

---

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

---

Основан в 1994 г.

2013  
№ 4(82)

Воронеж

Издательство «Научная книга»



2013

Издательство "Научная книга"  
Воронежский государственный технический университет  
Липецкий государственный технический университет  
Бакинский государственный университет

ISSN 1813-9744

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

П И Н Ф С 6-0238 от 19 сентября 2005 г.

Журнал выходит не реже шести раз в год

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Главный редактор О.Я.Кравец**, д-р техн. наук, профессор

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

А.А.Алиев, д-р техн. наук, профессор (БГУ, Азербайджан, г. Баку)  
С.Л.Блюмин, д-р физ.-мат. наук, профессор (ЛГТУ, Россия, г. Липецк)  
С.Л.Подвальный, д-р техн. наук, профессор (ВорГТУ, Россия, г. Воронеж)

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы публикаций. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Правила для авторов доступны на сайте журнала <http://www.sbook.ru/itmu>

Материалы публикуются в авторской редакции.

**Дизайн обложки – С.А.Кравец**

Адрес редакции: 394077 Воронеж, ул. 60-й Армии, дом 25, комп. 120  
Телефон: (473)2667653  
Факс: (473)2661253 автомат  
E-mail: [itmu@yandex.ru](mailto:itmu@yandex.ru)  
<http://www.sbook.ru/itmu>

Учредитель и издатель: ООО Издательство "Научная книга"  
<http://www.sbook.ru>

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО "Цифровая полиграфия"  
394036, г. Воронеж, ул. Ф. Энгельса, 52, тел.: (473)261-03-61

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» (зеленый) – 42297

Свободная цена

Подписано в печать 11.08.2013. Заказ 0000. Тираж 1000. Усл. печ. л. 6,5.

© Информационные технологии моделирования и управления, 2013

Кишенько В.Д., Запка В.И.  
**АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
УПРАВЛЕНИЯ С ХАОТИЧЕСКИМ ПОВЕДЕНИЕМ**  
*Национальный университет пищевых технологий, г. Киев, Украина*

**Введение**

Поддержание технологических параметров сложных объектов управления на оптимальных значениях в условиях, которые характеризуются удаленностью от состояния термодинамического равновесия и образованием диссипативных пространственно - временных структур, является актуальной проблемой на современном этапе развития систем автоматизации производства [1, 2].

Поведение таких объектов характеризуется перемежаемостью: чередованием детерминированности, стохастичности и хаотичности. Хаотические процессы, наблюдаемые в поведении объекта и вызванные внутренними факторами, во многих случаях играют конструктивную роль в адаптации сложных объектов через самоорганизацию. Для организации эффективного

---

управления, основанного на синтезе управляющих стратегий не принудительного, а топологически согласованного ресурсосберегающего характера резонансного действия, необходимо провести исследования таких объектов производства методами нелинейной динамики.

В [3] предложен метод анализа нелинейных динамических систем, расширяющий возможности нелинейного анализа временных рядов и основан на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности (повторяемости состояний).

Очевидно, что данный метод анализа, основанный на представлении свойств процессов в виде геометрических структур, может служить инструментом для обнаружения зависимостей в наблюдаемых процессах.

#### Рекуррентный анализ временных рядов

В работе предлагается использовать рекуррентный метод для анализа временных рядов технологических переменных работы станции дефекосатурации сахарного завода.

Исследование сложных систем с применением данного метода можно произвести при наличии даже одной координаты переменной состояния, учитывая, что по взаимодействию переменных, в сложных системах и их количеству, можно судить о динамике всей системы в целом.

Исходя из теоремы Таккенса, эквивалентная фазовая траектория, сохраняющая структуры оригинальной фазовой траектории, может быть восстановлена из одного временного ряда параметра  $x$ , вложенного в псевдофазовое пространство заданной размерности  $m$ :

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

В [3] был предложен способ отображения  $m$ -мерной фазовой траектории состояний наблюдаемого процесса, в нашем случае pH I-сатурации (рис. 1), на двумерную квадратичную двоичную матрицу размером  $N \times N$ , в которой  $\mathbf{1}$  соответствует повторению состояний при некотором времени  $i$  в некоторое другое время  $j$ , а обе координатные оси являются осями времени (рис. 2).

Такое графическое представление процесса названо рекуррентной диаграммой (RP - recurrence plots) и является проекцией  $m$ -мерного псевдофазового пространства на плоскость.

Рекуррентная диаграмма описывается соотношением:

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

где  $\{x_i\} = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in R^m$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  - количество рассматриваемых состояний наблюдаемого процесса,  $\varepsilon_i$  - размер окрестности точки  $x_i$  в момент  $i$ ,  $\|x_i - x_j\|$  - расстояние между точками,  $\Theta(\cdot)$  - функция Хэвисайда.

Для анализа исследуемых процессов по рекуррентным диаграммам используется два класса структуры: топология и текстура изображений. При этом топология, представляемая крупномасштабными структурами, даёт об-

щее представление о характере процесса по четырём классам: однородные, периодические, дрейф и белые области. Текстура характеризует мелкомасштабную структуру диаграммы и состоит из отдельных точек, диагональных, горизонтальных и вертикальных линий [4].

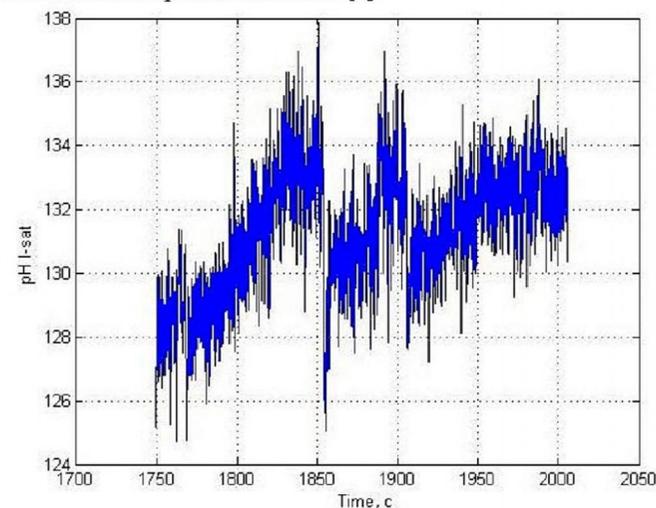


Рис. 1. Временной ряд динамики величины pH I-сатурации

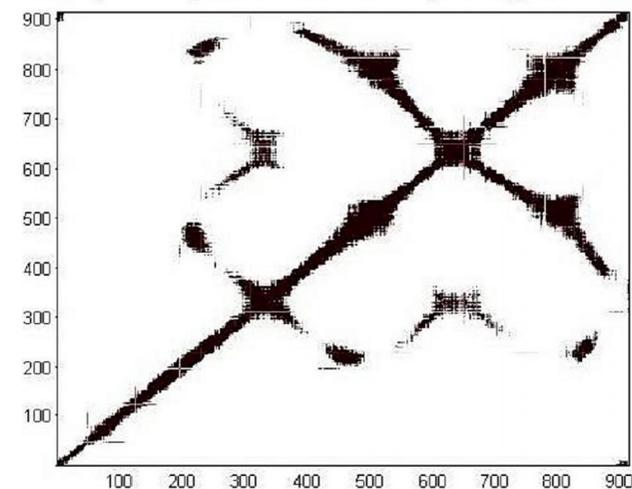


Рис. 2. Отображение рекуррентной диаграммы величины pH I-сатурации

Текстура дает возможность оценить расстояние между состояниями системы на диаграмме расстояний [5], которая отображается на некоторую цветовую палитру (рис. 3):

$$D_{i,j}^m = \|x_i - x_j\| \quad (3)$$

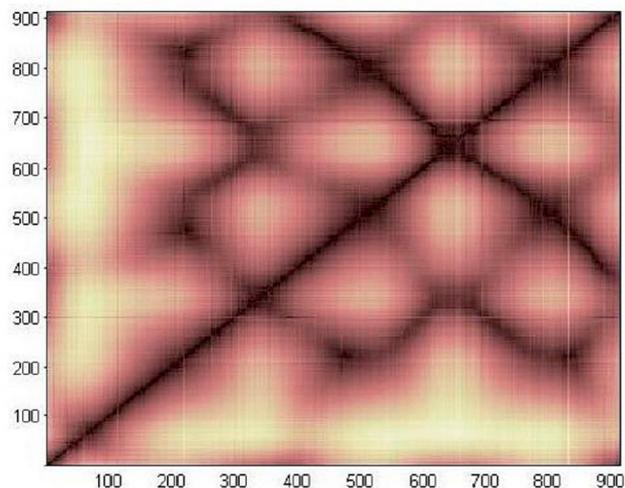


Рис. 3. Отображение текстуры рекуррентной диаграммы

Для получения более полной картины проводят реконструкцию аттрактора, с целью определения областей притягивания динамической системы.

На практике применяют как двумерные, так и трехмерные отображения, но как показывает опыт, для получения качественной оценки достаточно двумерного отображения (рис. 4).

Проведя анализ графических отображений динамической системы, можно определить к какому классу относится система:

- однородных, типичных для процессов с независимыми, идентично распределенными (IID – independent and identical distributed) случайными значениями;
- дрейфующих, соответствующих процессам с медленно (линейно) меняющимися параметрами;
- периодических, повторяющихся структур, что соответствуют осциллирующим (нелинейным) системам.

#### Определение численных характеристик временного ряда

Для получения численных значений нелинейности системы определяют показатель Хёрста и фрактальную размерность.

Наиболее простым способом исследования фрактальной структуры вре-

менных рядов является вычисление их фрактальной размерности через клеточную размерность  $D_c$ . Для определения размерности  $D_c$  разобьем плоскость, на которой определен график временного ряда на клетки размером  $\delta$  и определим число клеток  $N(\delta)$ , где находится хотя бы одна точка этого графика. Затем при различных  $\delta$  в двойном логарифмическом масштабе построим функцию  $N(\delta)$ , которая аппроксимируется прямой, например, с помощью метода наименьших квадратов. Тогда  $D_c$  определяется по углу наклона этой прямой.

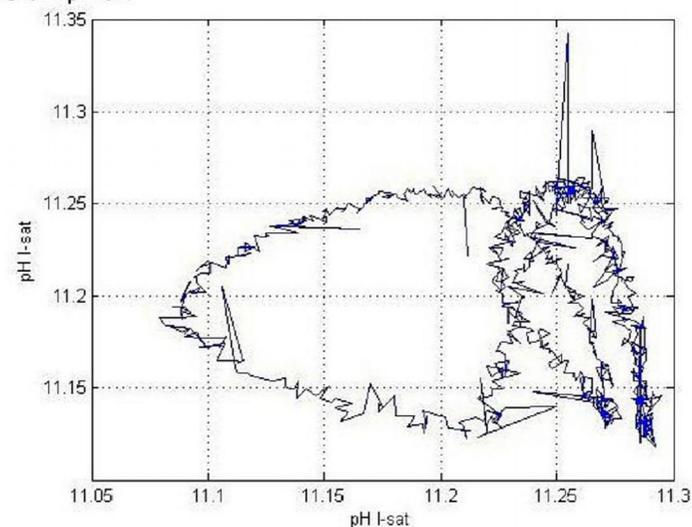


Рис. 4. Восстановленная траектория величины pH I-сатурации в двумерном пространстве

Вычисление показателя Хёрста проводится с помощью метода нормированного размаха (Rescaled Range (R/S) Analysis).

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(N/2)} \quad (4)$$

Основной целью вычисления показателя Хёрста есть определение долгосрочной корреляции во временном ряде, и выявление его фрактальной структуры. Кроме того с помощью R/S-анализа можно выявить существующие в динамике системы статистические циклы [6]. R/S анализ Хёрста дает нам среднюю длину цикла, необходимую для оценки инерции развития. Под средней величиной цикла системы понимается длительность, по истечении которой теряется память о начальных условиях.

Имеются три различных интервала для показателя Хёрста.

При  $H=0.5$  события случайны и не коррелированы. Настоящее не влия-

ет на будущее. Функция плотности вероятности может быть нормальной, но это не обязательное условие.

Если  $0 \leq H < 0,5$ , то получаем антиперсистентные или эргодические ряды. Такой тип системы называют «возврат к среднему». Эти системы демонстрируют после роста спад, и, наоборот, если система демонстрировала спад в предыдущий период, то, скорее всего в следующем периоде начнется подъем.

При  $0,5 < H < 1$  мы имеем персистентный или трендоустойчивый ряд. Если ряд возрастал (убывал) в предыдущий период, то, вероятно, что он сохранит свою тенденцию какое-то время в будущем. Персистентный временной ряд является фракталом.

Наиболее простым способом исследования фрактальной структуры временных рядов является вычисление их фрактальной размерности через клеточную размерность  $D_c$ . Для определения размерности  $D_c$  разбивают плоскость, на которой определен график временного ряда на клетки размером  $\delta$  и определяют число клеток  $N(\delta)$ , где находится хотя бы одна точка этого графика. Затем при различных  $\delta$  в двойном логарифмическом масштабе строят функцию  $N(\delta)$ , которая аппроксимируется прямой, например, с помощью метода наименьших квадратов. Тогда  $D_c$  определяется по углу наклона этой прямой.

Главным недостатком такого метода является то, что выход на степенную асимптотику функции  $N(\delta)$  при  $\delta \rightarrow 0$  обычно происходит крайне медленно. Это означает, что для надежного вычисления  $D$  требуется слишком большой масштаб. Внутри такого масштаба временной ряд, как правило, меняет характер своего поведения много раз. Указанный недостаток присущ и более сложным способам определения фрактальной размерности (например через корреляционный интеграл с помощью алгоритма Грассбергера – Прокваччи).

Чтобы связать локальную динамику соответствующего процесса с фрактальной размерностью временного ряда необходимо определить размерность  $D$  локально (6). Для этого необходимо найти последовательность аппроксимаций, которая при фиксированном  $\delta$  будет наиболее оптимальной.

$$N(\delta) \sim (1/\delta)^D \quad (5)$$

Если теперь прологарифмировать обе части этого выражения и переписать в виде равенства для  $D$ , то мы получим точное определение хаусдорфовой размерности:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln(1/\delta)} \quad (6)$$

Если умножить обе части (5) на  $\delta^2$ , то определение размерности можно переписать в виде степенного закона для площади аппроксимаций  $S(\delta)$ :

$$S(\delta) \sim \delta^{2-D} \quad \text{при } \delta \rightarrow 0 \quad (7)$$

В табл. 1 приведены данные вычисления показателя Хёрста и фрактальной размерности различных временных рядов работы первой сатурации для величины pH.

Аналогичные результаты получены для других технологических показателей функционирования исследуемого объекта управления.

Таблица 1

Временной ряд	Показатель Хёрста, H	Фрактальная размерность, D
1	0.6397	1.3603
2	0.610	1.3990
3	1.0775	0.9225
4	1.0639	0.9361
5	0.6802	1.3198
6	0.6403	1.3597
7	0.7435	1.2565
8	1.0647	0.9353
9	0.8445	1.1555
10	1.1641	0.8359

### Заключение

Сложные технологические объекты управления характеризуются разнообразным поведением: наблюдается чередование детерминированных, стохастических и хаотических режимов, каждый из которых требует специфических подходов в организации стратегий управления.

Хаотическое поведение технологических объектов исследуется методами нелинейной динамики, что позволяет установить качественные и количественные оценки детерминированного хаоса, что дает возможность разработки эффективных систем синергетического управления, которые обеспечивают максимальное использование собственных ресурсов объекта управления.

Проведенные исследования технологических процессов очистки диффузионного сока на сахарных заводах дают необходимые предпосылки для разработки современных систем автоматизированного управления в сахарной промышленности на принципах и методах нелинейной динамики.

### Список использованных источников

1. Ляшенко С.А., Ляшенко А.С. Оценка модели неавтокоррелированной регрессии // Моделирование объектов и систем управления. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы, №1(25), 2010. – С. 36–41.
2. Заика В.И., Кишнько В.Д. Реконструкция аттракторов сложных систем на основе временных рядов работы станции дефекосатурации сахарного завода // Научные записки. – Луцк: ЛНТУ, 2010. – С. 100–104.
3. Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D., Recurrence Plots of Dynamical Systems // Europhysics Letters 5. – 1987. – P. 973–977.
4. Владимирский Э.И., Исмаилов Б.И. Синергетические методы управления хаотическими системами. – Баку: ELM, 2011. – 240 с.
5. Iwanski J.S., Bredley E. Recurrence plots of experimental data: To embed or not to embed? // Chaos. – 1998. – №8(4). – P. 861–871.
6. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of strange attractors // Phys. Rev. Lett., 1983, 50, 346–349.