

Досліджено і проаналізовано вплив часових рядів з використанням методів нелінійної динаміки. Використовувались такі алгоритми як: показник Херста, кореляційна розмірність, відновлення фазового простору. Проведено розробку алгоритмів дослідження складних динамічних систем управління та реконструкцію атракторів на основі історичних даних роботи варочного відділення пивзаводу

Ключові слова: *детермінований хаос, фазовий простір, кореляційна розмірність, пивзавод, часові ряди*

Исследовано и проведен анализ влияния временных рядов с использованием методов нелинейной динамики. Использовались такие алгоритмы, как: показатель Херста, корреляционная размерность, восстановление фазового пространства. Проведена разработка алгоритмов исследования сложных динамических систем управления и реконструкцию аттракторов на основе исторических данных работы варочного отделения пивзавода

Ключевые слова: *детерминированный хаос, фазовое пространство, корреляционная размерность, пивзавод, временные ряды*

УДК 681.3:664.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31094

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АТРАКТОРІВ СКЛАДНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ ВАРОЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ

М. В. Чернецький

Аспірант*

E-mail: nickchernetski@mail.ru

В. Д. Кишенько

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: kvd1948@gmail.com

*Кафедра автоматизації процесів управління
Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська 68, м. Київ, Україна, 01033

1. Вступ

На сьогодні існує велика кількість моделей управління пивзаводом загалом, так і окремими його частинами окремо. В даній статті розглянемо тільки окрему, основну його частину – варочне відділення. Як вже зазначалось, існує багато математичних моделей, що описують даний об'єкт управління, також певний клас традиційних аналітичних методів аналізу та прогнозування поведінки цього складного об'єкта. Під час застосування цих традиційних методів все частіше зустрічаються з проблемою, що викликана недостатньою ефективністю реалізації прикладних функцій автоматичних систем управління технологічними процесами в реальних умовах виробництва [1].

Проаналізувавши цю проблему, було прийнято рішення, що для ефективної роботи системи автоматизації пивзаводу в реальних умовах необхідно створити єдиний інформаційний простір для всього підприємства для своєчасного, об'єктивного, а саме головне, ефективного управління і моніторингу технологічних процесів. Для швидкого прийняття рішення по оперативному управлінню створили інтегровані системи управління об'єктом, що дозволяють вирішити проблему інтеграції традиційних автоматичних систем управління технологічними процесами і автоматизованих систем управління підприємством.

Традиційні підходи для вирішення задач управління [2] пивоварним виробництвом розроблялись

на основі концепції лінійності, які були ефективні лише у випадках опису стійких процесів і таких, що радикально не змінюються. Класичні моделі управління технологічними процесами приготування пивного сусла і варки сусла та традиційні аналітичні методи дослідження і аналізу ефективності цих технологій зустрічаються з проблемами так званої переміжності, яка полягає в чередуванні детермінованих режимів із стохастичними і хаотичними, що не дозволяє організувати ефективні стратегії управління, адекватні такій складній поведінці об'єкта. Сучасний розвиток науки і техніки, а також умови жорсткої конкуренції дозволяють шукати шляхи вирішення цієї проблеми.

В результаті цього аналізу, останні кілька років ефективно і швидко розвивається альтернативний підхід для аналізу нелінійностей, а саме підхід, що заснований на теорії детермінованого хаосу. Цей підхід дає пояснення нерегулярному поведінженню об'єкта, вихід об'єкта за рамки відомих рішень і аномалій в системах управління, що по своїй природі не є стохастичними.

Суть методу заснований на ідеї використання методів хаотичної динаміки для аналізу часових рядів, і полягає у тому, що основна структура хаотичної системи, яка містить у своєму складі всю інформацію про саму систему, може бути відновлена через вимірювання тільки однієї спостережуваної величини даної динамічної системи, що відображається у вигляді часового ряду.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Прогрес у різних галузях виробництва потребує створення і впровадження нових технологій, методів отримання і переробки інформації і ефективного своєчасного прийняття управляючих рішень [3]. Пивоваріння не стало виключенням. З часом стало зрозуміло, що проводити технологічний процес, що базується на досвіді варщика не ефективно, потрібно створювати нові підходи [4]. Раніше дослідити і спрогнозувати вплив випадкових та хаотичних процесів на систему було неможливо, але з розвитком науки і техніки було створено нові технології і підходи [5], що дозволили розпочати дослідження таких впливів.

Була розпочата робота по дослідженню складних систем з хаотичною поведінкою [6]. Так, наприклад, було проведено дослідження впливу хаосу на турбулентні потоки [7], в економічній сфері [8] було детально досліджено прояви атрактивної поведінки. Таким чином, були створені необхідні передумови для аналізу складних технологічних процесів пивоваріння з метою створення ресурсоощадних систем синергетичного керування.

На основі проведених експериментальних досліджень та аналізу отриманих даних встановлено, що змінні технологічного процесу приготування пивного сусла змінюються настільки інтенсивно, а їх якісні показники бувають настільки непередбачуваними, що для прогнозування і аналізу роботи заторного апарату і сусловарочного котла і їх технологічних параметрів, як вихідних величин даного відділення, необхідно провести синтез нових аналітичних підходів на основі принципів нелінійної динаміки. Ці підходи беруть початок у різних галузях і областях знань і відповідають складній природі реальних технологічних процесів.

3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету визначення особливостей застосування методів хаотичної динаміки для аналізу часових рядів варочного відділення пивзаводу, а саме часових рядів температури затирання. Головна ідея полягає у тому, що основна структура хаотичної системи має у своєму складі інформацію про систему у вигляді атрактора динамічної системи. Атрактором називають підмножину фазового простору, що притягує траєкторії в межі нескінченного часу. Отже, цей атрактор може бути відновлений через спостереження тільки однієї спостережуваної величини даної динамічної системи, що відображена у вигляді фіксованого часового ряду. Відновлення фазового простору, за методом Грасберга і Прокаччі, зводиться до процедури реконструкції цього простору та відновлення хаотичного атрактора при динамічному аналізі часового ряду. Визначення властивостей атракторів дає можливість розробки ефективних алгоритмів ресурсоощадного управління технологічними процесами приготування пивного сусла.

Для такого дослідження і аналізу необхідне програмне забезпечення. Нами використовувались такі програмні засоби: програма Daplore компанії DATAN, набір модульних програм TISEAN, що були створені в інституті фізики і теоретичної хімії

університету міста Франкфурта Рейнером Хеггером, а також програма Fractan, розроблена в інституті математичних проблем біології РАН В. Сичовим. Також для фрактального аналізу використовували спеціальний набір програмних додатків програми MatLab – FracLab [9].

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- аналіз часових рядів методами нелінійної динаміки;

- виявлялись основні структури хаотичної системи, що містять у своєму складі всю необхідну інформацію про систему, а саме її атрактор, що може бути відновлений через вимірювання тільки однієї спостережуваної величини.

Для такого роду дослідження необхідно вивчити динаміку процесів, що відбуваються у багатокомпонентних дисипативних структурах із лабільними властивостями компонентів. Необхідно досліджувати і аналізувати причини виникнення і механізми реалізації нових режимів і дисипативних просторово-часових структур; проводити оцінку швидкості перехідних процесів; оцінювати масштаби і прогнозувати імовірні змінювання системи з метою забезпечення ефективного управління важкопрогнозованими динамічними об'єктами.

4. Матеріали та методи дослідження часових рядів варочного відділення і виявлення в них атрактивної поведінки

Дослідження проводили із застосуванням методу, що дає можливість визначити наявність детермінованого хаотичного компонента при зміні вихідних показників варочного відділення пивзаводу.

Ідея методу хаотичної динаміки до аналізу часових рядів побудована на тому, що основна структура хаотичної системи, що представлена у вигляді атрактора, може бути відновлена через одну спостережувану характеристику цього об'єкта.

Для дослідження динамічної системи актуальним є обчислення показників атрактора даної динамічної системи. Якщо виникає ситуація, коли невідома розмірність фазового простору і відсутні відомості про математичну модель, а в нашому розпорядженні тільки часовий ряд окремих змінних, що характеризують об'єкт управління.

Для обчислення таких показників, як ентропія, кореляційна розмірність, показники Ляпунова і Херста та інших показників атракторів необхідно мати множину точок, визначених у фазовому просторі розмірності n . Ці точки повинні належати атрактору [10].

Нехай будь-яка змінна процесу визначається динамічними дискретними рівняннями в просторі станів:

$$x(t+1)=F(x(t)), \quad y(t)=Q(x(t)), \quad (1)$$

де $x(t)$ - n -мірний вектор станів системи; $y(t)$ - вимірюваний (вихідний) процес; t – дискретний час; F , Q – нелінійні оператори.

Якщо лінеаризувати рівняння (1) в межах траєкторії руху, то виходить співвідношення:

$$x(t+1)=Ax(t), \quad y(t)=Cx(t), \quad (2)$$

де C – матриця розмірності $(1 \times n)$; $A = \frac{d}{dx} F(x, t)$ – матри-

ця Якобі розмірності $(n \times n)$, що визначає властивості стійкості траєкторії.

Далі необхідно побудувати фазову траєкторію системи, визначити її характеристику: стійка чи нестійка. Відповідні точки, до яких прямує система при зміні зовнішніх параметрів називають точками притягання. Мінімальна множина таких точок, до яких прагнуть більшість траєкторій називається атрактором. Для побудови атрактора за експериментальними даними можна використовувати метод Паккарда. Згідно з теоремою Такенса, знайдеться векторна функція Λ , який відображає простір станів системи в евклідовому просторі розмірності m :

$$z_i = \Lambda(x_i), \quad z_i \in R^m. \quad (3)$$

Також потрібно врахувати, що характеристики цих систем є інваріантними. Це дозволяє визначити їх за експериментальними даними, навіть тоді коли невідомі всі змінні динамічної системи. Вирахувати значення розмірності m можна за допомогою методів теорії симетрії [11].

Для визначення значень векторів z_i у просторі R^m за часовим рядом, Паккардом було запропоновано застосовувати вектори, одержані з елементів ряду за таким ж методом, що і рівняння авторегресії:

$$z_i = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+(m-1)}\}^T, \quad (4)$$

або

$$z_i = \{x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)\}^T, \quad (5)$$

де x_i – i -й елемент часового ряду, m – розмірність простору вкладення.

Отримана в результаті реконструкції траєкторія не повинна містити самоперетинань, але, самоперетинань у масиві дискретних точок z , як правило не буває, тому пошук зосереджують на близьких сусідах. Близькі сусіди – це пари векторів, які виявилися близькими в реконструкції, але їх прообрази перебувають далеко. Інакше кажучи припустимо, що $z_i^{(m)}$ і $z_j^{(m)}$ – два близьких сусіди розмірності m . Відповідні їх реконструкції розмірності $m+1$ мають вигляд z_i^{m+1} і z_j^{m+1} .

Для виявлення оптимального значення часу затримки τ застосовується підхід, що побудований на методиці теорії інформації, де використовується перший мінімум для значень x_i та x_{i+1} . За даними часового ряду проводимо побудову гістограм, що апроксимуються розподілами x_i та x_{i+1} .

Використовуючи гістограми розраховуємо ентропію та взаємну інформацію:

$$S = -\sum p_{ij}(\tau) \log_2 \frac{p_{ij}(\tau)}{p_i p_j}, \quad (6)$$

де p_i – імовірність знаходження точки в i -му інтервалі; $p_{ij}(\tau)$ – спільна імовірність

потрапляння x_i в i -й інтервал і потрапляння x_{i+1} в j -й інтервал.

Далі потрібно провести фільтрацію з використанням такого методу: для кожного вектору z_i отриманої реконструкції обчислюються найближчі сусіди $\|z_i - z_j\| < \epsilon$. Значення величини ϵ визначається в залежності від апіорних оцінок величини шуму або шляхом послідовного наближення. Для кожного вектора (4) скореговане значення z^* розраховується усередненням за всіма z' найближчими сусідами:

$$z^* = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z'_k. \quad (7)$$

Після проходження по всіх точках реконструкції траєкторії всі точки окрім перших і останніх $(m-1)/2$ будуть скореговані [12].

5. Результати дослідження часового ряду зміни температури затирання затору та їх обговорення

Було проведено дослідження часового ряду температури затирання з використанням відповідного програмного забезпечення і методикою, що наведена вище.

Аналізувались часові ряди окремого етапу процесу затирання (рис. 1).

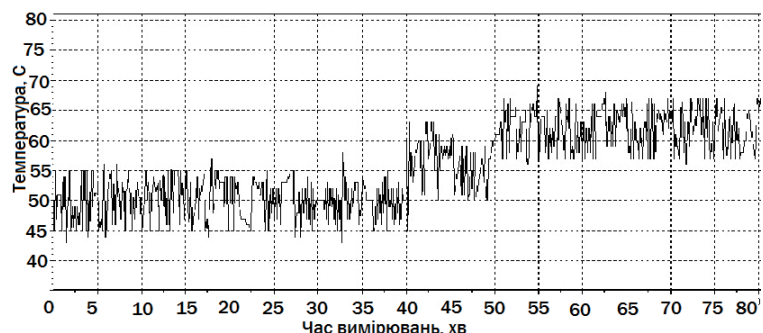


Рис. 1. Часовий ряд зміни температури затирання

Проведений R/S аналіз часових рядів процесу затирання дав можливість визначити значення показника Херста і кореляційну розмірність досліджуваної системи (рис. 2, 3).

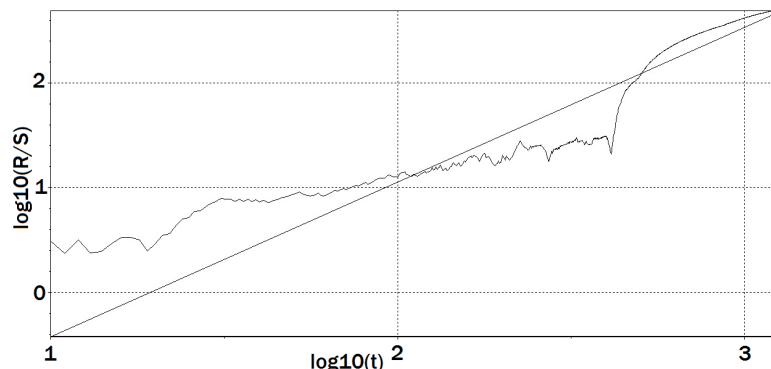


Рис. 2. R/S – аналіз числового ряду температури затирання

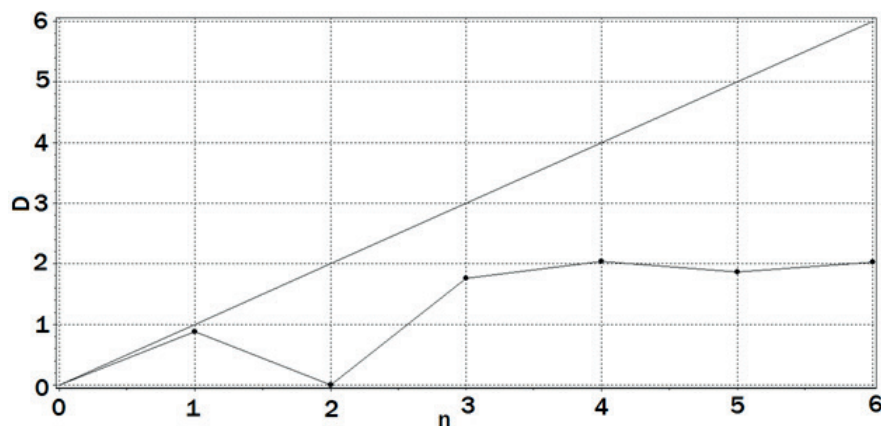


Рис. 3. Залежність кореляційної розмірності D від розмірності вкладення n для ряду величини температури

Результати дослідження R/S – аналізу даних наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Показник Херста, для температури

Доба роботи	Показник Херста, H	Фрактальна розмірність, D
1	1.0380	0.9620
2	0.9801	1.0199
3	0.8362	1.1638
4	0.9058	1.0942
5	0.7326	1.2674
6	1.0920	0.9080
7	0.9819	1.0181
8	0.9213	1.0787
9	1.0537	0.9463
10	0.8629	1.1371

Розділити всі часові ряди за показником Херста можна на три основні категорії:

1) показник Херста від 0 до 0.5 – антиперсистентні часові ряди;

2) показник Херста біля 0.5 – випадкові часові ряди;

3) показник Херста від 0.5 до 1 – персистентні часові ряди.

Згідно результатів дослідження можна стверджувати, що поведінка процесів, що протікають у варочному відділенні пивзаводу мають персистентний вид, оскільки показник Херста (H) знаходиться в межах від 0.5 до 1.

Результати дослідження значень кореляційної розмірності від розмірності вкладання наведені в табл. 2.

Виходячи із визначених показників, робимо висновки про наявність складної нелінійної поведінки об'єкта управління.

Встановлені результати дослідження часових рядів змінних технологічного процесу приготування пивного суслу:

1. Показник Херста H , що становить від 0.7326 до 1.0920;

2. Фрактальна розмірність $D=2-H$ становить від 0.9080 до 1.2674;

3. Час затримки $\tau=22$;

4. Максимальна розмірність фазового простору – 7.

Такі показники вказують на те, що досліджуваний технологічний процес має складний нелінійний характер поведінки, що вимагає застосування систем синергетичного управління.

На даному етапі було проведено дослідження часових рядів температури затирання, в подальшому потрібно дослідити інші технологічні параметри затирання (наприклад, мутність суслу, кислотність суслу, екстрактивність) та варки (температура варки, мутність, концентрація сухих речовин, кислотність) пива. В результаті таких досліджень можна із впевненістю визначити особливості поведінки системи та прийняти ефективні рішення при управлінні.

Таблиця 2

Залежність кореляційної розмірності від розмірності вкладення

Доба роботи	Кореляційна розмірність, D_2	Розмірність фазового простору, n
1	2.037	4
2	0.881	1
3	1.313	3
4	3.102	4
5	2.251	5
6	1.793	7
7	4.437	7
8	0.174	1
9	2.889	4
10	4.609	6

6. Висновки

Проведеними дослідженнями із використанням методу R/S-аналізу для виявлення детермінованого хаосу в динамічній системі варочного відділення пивзаводу на прикладі зміни температури затирання.

В результаті дослідження теоретичних основ і проведення експериментальних досліджень встановлено, що поводження технологічної системи приготування пивного суслу пивзаводу носить характер детермінованого хаосу. Встановлено, що даний об'єкт проявляє суттєво нестаціонарну поведінку, а саме змінюється структура (розмірність вкладання), отже для ефективного управління потрібно застосовувати адаптивні алгоритми синергетичного управління, в яких за допомогою методів нелінійної динаміки визначають критичні змінювання.

Експериментальні дослідження часових рядів значень технологічних параметрів роботи варочного відділення пивзаводу за значеннями показника Херста та Ляпунова дозволяє зробити висновок про мож-

ливість здійснення короткострокового прогнозування поведінки динамічної системи даного технологічного об'єкта.

Збільшення глибини прогнозу можливе за рахунок дослідження і аналізу інших параметрів динамічної системи.

Література

1. Малинецкий, Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики [Текст] / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с. doi: 10.5281/zenodo.12817
2. Пупена, О. М. Інтеграція систем управління [Текст] / О. М. Пупена, І. В. Ельперін // Харчова і переробна промисловість. – 2005. – № 1. – С. 9-11. doi: 10.5281/zenodo.12823
3. Ладанюк, А. П. Сучасні системи автоматизації бурякоцукрового виробництва [Текст] / А. П. Ладанюк, В. Г. Трегуб // Цукор України. – 2005. – № 5. – С. 39-41. doi: org/10.5281/zenodo.12824
4. Bamforth, C. W. Brewing. New technologies [Text] / C. W. Bamforth // Phys. Rev. 2006. – P. 484. doi: 10.5281/zenodo.12815
5. Шустер, Г. Детерминированный хаос [Текст] / Г. Шустер. – М.: Мир, 1988. – 240 с. doi: 10.5281/zenodo.12821
6. Krstic, M. Boundary control of PDEs [Text] / M. Krstic, A. Smyshlyaev // Phys. Rev. 2008. – P. 192. doi: 10.5281/zenodo.12814
7. Берже, П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности [Текст] / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М.: Мир, 1991. – 368 с. doi: 10.5281/zenodo.12813
8. Мандельброт, Б. (Не)послушные рынки: фрактальная революция в финансах [Текст] / Б. Мандельброт. – М.: Вильямс, 2006. – 400 с. doi: 10.5281/zenodo.12818
9. Петерс, Э. Хаос и порядок на рынках капитала [Текст] / Э. Петерс. – М.: Мир, 2000. – 305 с. doi: 10.5281/zenodo.12819
10. Крамер, Г. Математические методы статистики [Текст] / Г. Крамер. – М.: Мир, 1975. – 625 с. doi: 10.5281/zenodo.12816
11. Grassberger, P. Characterization of strange attractors [Text] / P. Grassberger, I. Procaccia // Physical Review Letters. - 1983. – Vol. 50, Issue 5. - P. 346-349. doi: 10.1103/physrevlett.50.346
12. Nerenberg, M. A. Correlation dimension and systematic geometric effects [Text] / M. A. Nerenberg, C. Essex // Physical Review A. - 1990. – Vol. 42, Issue 12. - P. 7065-7074. doi: 10.1103/physreva.42.7065

Встановлено, що момент фізичного завершення технологічної операції досліджуваної системи не є моментом завершення цільової операції. Введено поняття моменту фактичного завершення цільової операції. Запропонована система умовних позначень для опису системних процесів цільових операцій. Отримано вирази для чисельного і аналітичного визначення моменту фактичного завершення цільової операції

Ключові слова: дослідження операцій, модель цільової операції, момент фактичного завершення цільової операції

Установлено, что момент физического завершения технологической операции исследуемой системы не является моментом завершения целевой операции. Введено понятие момента фактического завершения целевой операции. Предложена система условных обозначений для описания системных процессов целевых операций. Получены выражения для численного и аналитического определения момента фактического завершения целевой операции

Ключевые слова: исследование операций, модель целевой операции, момент фактического завершения целевой операции

УДК 62-1/-9.007.005.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28040

IDENTIFICATION OF TARGET SYSTEM OPERATIONS. DETERMINATION OF THE TIME OF THE ACTUAL COMPLETION OF THE TARGET OPERATION

I. Lutsenko

PhD, Professor

Department of Electronic Devices

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradshyi

National University

Pervomaiskaya str., 20,

Kremenchuk, Ukraine, 39600

E-mail: delo-do@i.ua

1. Introduction

The process of achieving the goal of any controlled system is carried out by the planning and implementation of

individual or linked operations (processes). System operations research is the most delicate instrument, the results of which can be used in solving problems of process optimization, operations planning and analysis. Currently, there is quite