

RECURRENT NONLINEAR ANALYSIS OF TIME SERIES MASHING THE MALT AS A COMPLEX SYSTEM WITH INTERMITTENCE

V.D. Kishenko, N.V. Chernetski
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
recurrent diagrams, reconstruction phase space, time series, synergistic control, smoothing	These results mashing process the malt to breweries as a complex dynamic system from the standpoint of nonlinear dynamics. Analyzed time series of technological parameters of control object based on the fundamental properties of dissipative dynamic systems recurrence. It was built recurrence diagram where the class of structures: topology that meets the large-scale structure and texture corresponding to small-scale structures. Quantitative assessment of the behavior of control object as a complex nonlinear system in the form of measures, recurrence, determinism, entropy. Obtained recurrent diagrams and the quantitative analysis of nonlinear systems assessments of measures revealed features mashing process the malt (stochasticity, randomness, changing noise, presence trends) that ensures the implementation of effective resource saving management systems synergistic mash unit
Article history: Received 10.04.2015 Received in revised form 15.05.2015 Accepted 10.06.2015	
Corresponding author: tmipt_xp@ukr.net	

НЕЛІНІЙНИЙ РЕКУРЕНТНИЙ АНАЛІЗ ЧАСОВИХ РЯДІВ ПРОЦЕСУ ЗАТИРАННЯ СОЛОДУ ЯК СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ З ПЕРЕМІЖНІСТЮ

В.Д. Кишенько, канд. техн. наук, М.В. Чернецький, аспірант
Національний університет харчових технологій

Наведені результати досліджень процесу затирання солоду на пивзаводах як складної динамічної системи з позицій нелінійної динаміки. Аналізувались часові ряди технологічних параметрів даного об'єкта керування на основі фундаментальної властивості дисипативних динамічних систем – рекурентності. Отримані рекурентні діаграми та проведений кількісний аналіз оцінок мір нелінійних систем дозволили виявити особливості процесів затирання солоду (стохастичність, хаотичність, змінювання рівня шумів, наявність трендів), що забезпечує реалізацію ефективних ресурсощадних систем синергетичного керування затормим апаратом.

Ключові слова: рекурентні діаграми, реконструкція фазового простору, часовий ряд, синергетичне керування, затирання.

Вступ. Підтримка певних технологічних параметрів складних систем управління на конкретному, чітко визначеному рівні, коли система характеризується віддаленістю від стану термодинамічної рівноваги і утворення дисипативних просторово-часових структур, є актуальною проблемою на даному етапі розвитку системи автоматизації виробництва.

Поведінка таких об'єктів характеризується переміжністю. Переміжністю називають повторення детермінованості, стохастичності і хаотичності в об'єкті. Хаотична поведінка

об'єкта управління викликана низкою внутрішніх факторів і дуже часто відіграє конструктивну роль у адаптації складних систем через самоорганізацію.

Для створення ефективного управління, що побудоване на синтезі керуючих стратегій, топологічно узгодженого ресурсозберігаючого характеру резонансної дії, необхідно здійснити ряд експериментальних досліджень таких об'єктів виробництва методами нелінійної динаміки.

В даній роботі був використаний метод, побудований на властивості системи — рекурентності. Цей метод аналізу базується на представленні властивостей об'єкта керування у вигляді геометричних просторово-часових структур. Він може бути інструментом для виявлення залежностей у процесах, за якими спостерігаємо.

Матеріали і методи. В даній статті досліджується рекурентний метод для аналізу часових рядів технологічного процесу приготування пивного суслу варочного відділення пивзаводу.

Дослідження такої складної системи із використанням методу рекурентного аналізу можна проводити навіть у випадку врахування лише однієї змінної координати, виходячи із теореми Таккенса про те, що за дією окремих змінних в складних системах, можна визначити динаміку всієї системи в цілому [1].

Із теореми Таккенса, еквівалентна фазова траєкторія, що зберігає структуру оригінальної фазової траєкторії, може бути відновлена через одну спостережувану змінну, а саме через її часовий ряд. Нехай ця змінна буде X , що вкладена в псевдофазовий простір сталої розмірності m :

$$\begin{cases} x_1^m = (x_1, x_2, \dots, x_m) \\ x_2^m = (x_2, x_3, \dots, x_{m+1}) \\ x_{N-m}^m = (x_{N-m}, x_{N-(m+1)}, \dots, x_N) \end{cases} \quad (1)$$

Було запропоновано метод відображення m — мірної фазової траєкторії стану системи процесу, за яким ведеться спостереження. Для дослідження було обрано часовий ряд технологічного параметра — температури затирання, на двохмірну квадратичну подвійну матрицю розміром $N \times N$, при якому N — відповідає повторенню стану при деякому часі i в деякий інший час j , а дві координати осі є осями часу. Графічне представлення такого процесу називають рекурентною діаграмою, або скорочено RP (recurrence plots) і є проекцією m -мірного псевдофазового простору на площину [2]. Рекурентні діаграми — ефективний комплексний метод дослідження складних динамічних систем за часовими рядами змінних, в якому органічно пов'язані візуальні можливості (діаграми) і потужний обчислювальний апарат (міри).

Рекурентна діаграма описується таким чином:

$$R_{i,j}^{m,e} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|) \quad (2)$$

де, $\{x_i\} = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in R^m$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, N — кількість спостережуваних станів досліджуваного процесу, ε_i — розмір околу точки x_i в момент i , $\|x_i - x_j\|$ — відстань між точками, $\Theta(\bullet)$ — функція Хевісайда.

Для детального аналізу процесів, за допомогою рекурентних діаграм, використовують два класи: топології і текстура зображень. Слід врахувати, що топологія, яка представлена великими структурами дає лише загальне уявлення про характер процесів по чотирьох класах: однорідні, періодичні, дрейф, білі області. Текстура зображень характеризує дрібну структуру діаграми і побудована із окремих точок, а також із ліній: вертикальних, горизонтальних, діагональних.

Рекурентні діаграми дозволяють здійснити візуальний аналіз траєкторії у фазовому просторі високої розмірності. Зовнішній вигляд діаграми дає уявлення про еволюцію цих траєкторій з часом. Виділяють два основних класи структур: топологія (topology), що відповідає великомасштабним структурам, і текстура (texture), що відповідає дрібномасш-

табним структурам. Топологія дозволяє побачити і оцінити характер процесу. Існують чотири різних класи структур: однорідні (нормально розподілений шум), періодичні (генератор Ван дер Поля), дрейф (відображення ікеди із накладеної лінійно збільшуваної послідовності), контрастні області і лінії (загальний броунівський рух) [3].

Провівши візуальне дослідження рекурентних діаграм, ми можемо провести також їх числовий аналіз. Методику кількісного аналізу рекурентних діаграм для визначення числових показників створили Збілут і Вебер [4]. Суть методу полягає у визначенні щільності рекурентних точок і діагональних структур діаграми. В результаті для дослідження можна визначити такі кількісні показники як: міра рекурентності (RR), міра детермінованості (DET), середня довжина діагональних ліній (L), ентропія (ENTR), тренд (TREND). Згодом Марваном було запропоновано розраховувати міри, що засновані на вертикальних чи горизонтальних структурах рекурентних діаграм [5, 6]. А саме, такі міри як: міра замирання (LAM), показник затримки (TT). Також розраховують міру частоти (CLEAN), тобто оцінку балансу між стохастичною і детермінованою складовою. У більшості випадків для розрахунку мір використовують рекурентні діаграми із сталим значенням порогу.

Міра рекурентності розраховується за [3]:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,s} \quad (3)$$

Міра рекурентності показує щільність рекурентних точок. Вираховується це значення підрахунком ліній ідентичності. Також, дана міра, показує імовірність знаходження рекурентної точки в рекурентній діаграмі. Процеси із стохастичною поведінкою можуть утворювати надзвичайно короткі діагоналі або взагалі не утворювати їх. Процеси із детермінованою поведінкою утворюють довгі діагоналі і зовсім малу кількість окремих рекурентних точок.

Отже, можна визначити співвідношення рекурентних точок, що будують діагональні структури, до загальної кількості точок за (4):

$$DET = \frac{\sum IP_s(I)}{\sum R_{i,j}^{m,s}} \quad (4)$$

Цей показник називають мірою детермінованості або передбачуваності системи. Потрібно врахувати, що міра передбачуваності немає реального значення детермінованості процесу. Мінімальна довжина $l_{\min}$ — це крайнє значення, що виключає наявність діагональних ліній, які створені значенням тангенса руху траєкторії у фазовому просторі. Якщо $l_{\min} = 1$, то і $DET = 1$. По діагональним структурам можна визначити час, в ході якого частина траєкторії проходить достатньо близько до іншої частини траєкторії. Отже по даним лініям можна визначити розходження елементів траєкторії.

Наступний показник, як середня довжина діагональної лінії L , показує час на протязі якого дві частини траєкторії проходять близько одна до одної. Може розглядатися як середній час передбачуваності і визначається за (5):

$$L = \frac{\sum_{I=l_{\min}}^N IP_s(I)}{\sum_{I=l_{\min}}^N P_s(I)} \quad (5)$$

Показник DIV дивергенція (6) визначає максимальну довжину діагональних структур або її інверсія

$$l_{\max} = \max(l_i; i = 1 \dots N_l), \quad DIV = \frac{1}{L_{\max}} \quad (6)$$

Встановлено, що довжини діагональних ліній співвідносяться із найбільш позитивним показником Ляпунова, у випадку, коли вони існують для досліджуваної системи. В результаті дослідження були визначені оцінки максимально позитивного показника Ляпунова із використанням довжини діагональних ліній. Міра ентропії (7) співвідноситься до ентропії Шеннона частотного розподілення довжин діагональних ліній.

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l) \quad (7)$$

де, $p(l) = \frac{P^s(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^s(l)}$ показує складність детермінованої складової системи.

Співвідношення між DET і RR можна розрахувати із частотного розподілення довжин діагональних ліній.

$$RATIO = N_2 \frac{\sum IP_s(l)}{(\sum IP_{\eta}(l))^2} \quad (8)$$

Дослідження показали, що дана міра може бути використана для розпізнавання фазових переходів у випадках коли RR зменшується, а DET — незмінне.

$$LAM = \frac{\sum v P^s(v)}{\sum R^m, \varepsilon_{i,j}} \quad (9)$$

Міра замирання LAM показує співвідношення кількості рекурентних точок, що утворюють горизонтальні лінії до загальної кількості рекурентних точок. Показник характеризує наявність станів замирання системи. Замиранням вважають стан системи, коли рух цієї системи по фазовій траєкторії зупиняється або відбувається дуже повільно.

Середня довжина горизонтальних структур (показник затримки) визначається за (10):

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^s(i)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P_s v} \quad (10)$$

Даний показник характеризує середній час, за який система може провести в більш-менш стабільному стані. Вплив стохастичної складової на систему відображається на діаграмі у вигляді появи окремо стоячих точок або коротеньких діагональних ліній. Стохастична складова у деяких випадках взагалі може не утворювати діагональних ліній.

Міра співвідношення кількості точок, що формують діагональну лінію довжиною $l < l_{\min}$ до кількості точок, що формують діагональні лінії $l > l_{\min}$

$$CLEAN = \frac{\sum_{l=1}^{l_{\min}-1} IP^s(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^{N_l} IP^s(l)} \quad (11)$$

називається мірою частоти і показує вплив стохастичної складової процесу. При наявності переважності цієї складової значення CLEAN зростає.

Результати. Для дослідження було обрано часовий ряд зміни температури затирання варочного відділення пивзаводу (рис. 1).

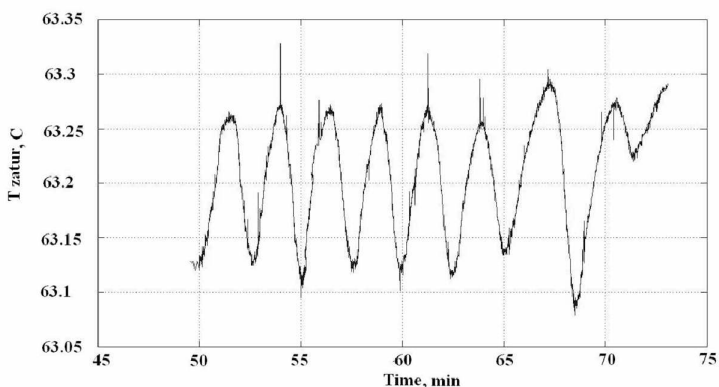


Рис. 1. Часовий ряд зміни температури затирання

В результаті обробки отримуємо рекурентну діаграму процесу затирання (рис. 2).

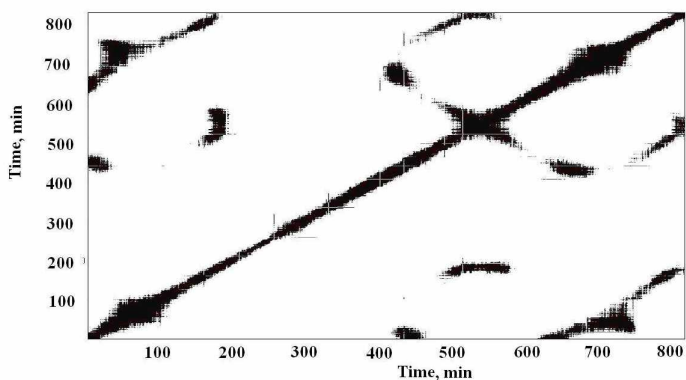


Рис. 2. Відображення рекурентної діаграми температури затирання («чорного» шуму)

Далі побудуємо текстуру, яка дає можливість оцінити відстань між станами системи на діаграмі відстаней, що відображається певною кольоровою палітрою (рис. 3).

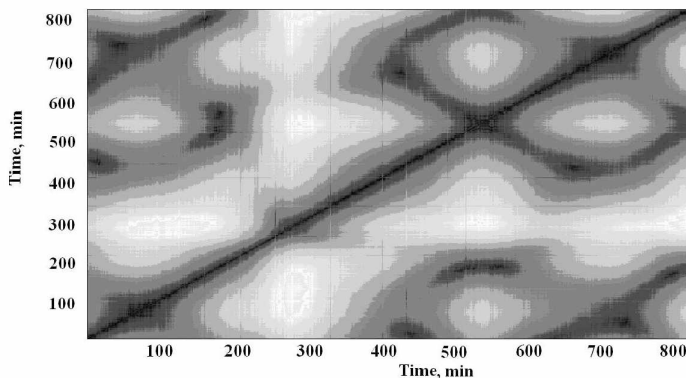


Рис. 3. Відображення текстури рекурентної діаграми («чорного» шуму)

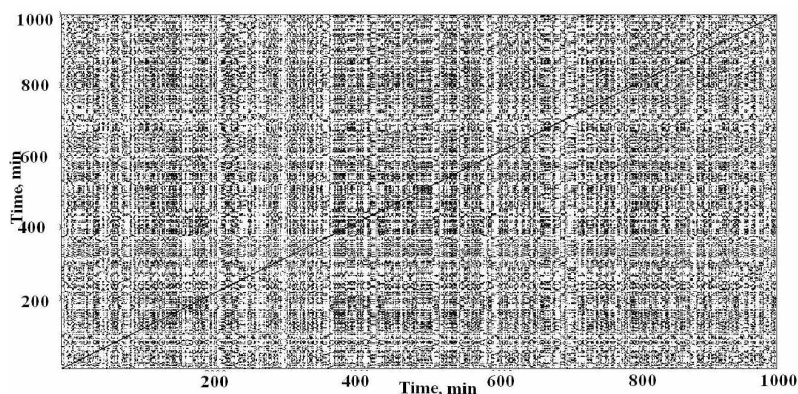


Рис. 4. Відображення рекурентної діаграми температури затирання (хаотичний процес)

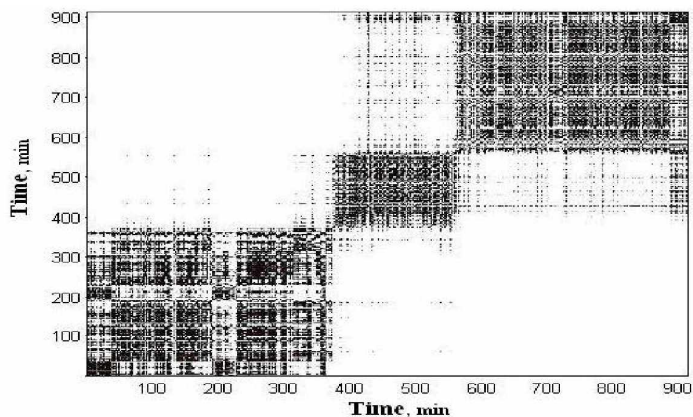


Рис. 5. Відображення рекурентної діаграми температури затирання (контрасна топологія)

Для відображення більш повної картини можна виконувати реконструкцію атрактора, для визначення областей притягання динамічної системи.

Таблиця. Кількісний аналіз рекурентних діаграм

Mipa				
RR	0.085	0.213	0.099	0.112
DET	0.389	0.647	0.478	0.512
L	4.756	2.995	3.553	2.851
DIV	0.015	0.031	0.027	0.039
ENTR	1.198	1.13	1.47	1.26
RATIO	4.892	5.111	5.396	4.561
LAM	0.614	0.518	0.61	0.589
TT	2.977	4.144	2.735	3.781

Виходячи візуального та кількісного аналізу отриманих рекурентних діаграм, встановлена перемінність в поведінці об'єкта керування (технологічного процесу затирання солоду), тобто чередування хаотичних (рис. 4) та стохастичних режимів (рис. 2), наявності тренду (рис. 5). Визначені особливості поведінки об'єкта за допомогою мір, що дозволило

оцінити максимальні показники Ляпунова, визначити характер процесів (стохастичність, хаотичність, періодичність), виявити певні прояви поведінки об'єкта (зміна режимів, співвідношення рівня шуму/корисний сигнал, зміна трендів).

Висновки. Реальні технологічні об'єкти управління є складними нелінійними об'єктами. Вони можуть характеризуватись різноманітною поведінкою. В своїй поведінці можуть проявляти як детермінованість, стохастичність, хаотичність. В залежності від режиму необхідно обрати певну стратегію управління.

Одна із найскладніших у плані управління — хаотична поведінка технологічного об'єкта. Вона досліджувалась методами нелінійної динаміки, що дозволило визначити якісні і кількісні показники ефективності, що створило необхідні передумови для розробки сучасних ресурсощадних систем синергетичного управління хаотичними процесами, до яких відносяться процеси затирання солоду на пивзаводах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Grassberger P. Characterization of strange attractors [Text] / P. Grassberger, I. Procaccia // Phys. Rev. Lett., №50, 1983. — P. 346-349.
2. Eckmann J.P. Recurrent Plots of Dynamical System [Text] / J.P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle // Europhysics Letters 5. — 1987. — P. 973-977.
3. Владимирский Э.И. Синергетические методы управления хаотическими системами [Текст] / Э.И. Владимирский, Б.И. Исмаилов. — Баку: ELM, 2011. — 240 с.
4. Iwanski J.S. Recurrence plots of experimental data: To embed or not to embed? [Text] / J.S. Iwanski, E. Bredley // Chaos, № 8(4), 1998. — P. 861—871.
5. Федер Е. Фракталы [Текст] / Е. Федер. — М.: Мир, 1991. — 261 с.
6. Шелухин О.И. Фрактальные процессы в телекоммуникациях [Текст] / О.И. Шелухин, А. М. Тенякиев, А.В. Осин. — М.: Радиотехника, 2003. — 480 с.
7. Ляшенко С.А. Оценка модели псевдолинейной регрессии [Текст] / С.А. Ляшенко, А.С. Ляшенко // Моделирование объектов и систем управления. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы, №1(25), 2010. — С. 36—41.

НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕКУРРЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПРОЦЕССА ЗАТИРАНИЯ СОЛОДА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕЖНОСТЬЮ

В.Д. Кишенько, Н.В. Чернецкий

Национальный университет пищевых технологий

Приведены результаты исследований процесса затирання солода на пивзаводах как сложной динамической системы с позиции нелинейной динамики. Анализировались временные ряды технологических параметров данного объекта управления на основе фундаментального свойства диссипативных динамических систем - рекуррентности. Полученные рекуррентные диаграммы и проведен количественный анализ оценок мер нелинейных систем позволил выявить особенности процессов затирання солода (стохастичность, хаотичность, изменения уровня шумов, наличия трендов), что обеспечивает реализацию эффективных ресурсосберегающих систем синергетического управления заторным аппаратом.

Ключевые слова: рекуррентные диаграммы, реконструкция фазового пространства, временной ряд, синергетическое управление, затирание.