

УДК 519.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/14>**Кишенько В.Д.**

Національний університет харчових технологій

Крищенко Д.О.

Національний університет харчових технологій

Ромащук О.М.

Національний університет харчових технологій

Горпинченко А.С.

Національний університет харчових технологій

ОЦІНКА ХАРАКТЕРНИХ ПРОЯВІВ ПОВЕДІНКИ СКЛАДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглядаються технологічні процеси харчових виробництв, які мають всі характерні ознаки складних динамічних систем, в тому числі різнопланову поведінку, що містить наявність детермінованих, стохастичних та хаотичних проявів. Аналіз та ідентифікація таких проявів дозволяє оперативно прийняти відповідні стратегії керування, що забезпечить ресурсоощадне функціонування технологічних об'єктів керування в різних умовах виробництва. Властива для складних технологічних комплексів як об'єктів керування самоорганізація через їх суттєву нелінійність і віддаленість від стану термодинамічної рівноваги і, як наслідок, через утворення дисипативних просторово – часових структур, є основою для забезпечення оптимальних значень в умовах змінювання характеру поведінки, включаючи і хаотичні процеси, що є актуальною проблемою на сучасному етапі розвитку систем автоматизації харчової галузі. Хаотичні процеси, які спостерігаються в поводженні об'єкта та викликані внутрішніми факторами, у багатьох випадках відіграють конструктивну роль в адаптації складних об'єктів через самоорганізацію. Для організації ефективного керування, заснованого на синтезі керуючих стратегій не примусового, а топологічно погодженого ресурсоощадного характеру резонансної дії, необхідно провести дослідження таких об'єктів виробництва методом рекурентного аналізу.

На основі рекурентного аналізу часових рядів основних параметрів функціонування технологічних процесів цукрової та спиртової промисловості виявлені особливості поведінки складних технологічних комплексів, що характеризується переривчастістю, яка являє собою чергування детермінованих, стохастичних та хаотичних режимів в умовах нестаціонарності. Визначені також кількісні показники рекурентних діаграм як міра детермінованості, міра рекурентності, ентропія, тренд, дивергенція, які характеризують прикмети поведінки об'єкта, а також визначити природу процесів, виявити деякі атрибути поведінки об'єкта (тип режимів, рівень шуму у порівнянні з корисним сигналом, перелом трендів). Отримані рекурентні діаграми та числові значення критеріїв оцінки характеру поведінки технологічних процесів дали можливість реалізації ефективних рішень по керуванню, що забезпечило покращення якості продукції, підвищення продуктивності обладнання та економію сировинних і енергетичних ресурсів.

Ключові слова: виробництво спирту, цукрове виробництво, об'єкт керування, нелінійна динаміка, детермінований хаос, рекурентний аналіз, часовий ряд.

Постановка проблеми. Технологічні процеси цукрової та спиртової промисловості відносять до складних технологічних комплексів [1] через властиві для таких об'єктів керування особливості як багатофакторність, нестаціонарність, значна невизначеність, нелінійність зв'язків між параметрами, великий рівень шумів та перешкод. Важливим чинником таких складних динамічних систем є те, що вони переважно характеризуються так званою переривчастістю (intermittency), проявами

якої є як випадкові, так і детерміновані хаотичні процеси, що потребує застосування необхідних засобів аналізу оцінки стану та поведінки об'єкта керування для реалізації адекватних реальним виробничим ситуаціям ефективних ресурсоощадних алгоритмів керування.

Забезпечення оптимальних значень технологічних параметрів складних об'єктів керування харчової промисловості в обставинах переривчастості, яка відзначається витвором дисипативних

просторово – часових структур, як впорядкованих, так і хаотичних, внаслідок визначальної нелінійності і віддаленості від рівноважного стану, є актуальною проблемою на сучасному етапі розвитку систем автоматизації виробництва.

Спостереження за такими об'єктами доцільно здійснювати на основі часових рядів, які є дискретною послідовністю значень показників, технологічних параметрів, впорядкованих за часом їх отримання, що в інтегральному сенсі характеризує стан об'єкта в окремі моменти часу. Такий спосіб представлення інформації про ситуацію, поведінку та розвиток об'єкта керування є дуже розповсюдженим, зручним і, в більшості випадків, єдино ефективним.

Застосування статистичних методів при аналізі часових рядів дозволяє розв'язувати в певному наближенні проблеми ідентифікації, визначати форму та зв'язок між факторами, визначати деякі кількісні та якісні характеристики об'єкта, але подати в повному обсязі поведінку та розвиток об'єкта, особливо при наявності суттєвого впливу нелінійностей, що приводить до складного характеру поведінки, є надзвичайно проблематичним. Сьогодні наукових досліджень часових рядів висунуло плідні методи нелінійної динаміки, поміж яких визначальне місце займає рекурентний аналіз. Хаотичні процеси, які спостерігаються в поведінці об'єкта та викликані внутрішніми факторами, у багатьох випадках відіграють конструктивну роль в адаптації складних об'єктів через самоорганізацію. Для організації радикального керування технологічними комплексами, що забезпечує формування керувальних дій, оснований на самоорганізації, тобто погоджених із фізичною природою процесів в об'єктах, і тим самим є ресурсощадним, необхідно провести дослідження таких об'єктів виробництва методом рекурентного аналізу.

Рекурентний аналіз при дослідженні поведінки складних динамічних об'єктів не потребує значного об'єму інформації. Дослідження таких складних систем із застосуванням методу рекурентного аналізу у відповідності із теоремою Такенса дозволено проводити навіть у випадку наявності лише однієї змінної координати, враховуючи те, що по дії змінних в складних системах і їх кількості, можна визначити динаміку всієї системи в цілому.

Рекурентні діаграми допускають можливість відтворювати кардинальні властивості процесу, що досліджується, за їх геометричною структурою. Відомі такі різновиди структур: топологія і текстура. Топологія, що відзначається великим

масштабом, зумовлює тотальне сприймання про природу процесу, а текстура, що має дрібномасштабну структуру, дозволяє встановити окремі нюанси поведінки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки був розроблений оригінальний метод, заснований на фундаментальній властивості диссипативних динамічних систем – рекурентності (повторюваності) станів, яка зводиться до того, що, навіть незначні коливання в складній динамічній системі можуть заподіяти в системі відхилення від власного стану експоненціального характеру з подальшим поверненням через декотрий час до стану, який тим або іншим чином є ближнім до колишнього, і переходить при цьому однотипні стадії еволюції. Таку рекурентну поведінку можна зобразити рекурентними діаграмами, запропонованими в 1987 р. Екманом, Кампхорстом і Рюелем [2], які допускають відтворити фазову траєкторію абиякої розмірності на двовимірну квадратну матрицю, формат якої окреслюється довжиною часового ряду і, практично, виражає його рекурентність, тобто його поведінку в колишні випадки пори. Практичне використання цього методу показало його застосованість до недовгих і нестационарних даних, що підвищило його популярність у дослідників. Окрім сильних візуальних відзнак, є метод числового аналізу побудов, які організуються на відображенні рекурентної діаграми. В 2007 році Збілут (Zbilut) і Веббер (Webber) опублікували роботу [3], в якій описали елементи числового аналізу рекурентних діаграм. Новітні дослідження засвідчили, що рекурентна діаграма поміщає усю потрібну інформацію про динаміку системи. Роботи таких вчених, як Норберт Марван [4], Кармен Романо [5], Сун [6], Фачіні [7], Фауер [8], Флеш [9], Фусаролі [10] значно збагатили за останнє десятиліття можливість цього методу в різних галузях науки, підтвердили потужну перспективу такого напрямку досліджень.

Постановка завдання. Мета статті полягає в розробці і обґрунтуванні алгоритмів розрахунку основних характеристик технологічних комплексів цукрової та спиртової промисловості для оперативного визначення особливостей їх поведінки в умовах переривчастості, що дозволить приймати ефективні рішення по керуванню у відповідності із виробничою ситуацією. Завданням проведених досліджень є також підтвердження гіпотези про наявність ефектів переривчастості в поведінці технологічних процесів виробництва цукру та спирту, виявлених нами в пивоварній промис-

ловості [11], що дасть підставу для розширення номенклатури систем синергетичного керування технологічними процесами в харчовій галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Досліджувались часові ряди технологічних змінних функціонування технологічних комплексів цукрової та спиртової промисловості: витрати і показники якості сировини, напівфабрикатів та готової продукції, температури та тиску в технологічному обладнанні.

Поведінка об'єкта у вигляді m – мірної фазової траєкторії часового ряду відображувалась на двохмірну квадратичну матрицю розміром $N \times N$, при якому N – відповідає повтору стану при якомусь часі i в декотрий інший час j , а дві координатні осі є осями часу. Графічний показ такого процесу іменують рекурентною діаграмою, або скорочено RP (recurrence plots), яка є проекцією m -мірного псевдофазового простору на площину [2]. Рекурентні діаграми дозволять за часовими рядами технологічних змінних завдяки візуальному розгляду та аналітичних розрахунків встановити характерні прояви поведінки процесів, що забезпечить організацію ефективних рішень по керуванню технологічними процесами.

Рекурентна діаграма визначається відповідною операцією:

$$R_{i,j}^{m,\epsilon} = \Theta(\epsilon_i - \|x_i - x_j\|)$$

де $\{x_i\} = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in R^m$, $i, j = 1, 2, \dots, N$,
 N – кількість станів, які аналізуються;
 ϵ_i – розмір округи точки x_i в момент i ,
 $\|x_i - x_j\|$ – відстань між точками,
 $\Theta(\cdot)$ – функція Хевісайда.

Для розгляду поведінки об'єктів за рекурентними діаграмами існують такі класи структури: топологія і текстура зображень. При цьому топологія, зумовлює тотальне сприйняття щодо природи процесу за класами: однорідний, періодичний, дрейф і білі області. Текстура розкриває окремі деталі поведінки і об'єднує відокремлені точки, діагональні, горизонтальні і вертикальні лінії [2].

Текстура зумовлює перспективу оцінювати відстань між станами системи на діаграмі відстаней [2], що відбивається на декотру кольорову палітру:

$$D_{i,j}^m = \|x_i - x_j\|$$

Топологія дає можливість узнати і описати природу процесу. Існують чотири відмінні класи структур: однорідні, періодичні, дрейф, контрастні області і лінії. Для наочності різноманітного характеру поведінки на рис. 1 – рис. 6 представлено рекурентні діаграми різних топологій із текстурами.

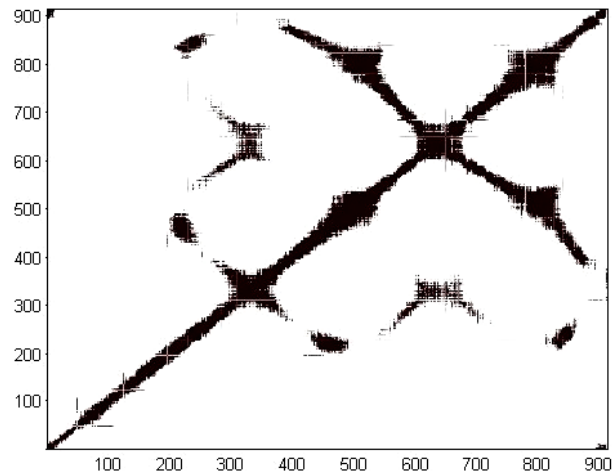


Рис. 1. Відображення рекурентної діаграми величини рН І-сатурації

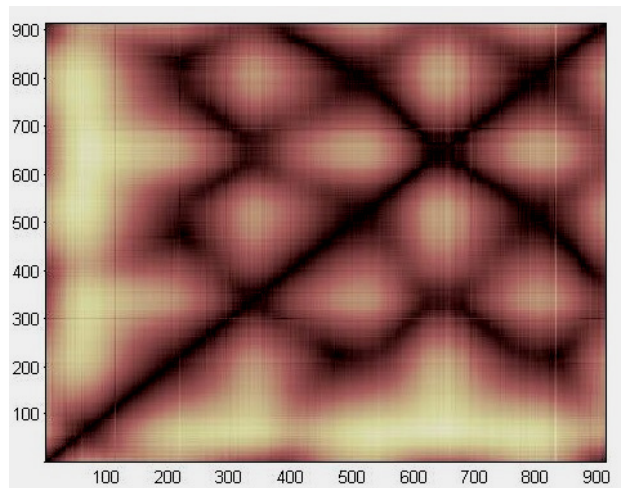


Рис. 2. Відображення текстури рекурентної діаграми величини рН І-сатурації

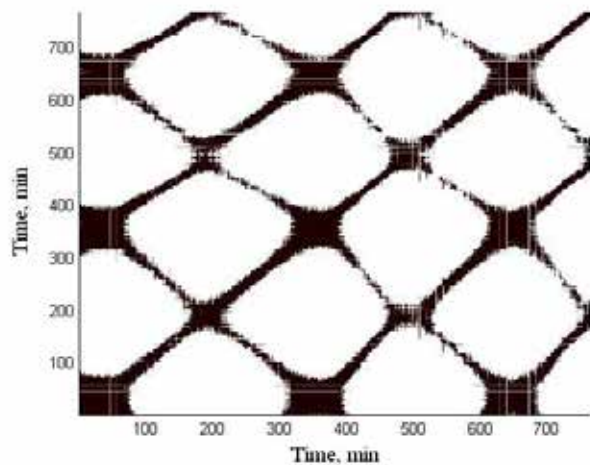


Рис. 3. Відображення рекурентної діаграми температури бражки (періодична топологія, генератор Ван дер Поля)

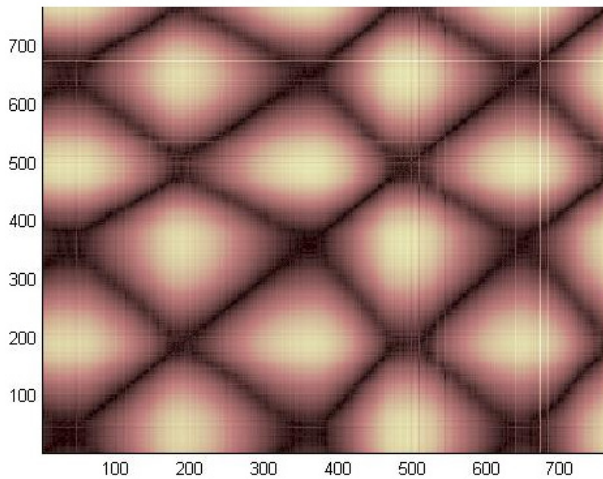


Рис. 4. Відображення текстури рекурентної діаграми температури бражки (періодична топологія, генератор Ван дер Поля)

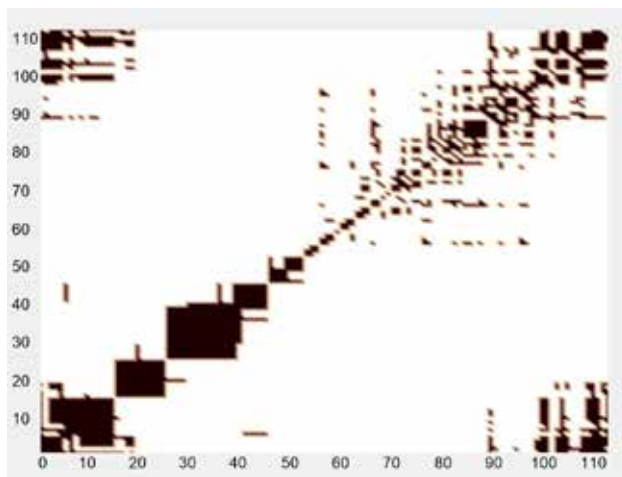


Рис. 5. Відображення рекурентної діаграми концентрації етанолу у бражці (контрастна топологія, загальний броунівський рух)

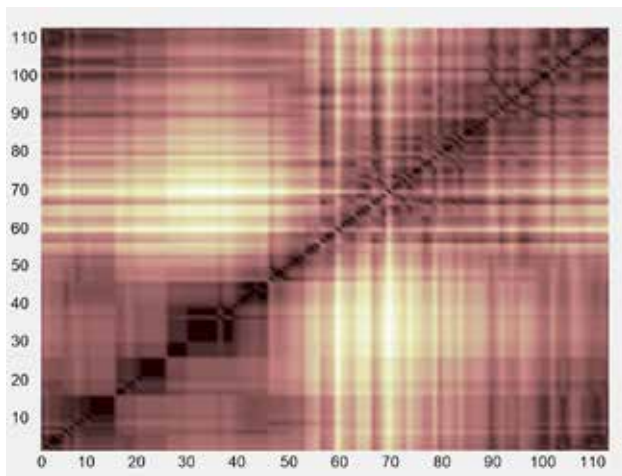


Рис. 6. Відображення текстури рекурентної діаграми концентрації етанолу у бражці (контрастна топологія, загальний броунівський рух)

Оцінку системи можливо здійснити за характерними структурними особливостями рекурентної діаграми. Для прикладу, система з параметрами, що повільно змінюються (наявність дрейфу) характеризується такою рекурентною діаграмою, в якій верхній лівий та правий нижній кути діаграми без рекурентних точок, контрастні білі області або смуги говорять про різкі зміни в динаміці системи.

Аналіз топології діаграми дозволяє провести класифікацію процесів:

- однорідних, типових для процесів з незалежними, ідентично розподіленими (IID – independent and identical distributed) випадковими значеннями;
- дрейфуючих, типових процесам з повільно (лінійно) мінливими параметрами;
- періодичних, повторюваних структур, що відповідають осцилюючим (нелінійним) системам.

Рекурентні діаграми дозволяють провести і числову оцінку деяких особливостей поведінки об'єкта керування згідно із методикою Збілута і Вебера [3] за щільністю рекурентних точок і діагональних структур діаграми. Відзначаються отакі показники числового порядку як [3,11]: міра рекурентності (RR), міра детермінованості (DET), середня довжина діагональних ліній (L), дивергенція (DIV), ентропія ($ENTR$), частотне розподілення довжин діагональних ліній ($RATIO$), тренд ($TREND$). Пізніше Марваном було запропоновані міри розрахунку, що враховують вертикальні та горизонтальні структури рекурентних діаграм: міра замирання (LAM), показник затримки (TT), міра частоти ($CLEAN$), як розуміння балансу між стохастичною і детермінованою складовою [4].

Міра рекурентності розраховується таким чином:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,e}$$

Міра рекурентності позначає гущину рекурентних точок і знаходиться за підрахунком ліній ідентичності: стохастичні процеси формують винятково короткі діагоналі, а процеси із детермінованою поведінкою продукують довгі діагоналі. Ця міра демонструє також імовірність знаходження рекурентної точки в рекурентній діаграмі.

Міра детермінованості або передбачуваності системи визначається за співвідношенням рекурентних точок, що створюють діагональні структури, до загальної кількості точок:

$$DET = \frac{\sum IP_e(l)}{\sum R_{i,j}^{m,e}}$$

Середня довжина діагональної лінії L маркує час, на протязі якого дві частини траєкторії про-

ходять близько одна до одної і напевне розглядається як середній час передбачуваності:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP^e(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^e(l)}$$

Показник *DIV* – дивергенція, з'ясовує максимальну довжину діагональних структур або її інверсію:

$$DIV = \frac{1}{L_{\max}}$$

де $L_{\max} = \max(l_i; i = 1 \dots N_l)$.

Визначено, що довжини діагональних ліній пов'язуються із найбільшим позитивним показником Ляпунова, що характеризує прояви детермінізму та хаотичності в системі. Міра ентропії співвідноситься до ентропії Шеннона частотного розподілення довжин діагональних ліній

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

де $p(l) = \frac{P^e(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^e(l)}$ – показує складність

детермінованої складової системи.

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

$$RATIO = N_2 \frac{\sum IP_e(l)}{(\sum IP_n(l))^2}$$

Дану міру можливо використати для встановлення фазових переходів у випадках коли *RR* зменшується, а *DET* – незмінне.

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

Міра замирання *LAM* помічає співвідношення кількості рекурентних точок, що утворюють горизонтальні лінії до загальної кількості рекурентних точок. Показник атестує присутність станів замирання системи. Замиранням вбачають такий стан

системи, коли рух цієї системи по фазовій траєкторії зупиняється або здійснюється надто повільно.

Середня довжина горизонтальних структур (показник затримки) видається таким чином:

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^e(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P^e(v)}$$

Цей показчик розкриває час стабільного стану системи.

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

$$CLEAN = \frac{\sum_{l=1}^{l_{\min}-1} IP^e(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N IP^e(l)}$$

іменується мірою частоти і маркує вплив стохастичної складової процесу. При наявності переравної частини цієї складової значення *CLEAN* зростає (табл. 1).

На основі рекурентного аналізу часових рядів основних параметрів функціонування технологічних процесів цукрової та спиртової промисловості виявлені особливості поведінки складних технологічних комплексів, що характеризується переривчастю, яка являє собою чергування детермінованих, стохастичних та хаотичних режимів в умовах нестационарності. Визначені також кількісні показники рекурентних діаграм як міра детермінованості, міра рекурентності, ентропія, тренд, дивергенція, які характеризують прикмети поведінки об'єкта, а також визначити природу процесів, виявити деякі атрибути поведінки об'єкта (тип режимів, рівень шуму у порівнянні з корисним сигналом, перелом трендів).

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що поведження технологічних систем цукрової та спиртової галузі характеризується

Таблиця 1

Кількісна оцінка складності структур рекурентних діаграм

Міра	pH 1-ої сатурації	Витрата соку	Концентрація сухих речовин в бражці	Тиск в бражній колоні
<i>RR</i>	0.086	0.321	0.087	0.294
<i>DET</i>	0.559	0.596	0.517	0.681
<i>DIV</i>	0.028	0.041	0.069	0.141
<i>ENTR</i>	1.670	1.543	1.564	1.581
<i>RATIO</i>	8.247	4.236	4.842	5.738
<i>LAM</i>	0.769	0.527	0.595	0.474
<i>TT</i>	2.643	5.198	3.848	2.163
<i>CLEAN</i>	1,703	4,673	2,162	1,664

ефектом інтермітансу (переривчастості) з наявністю хаотичної складової. детермінованого хаосу.

З огляду на природні особливості процесів приготування спирту-ректифікату та цукру, зокрема, в здатності створення дисипативних просторово-

часових структур самоорганізації, доцільно для ефективного управління цими процесами використовувати синергетичні системи керування, які забезпечують покращення якості продукції, підвищення продуктивності обладнання та економію сировинних і енергетичних ресурсів

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. Eckmann J. P., Kamphorst J. P., Ruelle D. Recurrent Plots of Dynamical System. *Europhysics Letters*. 1987. № 5. P. 973-977.
3. Zbilut J. P., Webber C. L. Recurrence Quantification Analysis: Introduction and Historical Context. *Int. J. Bifurcation Chaos*. 2007. № 17(10). P. 3477-3481.
4. Marwan N. A historical review of recurrence plots. *The European Physical Journal Special Topics*. 2008. № 164 (1). P. 3–12.
5. Romano M. C., Thiel M., Kurths J., von Bloh, W. Multivariate Recurrence Plots. *Physics Letters A*. 2004. 330(3-4). P. 214-223.
6. Sun G., Zhu H., Ding C. Using recurrence plots for stability analysis of ring-on-disc tribopairs. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019. 71(4), P. 532-539.
7. Facchini A., Mocenni C. Recurrence indicators for the identification of spatial patterns, *Proceedings of the 16th IFAC Symposium on System Identification*. 2012. P. 737-1742.
8. Faure P., Lesne A. Estimating Kolmogorov Entropy from Recurrence Plots, In: *Recurrence Quantification Analysis – Theory and Best Practices / Edition by C. L. Webber, Jr., N. Marwan, Springer, Cham*. 2015. P. 45-63.
9. Flach M., Foken T., Hauhs M. Recurrence Analysis of Eddy Covariance Fluxes, In: *Recurrence Plots and Their Quantifications: Expanding Horizons / Edition by C. L. Webber, Jr., C. Ioana, N. Marwan, Springer, Cham*. 2016. P. 301-319.
10. Fusaroli R., Konvalinka I., Wallot S. Analyzing Social Interactions: The Promises and Challenges of Using Cross Recurrence Quantification Analysis, In: *Translational Recurrences – From Mathematical Theory to Real-World Applications*, 103, Edition by N. Marwan, M. A. Riley, A. Giuliani, C. L. Webber, Jr., Springer, Cham. 2014. P. 137-155.
11. Кишенько В.Д., Чернецький М.В. Нелінійний рекурентний аналіз часових рядів процесу затирання солоду як складної системи з переміжністю. *Харчова промисловість*. 2015. № 17. С. 90-96.

Kyshenko V.D., Kryshchenko D.O., Romaschuk O.M., Gorpinchenko A.S. ASSESSMENT OF THE CHARACTERISTIC MANIFESTATIONS OF THE BEHAVIOR OF COMPLEX TECHNOLOGICAL OBJECTS

The article examines the technological processes of food production, which have all the characteristic features of complex dynamic systems, including multifaceted behavior, which includes the presence of deterministic, stochastic and chaotic manifestations. Analysis and identification of such manifestations allows prompt adoption of appropriate control strategies, which will ensure resource-saving functioning of technological control objects in various production conditions. The self-organization property of complex technological complexes as control objects due to their significant nonlinearity and distance from the state of thermodynamic equilibrium and, as a result, due to the formation of dissipative spatio-temporal structures, is the basis for ensuring optimal values in conditions of changing behavior, including chaotic processes, which is an urgent problem at the current stage of development of food industry automation systems. Chaotic processes observed in object behavior and caused by internal factors in many cases play a constructive role in the adaptation of complex objects through self-organization. For the organization of effective management, based on the synthesis of management strategies of not forced, but topologically agreed resource-saving nature of resonant action, it is necessary to conduct a study of such production facilities by the method of recurrent analysis.

On the basis of the recurrent analysis of time series of the main parameters of the functioning of the technological processes of the sugar and alcohol industry, the peculiarities of the behavior of complex technological complexes characterized by intermittency, which is an alternation of deterministic, stochastic and chaotic modes in conditions of non-stationarity, were revealed. Quantitative indicators of recurrent diagrams are also defined as a measure of determinism, a measure of recurrence, entropy, trend, divergence, which characterize the signs of the object's behavior, as well as to determine the nature of the processes, to identify some attributes of the object's behavior (type of modes, noise level compared to useful signal, trend reversal). The obtained recurrent diagrams and numerical values of the criteria for evaluating the nature of the behavior of technological processes made it possible to implement effective management solutions, which ensured the improvement of product quality, the improvement of equipment productivity, and the saving of raw and energy resources.

Key words: alcohol production, sugar production, control object, nonlinear dynamics, deterministic chaos, recurrent analysis, time series.