

Кишенько В.Д.

Національний університет харчових технологій

Кучер А.Є.

Національний університет харчових технологій

Крищенко Д.О.

Національний університет харчових технологій

Білецький М.С.

Національний університет харчових технологій

МЕТОДИ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ І ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ ПІД ЧАС ОЦІНКИ ПОВЕДІНКИ ПРОЦЕСІВ РЕКТИФІКАЦІЇ СПИРТУ

У статті розглядаються процеси ректифікації на спиртовому заводі, які можна характеризувати як складну динамічну систему. Метою роботи є підвищення ефективності виробництва спирту шляхом створення автоматизованої системи моніторингу процесу перегонки й на основі аналітичної обробки в режимі онлайн реалізація ефективної стратегії управління ресурсами за допомогою інтелектуальних механізмів. Аналіз часових рядів змінних процесу проводився методами нелінійної динаміки, що дозволило визначити значення випадковості, які ґрунтуються на глибині прогнозу поведінки об'єкта. На основі аналізу часових рядів провідних технологічних параметрів функціонування ректифікаційної установки виявлені особливості поведінки складних технологічних комплексів, що характеризується переміжністю, яка являє собою чергування детермінованих, стохастичних і хаотичних режимів в умовах нестационарності. Проведено оцінку хаотичності процесів ректифікації спирту: показники трендустійкості Херста, кореляційної та фрактальної розмірності. Представлено алгоритми визначення типів режимів функціонування ректифікаційної установки як динамічного нелінійного об'єкта керування. Процеси дистиляції характеризуються наявністю як стохастичних, так і хаотичних режимів, розмірності атракторів яких лежать в діапазоні від 3 до 8. Цей об'єкт має значну стабільність тенденції (стійкість), що характеризується високим значенням показника Херста в діапазоні від 0,7 до 0,96. Отримані результати забезпечать ефективну ідентифікацію відповідних моделей для прогнозування та прийняття рішень під час керування. Результати досліджень указують на наявність переміжності в технологічних процесах, що вимагає створення систем моніторингу для діагностичних режимів роботи дистиляційної установки. Оперативна ідентифікація детермінованих, стохастичних або хаотичних режимів методами нелінійної динаміки дає змогу реалізувати ресурсозберігаючі стратегії управління в алгоритмах управління технологічними процесами дистиляції, що підвищить ефективність функціонування дистиляційної установки.

Ключові слова: виробництво спирту, ректифікаційна установка, об'єкт керування, нелінійна динаміка, детермінований хаос, часовий ряд.

Постановка проблеми. Процеси ректифікації спирту відносять до складних технологічних комплексів [1] через властиві для таких об'єктів керування особливості як багатофакторність, нестационарність, суттєва нелінійність взаємозв'язків між параметрами, великий рівень шумів та перешкод, значна невизначеність [2]. Такі чинники вимагають застосування відповідних методів аналізу оцінки стану та поведінки об'єкта керування для забезпечення адекватних реальним виробничим ситуаціям ефективних керуючих стратегій. Виняткову увагу заслуговують питання оцінки

характеру поведінки, що в значній мірі визначається складною взаємодією нелінійних зв'язків між факторами вдалині від стану рівноваги, через що виникають критичні та хаотичні режими [3]. Розпізнавання та ідентифікація таких особливих режимів можливі при умові використання методів синергетики, нелінійної динаміки та теорії детермінованого хаосу [4].

Нелінійна динаміка є науковою методологічною платформою, що дозволяє аналізувати рух різноманітних складних динамічних систем на основі об'єктивних законів їх розвитку.

Для ефективного управління складними нелінійними об'єктами виникає необхідність визначення наявності стійких різноманіть (атракторів) – областей притягання фазових траєкторій об'єкта, а в разі хаотичної поведінки – дивних атракторів, які мають фрактальну розмірність.

Найбільш перспективним додатком теорії нелінійних систем із хаотичною поведінкою є прогнозування динаміки породжуваних цими системами часових рядів.

Аналіз часових рядів істотно ускладнюється нелінійністю динамічних характеристик складного об'єкта управління, які призводять до різноманітних проявів в поведінці, включаючи кардинальні зміни.

Виходячи з теореми Такенса [4], за часовим рядом єдиної змінної складної нелінійної системи, можна встановити багато властивостей поведінки системи, визначити топологію атратора, оцінити розмірність (ємність) об'єкта, ідентифікувати структуру й параметри прогнозуючих предиктор-функцій.

Часові ряди технологічних змінних – це, власне, модель поведінки, яка визначає атрибути об'єкта керування, установлює його структурні зв'язки та причинно-наслідкові залежності, а також вплив зовнішніх дій [5]. Задача встановлення цих специфічних ознак вимагає розробки та вжитку таких методів і технологій, які направлені на оцінку характеристик об'єкта, що відтворюють ситуаційні прояви поведінки технологічних процесів ректифікації в умовах переміжності, тобто наявності послідовного чергування детермінованих, стохастичних та хаотичних режимів [3; 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження технологічних систем все більше ґрунтується на глибокому використанні математичних методів, які втілюються в математичних моделях, що дозволяють дослідити реальні процеси як аналітичним, так і експериментальним шляхом. Основними традиційними рисами моделей, які натеper застосовуються зарубіжними і вітчизняними вченими для аналізу та керування технологічними системами, є їх рівноважність, стаціонарність, лінійність, тобто розглядаються тільки окремі аспекти складних виробничих процесів в статичній і динамічній. До того ж ступінь нерівноважності сучасних технологічних процесів вимагає розробки нелінійних методів моделювання виробничих систем. Постановка цієї проблеми має сенс в зв'язку з тим, що сучасний бурхливий розвиток методів математичного моделювання та їх впровадження в практику керування технічними системами обумовлюється можливостями сучасних комп'ютерних технологій і достатніми потужнос-

тями комп'ютерного потенціалу виробництва, що забезпечує необхідний рівень відтворення всіх своєрідних проявів складної поведінки об'єктів керування, включаючи й хаотичний рух.

Методологія нелінійної динаміки і хаотичних систем форсує глибоке вивчення поведінки та структури складних технічних систем як об'єктів моделювання. Нелінійна динаміка згідно з концепцією русел і джокерів [4] встановлює горизонти прогнозування тільки на певних інтервалах часу (сегментах), від однієї точки біфуркації до іншої, або тільки на ділянках русел, де система змінюється більш-менш стабільно, а виникнення біфуркацій (джокерів) носить імовірнісний характер. Виходячи з цього, проблема коректного розбиття фазового простору складної динамічної системи з хаосом і ідентифікації на основі цього розбиття необхідних характеристик для задач прогнозування та управління шляхом побудови локальних моделей, що оптимізуються для конкретного характеру поведінки об'єкта, є досить актуальною.

Конкретне розбиття фазового простору на області визначення локальних моделей ґрунтується на методах виявлення змін деяких характеристик об'єкта. Для того, щоб успішно впоратись із завданнями моделювання, прогнозування та управління складними нелінійними об'єктами була розроблена теорія «русел» і «джокерів» [4]. «Джокери» є областю в фазовому просторі, в якій поведінка системи є погано передбачуваною і носить випадковий характер. На противагу «джокеру» «русла» – це області досить стійкої і, відповідно, прогнозованої поведінки.

Серйозною проблемою в моделюванні і прогнозуванні часових рядів, що містять хаотичну компоненту, є їх нестійкість до шумових збурень. Ця варіабельність призводить до необхідності фільтрації часових рядів від шуму, причому з урахуванням різноманітності і різного ступеня інтенсивності дії шумів, їх нерівномірного спектра на різних часових проміжках [4].

Значний внесок у розробку методів моделювання та прогнозування поведінки складних систем внесли роботи зарубіжних і вітчизняних вчених Х. Кантца [7], Ф. Такенса [8], П. Грасбергера й І. Прокачія [9], С.П. Курдюмова [10], Г.Г. Малинецького [4; 10], Л.Н. Сергєєвої [5; 11]. Однак у роботах перерахованих вчених і в результатах інших авторів, які аналізувалися під час проведення дослідження, не повною мірою розв'язана проблема побудови моделей, які б враховували ефекти самоорганізації, виникнення критичних режимів та кардинальних змінювань в технологічних об'єктах.

Теорія хаосу як один із напрямів нелінійної динаміки, винятковий інструмент, що дозволяє виявити глибинну сутність технологічних процесів, яка часто є прихованою і неявною.

Завдання управління складними технологічними системами ускладнено внаслідок нелінійності характеристик об'єкта, його багатовимірності, наявності численних складних зв'язків, протікання складних перехідних процесів, виникнення критичних і хаотичних режимів, і полягає в оперативному своєчасному розпізнаванні критичних станів у поведінці об'єкта і створення превентивних дій, спрямованих на усунення причин появи цих змін.

Сучасна теорія управління, побудована на кібернетичних принципах успішно освоїла методи достатньо грубого зовнішнього впливу примусового характеру на різні технічні об'єкти, що приводить до значущих затрат ресурсів для потреб керування.

Синергетичний підхід дозволяє розробити нові методи досягнення цільового стану об'єктивного управління, заснованого на процесах самоорганізації в нелінійних динамічних системах, та побудувати універсальні об'єктивні закони телеомного управління на основі вивчення фізико-хімічних властивостей, що мають об'єкти управління. При цьому основну увагу зосереджують на кооперативних, когерентних та взаємно узгоджувальних процесах, властивих складним нелінійним системам управління.

Важливим аспектом побудови синергетичних алгоритмів управління є необхідність створення методів аналізу причин виникнення, формування та дії внутрішніх сил резонансного характеру, прив'язки до виникнення у фазовому просторі

системи управління дисипативних просторово-часових структур, що відображають природні властивості об'єкта управління.

Ця принципово нова проблема теорії управління породжує необхідність вирішення самостійних конкретних завдань у конкретній предметній області – відповідній технології харчових виробництв. Тому розробка методів побудови моделей складних технологічних систем з урахуванням джерел складності і особливостей інформації щодо поведінки таких систем є актуальною науковою проблемою.

Постановка завдання. Мета статті полягає в розробці й обґрунтуванні алгоритмів розрахунку основних характеристик нелінійної динаміки та детермінованого хаосу, що дозволяють проводити ефективне дослідження властивостей складної динамічної системи як технологічного комплексу ректифікації спирту на основі часових рядів технологічних змінних, а також для ефективної інтерпретації результатів і вибору методики обробки, адекватної наявним даним, які свідчать про наявність хаотичних режимів в умовах переміжності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Досліджувались часові ряди технологічних змінних функціонування брагоректифікаційної установки спиртового заводу: витрати бражки, спирту-ректифікату, нагріваючої пари; температури низу та верху колон, на контрольних тарілках колон, тиску низу та верху колон; міцності бражки. Встановлено наявність хаотичних атракторів, що є фракталами (рис. 1).

Виявлення хаотичної поведінки об'єкта керування в умовах переміжності, яка полягає в послідовному змінюванні режимів (детермінованих, стохастичних та хаотичних) внаслідок утворення дисипативних просторово-часових структур [4], здійснювалось за кореляційною розмірністю та показником Херста [4,5].

Кореляційна розмірність D_c , заснована на обчисленні кореляційного інтеграла, є важливою кількісною характеристикою атратора, що несе інформацію про ступінь складності поведінки динамічної системи.

Кореляційний інтеграл $C(r)$ обчислює середню розбіжність між точками реконструйованого фазового простору, координатами якого служать значення самого часового ряду з наростаючим числом запізнень за часом. Якщо часовий ряд повністю детермінований, то

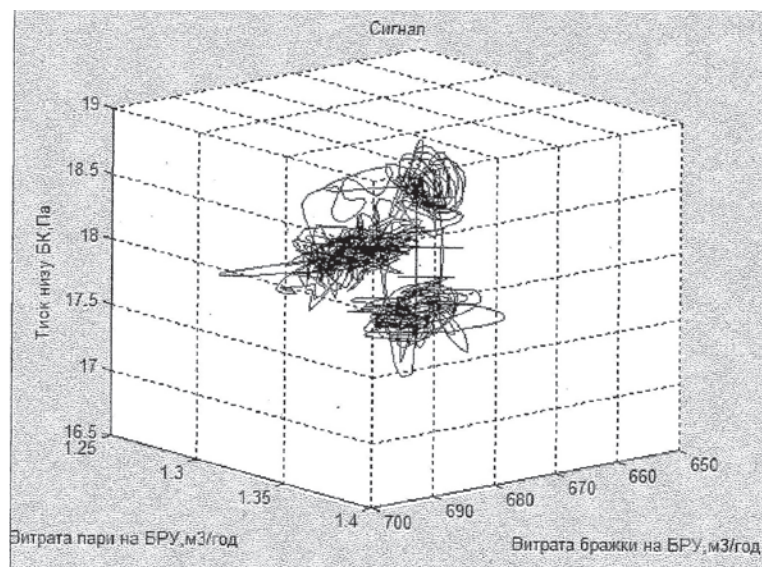


Рис. 1. Атрактивні зони в брагоректифікаційній установці (БРУ)

його поведінка визначається деякими залежностями, що містять k змінних. Тоді зі збільшенням порядку запізнення порядок зростання кореляційного інтеграла стабілізується між числом k і $k+1$, і його приймають за оцінку фрактальної розмірності часового ряду. Якщо ряд хаотичний, випадковий, то порядок зростання кореляційного інтеграла зростає приблизно з такою ж швидкістю, як і розмірність фазового простору.

Функція $C(r)$ для кожного r дорівнює нормованому числу пар точок y_i та y_j розглянутої множини (об'єкта), відстань між якими не перевершує r

$$C(r) = \frac{1}{n^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n H(r - |y_i - y_j|),$$

де функція Хевісайда $H(x)=0$, якщо $x < 0$; $H(x)=1$, якщо $x \geq 0$, для всіх пар значень i і j , якщо $i \neq j$, $|y_i - y_j|$ – абсолютна величина відстані між точками множини, $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$, де n – кількість точок. Величина суми залежить від r , причому $C(r) \sim r^{D_c}$, де D_c – кореляційна розмірність. Для практичного обчислення розмірності на графіку $\ln(C(r))=f(\ln(r))$ виділяють область лінійної залежності (область скейлінга) і функція апроксимується прямою лінією методом найменших квадратів. Тоді тангенс кута нахилу графіка є розмірністю D_c [3].

На рис. 2 показано визначення за допомогою програми Fractan кореляційної розмірності часового ряду тиску низу бражної колоні.

Показник Херста H являє собою міру персистентності – схильності процесу до трендів [5]. Значення $H > 1/2$ означає, що спрямована в певну сторону динаміка процесу в минулому, найімовірніше, спричинить продовження руху в тому ж напрямку. Якщо $H < 1/2$, то прогнозується, що процес змінить спрямованість. $H = 1/2$ означає невідзначеність – броунівський рух.

Відомо, що він пов'язаний із фрактальною розмірністю D простим співвідношенням [5]:

$$D + H = 2$$

Для обчислення показника Херста необхідно визначити x_{cp} – середньоарифметичне значення за:

$$x_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

де N – число періодів спостереження; x_i – значення спостереження в конкретний момент часу, та знайти Z_u – накопичене відхилення ряду від середнього x_{cp} за:

$$Z_u = \sum_{i=1}^N (x_i - x_{cp})$$

За такими значеннями можна визначити значення розмаху R часового ряду на певному проміжку та середньоквадратичне відхилення S за:

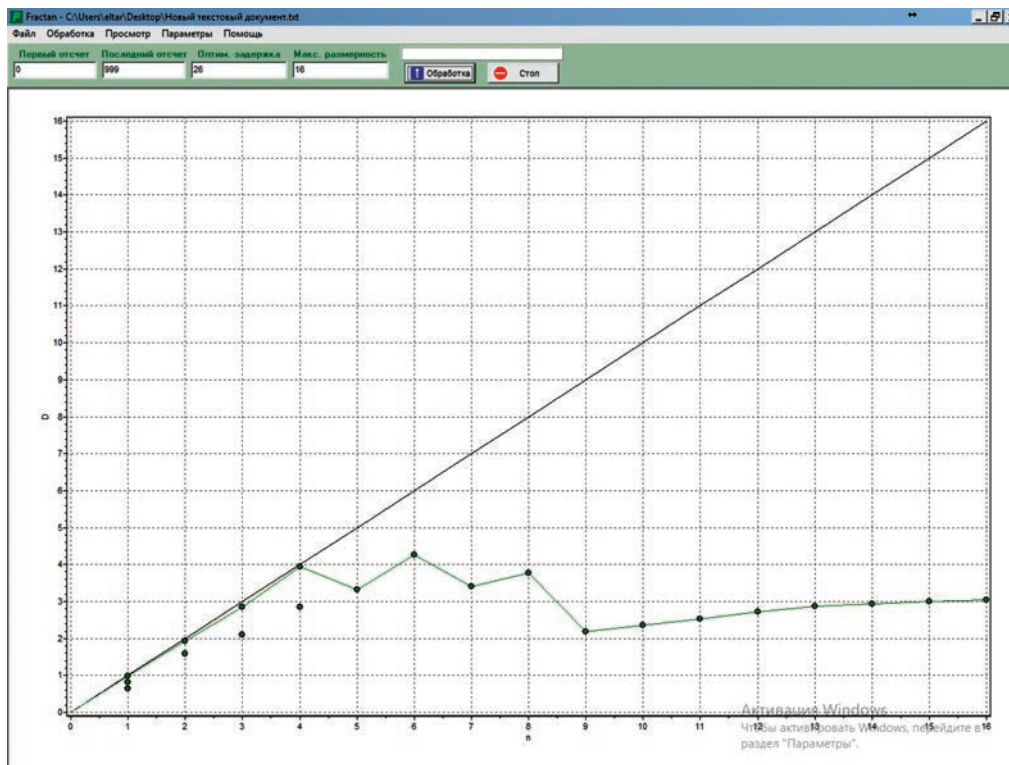


Рис. 2. Залежність кореляційної розмірності D_c від розмірності вкладення n для часового ряду величини тиску низу бражної колоні ($D_c=3,94$; $n=4$)

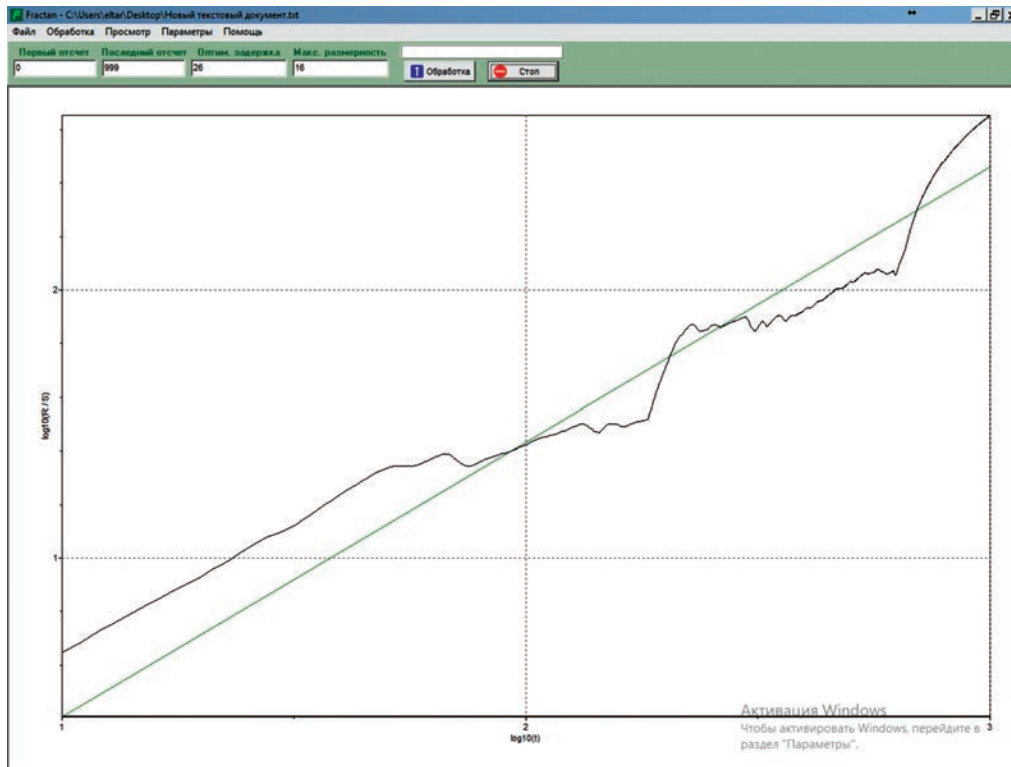


Рис. 3. R/S – аналіз числового ряду для часового ряду величини тиску низу бражної колони ($H=0,74$; $D=1,26$)

$$R = \max(Z_u) - \min(Z_u)$$

де $1 \leq u \leq N$,

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{cp})^2}$$

Показник Херста обчислюється для часового ряду й визначається її фрактальною структурою.

$$R / S = (\alpha N)^H \rightarrow H = \frac{\lg(R / S)}{\lg(\alpha N)}$$

де α – задана константа ($0,5 \div \pi/2$).

Обчислені за допомогою програми Fractal показники Херста $H > 0,5$ (рис.3), що свідчить про характерну персистентність розглянутих змінних, та можливу достатньо глибоку прогнозованість.

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що поведінка технологічної системи приготування спирту-ректифікату характеризується ефектом інтермітансу (переміжності) з наявністю

хаотичної складової частини. детермінованого хаосу. Дослідження часових рядів значень технологічних параметрів роботи брагоректифікаційної установки за значеннями показника Херста й кореляційної s фрактальної розмірності дозволяють зробити висновок про можливість здійснення короткострокового прогнозування поведінки динамічної системи такого технологічного об'єкта.

З огляду на природні особливості процесів приготування спирту-ректифікату, зокрема, в здатності створення дисипативних просторово-часових структур самоорганізації, доцільно для ефективного управління цими процесами використовувати синергетичні механізми, що забезпечують оптимальний перехід процесів від непередбачуваної поведінки і силових управляючих впливів примусового характеру до ресурсозберігаючих технологій управління, адаптованих до природньої поведінки об'єкта.

Список літератури:

1. Ладанюк А.П., Решетюк В.М., Кишенько В.Д., Смітюх Я.В. Інноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу. Київ : «Центр учбової літератури», 2014. 280 с.
2. Смітюх Я. В., Кишенько В. Д. Оптимізація управління процесами брагоректифікації. *Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси і системи*. 2006. № 2. С. 117–124.
3. Павлов А.Н., Сосновцева А.Н., Зиганшин А.Р. Мультифрактальный анализ хаотической динамики взаимодействующих систем. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2003. Т. 11. № 2. С. 39–54.
4. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. Москва : Эдиториал УРСС, 2000. 336 с.

5. Сергеева Л.Н. Анализ экономических часовых рядов методами теории хаоса. *Экономика: проблемы теории та практики*. Збірник наукових праць. Вип. 161. Дніпропетровськ : ДНУ, 2002. С. 212–221.
6. Яновский Л.П. Контролирование хаоса в моделях экономического роста. *Экономика и математические методы*. 2002. Т. 38. Вып. 1. С. 16–23.
7. Kantz H. A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series. *Physics Letters A*. 1994. Volume 185. Issue 1. P. 77–87.
8. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical systems and turbulence* / Eds. D. Rand and L. Young. Berlin : Springer-Verlag, 1981. P. 366–382.
9. Grassberger P., Procaccia I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. *Phys. Rev. A*. 1983. Vol. 28. № 4. P. 2591–2593.
10. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Нелинейная динамика и проблемы прогноза. *Вестник РАН*. 2001. Т. 71. № 3. С. 210–224.
11. Сергеева Л.Н. Моделирование поведения экономических систем методами нелинейной динамики (теории хаоса). Запорожье : ЗГУ, 2002. 227 с.

Kyshenko V.D., Kucher A.E., Kryshchenko D.O., Biletskiy M.S. METHODS OF NONLINEAR DYNAMICS AND DETERMINATED CHAOS WHEN ESTIMATING THE BEHAVIOR OF ALCOHOL RECTIFICATION PROCESSES

The article deals with the processes of rectification at an alcohol factory, which can be characterized as a complex dynamic system. The purpose of the work is to improve the efficiency of alcohol production by creating an automated system process monitoring distillation department, and based on online analytical processing to realize efficient resource-management strategy using intelligent mechanisms. The analysis of time series of the process variables was conducted by methods of nonlinear dynamics, which allowed to determine the randomness values that are based on the depth of an object prediction. On the basis of the analysis of time series of the main technological parameters of the functioning of the distillation unit, the features of the behavior of complex technological complexes are characterized, which is characterized by intermittence, which is an alternation of deterministic, stochastic and chaotic regimes under non-stationary conditions. The estimation of the chaoticity of alcohol rectification processes is carried out: indicators of Hurst's trend stability, correlation and fractal dimension. The algorithms for determining the types of operating modes of the distillation unit as a dynamic nonlinear control object are proposed. Distillation processes are characterized by the presence both stochastic and chaotic regimes, the dimension of attractors of which lies in the range of 3 to 8. This object have significant trend stability (persistence), that characterized by high value of Hurst exponent in the range of 0.7 to 0.96. The results obtained will ensure the effective identification of the relevant models for the purposes of forecasting and decision-making in management. The results of research pointed to the presence of intermittency in the technological processes that requires the monitoring systems creation for diagnostic regimes of operation of distillation unit. The operative identification of deterministic, stochastic or chaotic regimes by the methods of nonlinear dynamic makes it possible to implement resource-saving control strategies in the algorithms of control of distillation technological processes, which will increase the efficiency of distillation unit functioning.

Key words: alcohol production, distillation plant, control object, nonlinear dynamics, deterministic chaos, time series.