати процес зміни властивостей технологічних агентів.

4. Комплексний аналіз нелінійних технологічних динамічних процесів, представлених часовими рядами

В даній статті представимо комплексний аналіз нелінійних технологічних динамічних процесів на основі часових рядів.

Проведення аналізу технологічних часових рядів методами нелінійної динаміки вимагає застосування комп'ютерної техніки, причому для підвищення ефективності проведеного аналізу й обґрунтованості його результатів необхідно використати комплексну методику аналізу. Створення повністю автоматизованого пакета аналізу неможливо, тому що цілий ряд процедур аналізу не піддається жорсткій формалізації, і їхня реалізація можлива тільки в інтерактивному режимі [3].

Алгоритм комплексного аналізу технологічних систем та процесів, представлених часовими рядами методами нелінійної динаміки (теорії хаосу) містить у собі такі основні етапи [4]:

1. Етап візуалізації, аналізу та попередньої обробки часового ряду.
2. Обчислення метричних характеристик, що дозволяють діагностувати тип динаміки.
3. Побудова прогнозу: або локального, шляхом пошуку близьких траєкторій, або глобального, шляхом реконструкції атратора або побудови предиктора (специфічної прогнозової функції).

Розглянемо етапи комплексного аналізу на прикладі часового ряду даних роботи заторно-варочного відділення пивзаводу. Застосування одного тесту не дозволяє робити обґрунтованих висновків про тип поведінки системи, що породжує цей ряд. Застосування комплексного аналізу, як буде показано нижче, дозволяє вирішити всі основні задачі аналізу часових рядів, включаючи одержання прогнозу.

Етап візуалізації складається з наступних кроків:

- побудова графіка часового ряду.
- побудова псевдофазового простору розмірності два (три).

Кожний із цих кроків дозволяє висувати деякі припущення про властивості часового ряду, перевіряти їх і виконувати певні дії, відповідно до виявлених властивостей ряду.

Крок 1. Побудова графіка ряду. На цьому кроці візуалізується графік залежності значень часового ряду від номера спостереження (від часу). Візуальний аналіз дозволяє визначити тип поведінки – регулярний чи випадковий, а також наявність тренду. Якщо поведінка ряду регулярна – значення прагнуть до деякої рівноваги або циклу, то подальший аналіз такого ряду методами нелінійної динаміки недоцільний. Якщо ряд виглядає як випадковий і при цьому містить лінійний або досить простий (експонентний, логарифмічний або ступеневий) нелінійний тренд, то необхідно, застосовуючи стандартні статистичні методи, очистити дані часового ряду від тренда.

Крок 2. Побудова псевдофазового простору. На цьому кроці візуалізується залежність поточних значень ряду від попередніх, що дозволяє висунути гіпотезу про наявність дивного атратора й джокера.

На рис. 1 наведений псевдофазовий простір зміни температури варки сусла.

Другим етапом комплексного аналізу є обчислення метричних характеристик, що дозволяють діагностувати тип динаміки. Цей етап складається з наступних кроків [5]:

- оцінка кореляційної розмірності;
- оцінка К-ентропії Колмогорова;
- оцінка показника Херста H .

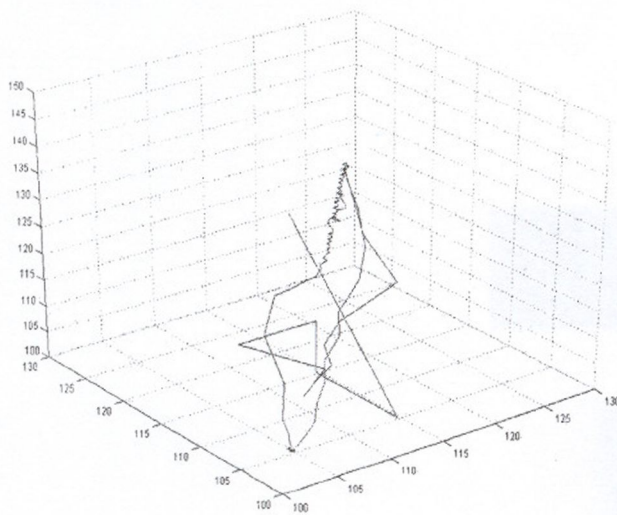


Рисунок 1. Псевдофазовий простір зміни температури варки суслу (°C)

При дослідженні процесів варки суслу на основі експериментальних даних було проаналізовано часові ряди роботи заторно-варочного відділення пивоварного заводу.

Нехай маємо часовий ряд експериментальних даних, які являють собою підрахунок деякої фізичної величини: $\{s_k\}_{k=0}^{M-1}$. Крок за часом залежить від періоду опитування датчика Δt , час $t = k \cdot \Delta t$. Кожна з величин, які аналізуються, є величинами, що характеризують проходження процесу в заторно-варочному відділенні.

Якщо система знаходиться в стаціонарному режимі, то фазова траєкторія проходить всередині атрактора. Для відновлення атрактора Такенсом був запропонований метод часової затримки координат, тобто в n -вимірному просторі будується послідовність точок виду:

$$x_k = (s_k, s_{k+\tau}, \dots, s_{k+(n-1)\tau}) \quad (2)$$

$$k = \overline{0, m-1}, m = M - (n-1)\tau,$$

де τ - часова затримка, n - розмірність вкладення.

В контексті оцінки роботи заторно-варочного відділення основний результат буде полягати в наступному: якщо $M \rightarrow \infty$, то множина точок $x_k \in R^n$ задає вкладення вихідного атрактора майже при будь-якому виборі спостережуваної змінної, якщо n - не менше подвійної розмірності вихідного атрактора. Для оцінки експериментальних характеристик реально досліджуваного атрактора з метою зменшення помилки, обумовленою обмеженістю набору експериментальних точок $\{s_k\}_{k=0}^{M-1}$, необхідно провести розрахунки при декількох різних значеннях M та n та досягати незалежності отримуваних оцінок характеристик від M та n в межах заданої точності.

Для малих кроків по часу Δt значення s_k та s_{k+1} будуть близькими, тому актуальним в даному контексті проблеми є вибір часової затримки τ . Необхідно обрати τ таким чином, щоб кореляція між

s_k та s_{k+1} була по можливості мінімальною, в такому випадку традиційним способом є обчислення автокореляційної функції часового ряду:

$$B(\tau) = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} (s_k - \bar{s})(s_{k+\tau} - \bar{s}), \quad (3)$$

$$m = M - \tau$$

Затримка τ обирається рівною часу першого перетину нуля автокореляційної функції, в іншому випадку обчислюється спектр потужності часового ряду, тобто швидкого перетворення Фур'є автокореляційної функції. У випадку, якщо в спектрі потужності присутні кратні піки, то затримка τ обирається за четверту періоду самої високої з домінуючих частот.

Для обчислення таких показників, як кореляційна розмірність, ентропія, спектр показників Ляпунова та інших характеристик атракторів, необхідно мати множину точок, визначених у фазовому просторі розмірності n і які належать атрактору. Число точок M в розрахунках кінцеве, але повинно бути достатньо великим.

$$M \geq M_{\min} = 10^{2+0,1D} \quad (4)$$

де D - це розмірність атрактора.

На сьогоднішній день для дослідження динамічних систем актуальним є обчислення показників атрактора деякої динамічної системи, математичні моделі якої невідомі, але при цьому, як правило, невідома і розмірність фазового простору. В цій ситуації маємо інформацію про поведінку в часі окремих змінних, які характеризують об'єкт управління процесів виробництва пива. До того ж інтервал часу експериментальної реалізації є обмеженим.

Шлях для вирішення поставленої проблеми був запропонований Такенсом. Доведено, що майже для всіх гладких динамічних систем за часовою реалізацією окремої спостережуваної змінної ми можемо сконструювати новий аттрактор, основні властивості якого будуть такими ж, як і у початкового.

Крок 3. Оцінка кореляційної розмірності. У випадку модельних даних, коли нам відома розмірність n фазового простору динамічної системи, і всі n координат кожної точки на атракторі, кореляційна розмірність D атрактора знаходиться наступним чином.

Розглянемо кореляційний інтеграл $C(r)$, який показує відносне число пар точок атрактора, які знаходяться на відстані не більший r

$$C(r) = \frac{1}{m(m-1)/2} \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=i+1}^{m-1} \Theta(r - \rho(x_i, x_j)) \quad (5)$$

де, Θ - функція Хевісайда; ρ - відстань в n -вимірному фазовому просторі; m - число точок на атракторі.

Якщо виконується умова $C(r) = r^D$, то D розраховується як кореляційну розмірність атрактора.

Справедливість наведеного степеневого закону обмежена значеннями r , достатньо малими в порівнянні з розмірами атрактора. При збільшенні r величина $C(r)$ досягає насичення $C(r) \rightarrow 1$ (при r , співрозмірними з розмірами атрактора). З іншої сторони, при дуже малих значеннях r число пар точок x_i, x_j , відстань між якими не перевищує r , стає малим в зв'язку із кінцевою кількістю точок на атракторі і статистика стає бідною).

$$\ln C(r) \approx D \ln r. \quad (6)$$

Отримуємо оцінку розмірності атрактора як тангенс кута нахилу прямої, яка апроксимує графік кореляційного інтегралу $C(r)$ в подвійному логарифмічному масштабі.

При розгляді часових рядів, знятих з датчиків вимірювання координат стану заторно-варочного відділення пивзаводу, ми не можемо знати розмірність фазового простору.

Тому всі розрахунки поводяться для декількох розмірностей фазового простору $n=1,2,3,\dots,N$. В даній роботі здійснюється відновлення атрактора за методом Такенса.

При цьому кореляційна розмірність атрактора $D(n)$ спочатку зростає, але потім, як правило, виходить на постійний рівень $D(n) \approx D$.

Таким чином, ми отримуємо шукану кореляційну розмірність D атрактора та оцінку розмірності фазового простору системи $n \leq 2D+1$. Обчислена оцінка кореляційної розмірності $D_2=1,713$ для параметру температури варки сусла (рис. 2).

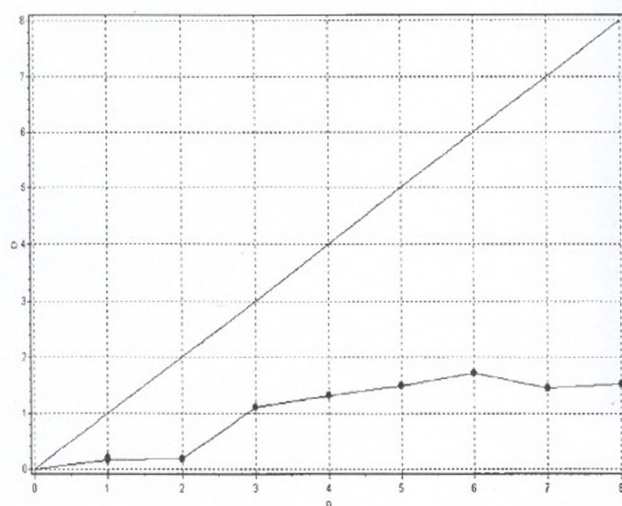


Рисунок 2. Кореляційна розмірність для параметру температури варки сусла

Крок 4. Оцінка К-ентропії Колмогорова. Кореляційна ентропія

К може бути обчислена достатньо просто, але при умові якщо для цього вже вирахований кореляційний інтеграл (5) і при її визначенні розглядається не тільки її залежність від відстані r , але й залежність від розмірності фазового простору n . При цьому вважають, що [6]:

$$C(r,n) \approx r^D \exp(-nK). \quad (7)$$

Звідки

$$K(r,n) = \ln \frac{C(r,n)}{C(r,n+1)}. \quad (8)$$

При цьому ентропія K апроксимується в обраному діапазоні r та n .

Отримана позитивна оцінка $K_2=0,114$ для температури варки сусла є додатковим свідченням того, що поведінка системи являє собою детермінований хаос (рис. 3).

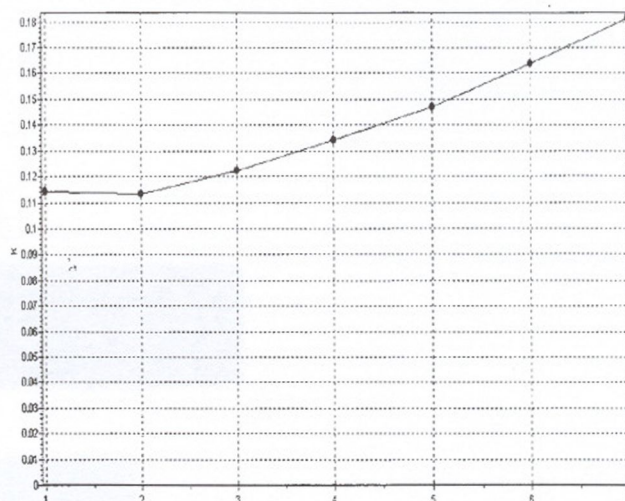


Рисунок 3. Кореляційна ентропія для параметру температури варки сусла

Крок 5. Оцінка показника Херста H . При визначенні значення показника Херста обчислюють відношення розмаху ряду до його середньоквадратичного відхилення R/S у задані моменти часу τ_k (рис. 4). Для прикладу, показник Херста для окремо взятої змінної – температури варки сусла рівний $H=0,8088$, що свідчить про персистентність цього параметру [6].

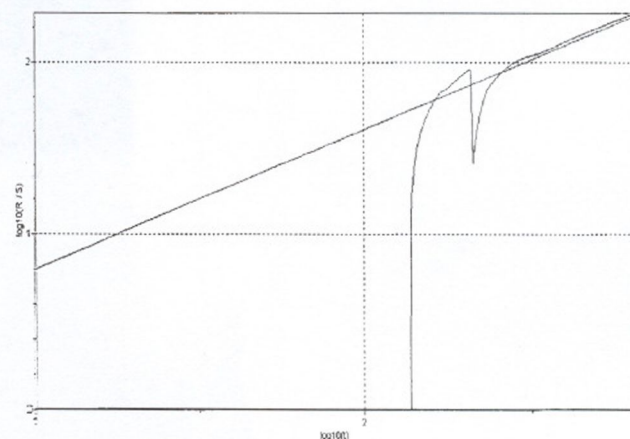


Рисунок 4. Залежність відношення розмаху ряду до його середньоквадратичного відхилення R/S у задані моменти часу для параметра температури варки сусла (логарифмічна шкала)

5. Висновки

Отже, на основі комплексного аналізу виробничих експериментальних даних заторно-варочного відділення пивзаводу, можливо зробити висновок про складну поведінку об'єкта дослідження. Експериментальні дослідження виявили особливості атрактивної поведінки технологічних процесів виробництва пива та методами нелінійної динаміки визначити показники хаотичності основних змінних технологічних процесів пивоварного виробництва.

Література

1. Домарецький В. А. Технологія солода та пива: Підручник для студентів вищих навчальних закладів освіти. – Київ: Урожай, 1999. – 544 с.
2. Кабанов В.А. Синергетические системы управления и самоорганизации //Вестник МЭИ. – 1996. – №2. – с. 29-34.
3. Праггиншвили И.В., Бурков В.П., Годигдзе И.А., Джавахадзе Г.С., Хуродзе Р.А. Системные закономерности и системная оптимизация. - М.: СИИГТЕГ, 2004. – 204 с.
4. В.А.Перепелица, А.Ю.Позднякова, Л.П.Сергеева Анализ экономических временных рядов методами теории хаоса // Труды международной научной конференции «Статистический и прикладной анализ временных рядов» (SAATS-97).– Брест–19-97.– с. 36–43.
5. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
6. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: КомКнига, 2006. – 240 с.