

УДК 681.51:663.4

*В.Д. Кишенько,  
канд. техн. наук  
О.П. Лобок, канд. техн. наук  
М.В. Чернецький  
Національний університет  
харчових технологій*

### **СИНЕРГЕТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ПРИГОТУВАННЯ ПИВНОГО СУСЛА**

*У статті розглядається проблема підвищення ефективності функціонування складного технологічного комплексу виробництва пивного сусла. Наведені методи удосконалення системи управління технологічними процесами виробництва пива шляхом організації ресурсоощадних керуючих дій на основі принципів нелінійної динаміки.*

***Ключові слова:** виробництво пива, пивне сусло, управління технологічними процесами, синергетика, математичне моделювання, кінетичні рівняння.*

---

Технологічні комплекси харчових виробництв мають всі характерні ознаки складних організаційно-технологічних систем. Вони являють собою сукупність різних підсистем, зв'язаних між собою процесами інтенсивної взаємодії та обміну енергією, речовиною та інформацією. Ці підсистеми є нелінійними, багатомірними та складнозв'язаними, в яких протікають характерні перехідні процеси та виникають критичні і хаотичні режими [6].

Проблема управління такими складними технологічними системами є надзвичайно актуальною з точки зору підвищення ефективності їх функціонування. Крім того, створились необхідні передумови розв'язання даної проблеми на основі сучасних досягнень теорії та практики автоматизованого управління та передових комп'ютерних технологій. Виходячи із особливостей технологічних процесів харчових виробництв, для побудови ефективних стратегій управління ними найбільш перспективним є використання синергетичних алгоритмів, в основі синтезу яких лежить синергетична теорія управління [3].

Сучасна теорія управління, побудована на кібернетичних засадах успішно засвоїла методи досить грубої зовнішньої дії примусового характеру на різні технічні об'єкти, що приводить до значних витрат ресурсів для потреб управління. Синергетичний підхід дозволяє розробити нові методи досягнення цільових станів об'єкта управління, оснований на процесах самоорганізації в нелінійних динамічних системах, і побудувати універсальні об'єктивні закони телеомного управління на основі врахування фізико-хімічних властивостей явищ, які відбуваються в об'єктах управління. При цьому основна увага зосереджується на кооперативних, когерентних і самоузгоджувальних процесах, що виникають в складних нелінійних системах управління [7]. Важливим аспектом побудови синергетичних алгоритмів управління є необхідність створення способів аналізу причин виникнення, формування та дії внутрішніх сил резонансного характеру, що приводять до виникнення у фазовому просторі систем управління стійких дисипативних структур, які відображують природні властивості об'єкта управління. Ця принципово нова проблема теорії управління породжує необхідність розв'язання самостійних специфічних задач у конкретній предметній галузі — відповідній технології харчових виробництв.

Об'єктом управління є технологічні процеси виробництва пива, зокрема, досліджувались процеси приготування пивного сусла, однією із основних технологічних операцій яких є процес затирання. Цей процес передбачає гідроліз крохмалю сировини — солоду при гідротермічній обробці, яка здійснюється за схемою:

під дією  $\alpha$ -амілази



під дією  $\beta$ -амілази



Гідролізу піддається субстрат, в результаті чого отримуються продукти – цукри: глюкоза, мальтоза (рис. 1).

За методиками [1, 2] розроблена нелінійна, багатомірна, багатозв'язна кінетична модель гідролізу затору [5]:

$$\frac{dG_R}{dt} = a - l \frac{E}{L + EK + G_R + M_1 G_1} \quad (1)$$

$$\frac{dG_1}{dt} = k \frac{E}{L + EK + G_R + M_1 G_1} - l_1 \frac{E_1}{L_1 + E_1 K_1 + G_1 + M_2 G} \quad (2)$$

$$\frac{dG}{dt} = k_1 \frac{E_1}{L_1 + E_1 K_1 + G_1 + M_2 G} - \mu \frac{XG}{1 + G + \mu_2 X} \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dt} = E_0 \frac{G_R}{\beta + G_R} X \frac{N}{N + G_1 + MG} - \alpha E \quad (4)$$

$$\frac{dE_1}{dt} = E_{01} \frac{G_1}{\beta_1 + G_1} X \frac{N_1}{N_1 + G} - \alpha_1 E_1 \quad (5)$$

$$\frac{dX}{dt} = \nu_1 \frac{XG}{1 + G + \mu_2 X} - \nu_2 X \quad (6)$$

де  $E_0$  – коефіцієнт активності  $\alpha$ -амілази;  $E_{01}$  – коефіцієнт активності  $\beta$ -амілази;  $a, l, K, L, M_1, k, l_1, L_1, K_1, M_2, k_1, m, m_2, \nu, N, \beta, \nu_1, N_1, \beta_1, m_1$  – параметри моделі.

Було проведено дослідження моделі (1-6) з метою виявлення проявів атрактивної поведінки та оцінки впливу зовнішніх збурень та внутрішніх флуктуацій. Доповнена стохастичною складовою у вигляді вінерівського процесу

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} d \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

модель (1-6) розв'язувалась як система стохастичних нелінійних диференціальних рівнянь методом Кузнецова Д.Ф. [4]. Для цього здійснювалось перетворення моделі (1-7) шляхом другого уніфікованого розкладання Тейлора-Іто

$$R(x_s, s) = R(x_t, t) + \sum_{l=1, k=1}^m C_{lk}^{(l)} \dots C_{lk}^{(k)} L_l R(x_t, t) * J_{(l-1)k}^{(l)} + D_{r+1, st} \quad (8)$$

де  $J_{(l-1)k}^{(l)}$  – розкладання повторних стохастичних інтегралів Іто і Стратоновича,  $L_l R(x_t, t)$  – поліном Лежандра,  $C_{lk}^{(l)}$  – біноміальний коефіцієнт,  $A_q$  – деяка підмножина,  $s, t$  – момент часу,  $k$  – коефіцієнт ( $k=1$ ),  $l$  – параметр ( $l=0,1,2,\dots$ ),  $\xi_{st}^{(l)}$  – випадкові процеси,  $D_{r+1, st}$  – залишковий член.

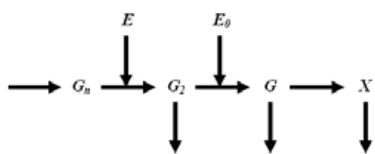


Рис 1. Схема гідролізу крохмалю при затиранні:  $G_1$  — концентрація крохмалю;  $G_2$  — концентрація мальтодекстрину;  $G$  — концентрація мальтози;  $E$  — концентрація  $\alpha$ -амілази;  $E_0$  — концентрація  $\beta$ -амілази;  $X$  — концентрація глюкози

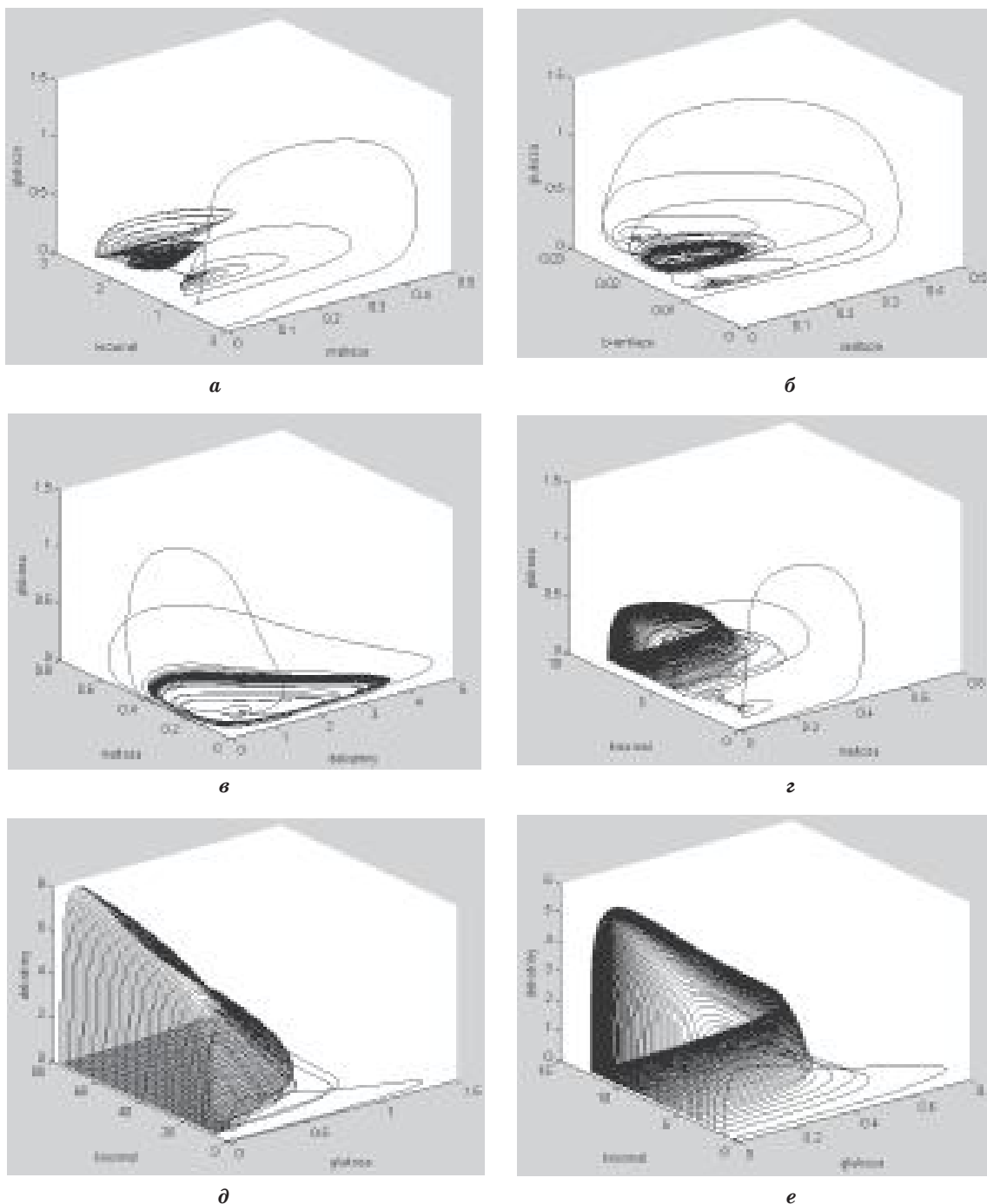


Рис. 2 Фазові портрети динаміки процесів гідролізу:  
 $a$  —  $L=0.09$ ;  $L1=1.1$ ;  $K1=0.1$ ;  $K=1$ ;  $E_0=0.03$ ;  $E_{01}=0.8$ ;  $b$  —  $L=0.05$ ;  $L1=1.2$ ;  $K1=0.1$ ;  $K=1$ ;  $E_0=0.03$ ;  $E_{01}=0.8$ ;  $c$  —  $L=0.09$ ;  $L1=1.2$ ;  $K1=0.1$ ;  $K=1$ ;  $E_0=0.06$ ;  $E_{01}=0.8$ ;  $z$  —  $L=0.09$ ;  $L1=1.2$ ;  $K1=0.1$ ;  $K=1$ ;  $E_0=0.03$ ;  $E_{01}=1.0$ ;  $d$  —  $L=0.09$ ;  $L1=1.2$ ;  $K1=0.4$ ;  $K=1$ ;  $E_0=0.03$ ;  $E_{01}=0.8$ ;  $e$  —  $L=0.09$ ;  $L1=1.2$ ;  $K1=0.1$ ;  $K=0.02$ ;  $E_0=0.03$ ;  $E_{01}=0.8$

Модель досліджувалась при таких значеннях параметрів  $a=0,01$ ;  $l=0,5$ ;  $l_1=2$ ;  $k=1$ ;  $k_1=4$ ;  $m=4$ ;  $m_1=2,3$ ;  $m_2=1$ ;  $v=1$ ;  $v_1=1$ ;  $L=0,03-0,1$ ;  $b=0,005$ ;  $N_1=0,1$ ;  $N=0,05$ ;  $b_1=0,2$ ;  $L_1=1-1,3$ ;  $M_1=1$ ;  $M_2=1$ ;  $K_1=0,05-0,5$ ;  $K=0,01-1,4$ ;  $E_0=0,03-0,1$ ;  $E_{01}=0,8-1,5$ .

Як видно із результатів моделювання (рис. 2), фазові портрети об'єкта характеризують еволюцію атрактивної поведінки процесів гідролізу затору фокус'границний цикл'тор'дивний атрактор [1].

Як показав аналіз результатів моделювання параметри моделі  $L$ ,  $L_1$ ,  $K_1$ ,  $K$ ,  $E_0$ ,  $E_{01}$  якісно впливають на атрактивну поведінку об'єкта, що стосується впливу зовнішніх збурень  $f_{ii}$ , то вони викликають прискорення або зповільнення атрактивних змінювань, ніяким чином не впливаючи на характер поведінки.

В постановці задачі синтезу стратегій управління опис системи задається диференціальними рівняннями об'єкта [3, 4]

$$\dot{X}(t)=F(x, u, g, J, M), \quad (9)$$

в склад яких входять координати стану  $x(t)$ , а також деякі зовнішні сили, що складаються із управлінь  $u(t)$ , завдань  $g(t)$ , зовнішніх(збурюючих)  $M(t)$  і параметричних  $J(t)$  впливів. Синергетична теорія управління полягає у формуванні у фазовому просторі систем управління синтезованих цільових атракторів, на які невідворотно потрапляють всі траєкторії руху замкненої системи «об'єкт — регулятор». Це дозволяє розробити нові методи цільової дії на процеси самоорганізації в нелінійних динамічних об'єктах. Виходячи із синергетичного підходу на основі

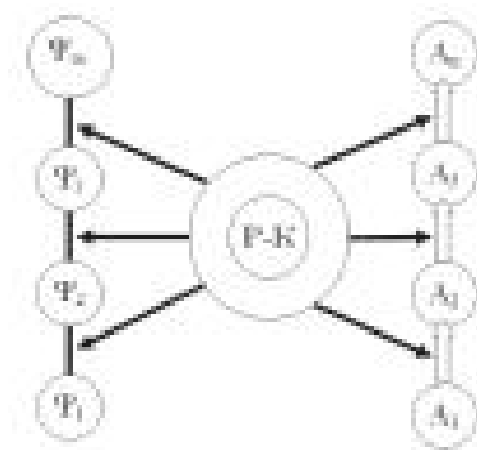


Рис. 3 Концептуальна схема організації управління технологічним процесом за методом АКАР

принципу «розширення-стискання» розроблений новий метод аналітичного конструювання агрегованих регуляторів — АКАР [3], що базується на ідеї введення притягуючих інваріантних багатообразів  $\psi_2 \times (x_1 - x_n) = 0$ , на яких найкращим чином узгоджуються природні властивості об'єкта та вимоги до задач управління. З математичної точки зору проблема синергетичного синтезу [3] полягає у способі генерації таких законів управління  $u(\psi) = u(x)$ , які дозволили б перевести систему із довільного початкового стану  $A_1$  спочатку в окіллія багатообразів  $\psi_2(x) = 0$ , а потім забезпечити стійкий рух системи біля цих багатообразів аж до попадання системи на цільові атрактори (рис. 3). Ця задача вирішується комплексом корегуючих регуляторів  $P-K$ , що мають ієрархічну структуру.

Для процесів приготування пивного суслу розроблена ієрархічна система управління, структура якої передбачає реалізацію трьох рівнів координуючих регуляторів. Перший рівень реалізує локальне регулювання окремих технологічних параметрів (температури, концентрації, витрати), другий рівень забезпечує оптимізацію технологічних процесів за критеріями продуктивності обладнання та якості продукції, третій рівень дозволяє досягти найкращих показників економічної ефективності (прибуток, рентабельність).

**Висновки.** Зважаючи на природні особливості процесів приготування пивного суслу, зокрема до здатності створення дисипативних просторово-часових структур самоорганізації, доцільно для ефективного управління цими процесами використовувати синергетичні механізми, які забезпечують оптимальний перехід процесів від непередбачуваної поведінки та силових управляючих дій примусового характеру до ресурсоощадних технологій управління, що адаптовані до природньої поведінки об'єкта.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гачок В. П. Странные аттракторы в биосистемах / В.П. Гачок; Отв. ред. Самойленко А. М.; АН УССР. Ин-т теорет. физики. — Киев: Наук. думка, 1989. — 240 с.
2. Грицай В.Й. Прогнозованість структурної нестійкості та виду атрактора біохімічного процесу // Біофізичний вісник: науч.-техн. зб. — К.: Техніка, 2009. — Вып. 23. — С. 77 — 85.
3. Колесников А.А. Синергетика и проблемы теории управления / А.А. Колесников; - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 504 с.
4. Кузнецов Д.Ф. Стохастические дифференциальные уравнения: теория и практика численного решения / Д.Ф. Кузнецов; — 3-е изд., испр. и доп. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 800 с.
5. Місюра М.Д. Ідентифікація біотехнологічних процесів в пивоварному виробництві / М.Д. Місюра, В.Д. Кишенько // Матеріали 12-ої Міжнародної конференції по автоматичному управлінню «Автоматика — 2005». — Х.: ХТУРЕ, 2005. — т. 2. — С. 55.
6. Ризниченко Г.Ю. Математические модели биологических производственных процессов / Г.Ю. Ризниченко, А.Б. Рубин; — М.: Изд-во МГУ, 1993. — 302 с.
7. Стрижак П.Є. Детермінований хаос в хімії / П.Є. Стрижак; — К.: Академперіодика, 2002. — 286 с.

**В.Д. Кишенько, А.П. Лобок,  
Н.В. Чернецкий**

### **Синергетическое управление технологическими процессами приготовления пивного сусла**

*В статье рассматривается проблема повышения эффективности функционирования сложного комплекса производства пивного сусла. Приведены методы совершенствования системы управления технологическими процессами производства пива путем организации ресурсосберегающих управляющих воздействий на основе принципов нелинейной динамики. Построена нелинейная динамическая модель кинетики процессов гидролиза крахмала при затирке. Проведено компьютерное моделирование разработанной математической модели и установлены проявления аттрактивного поведения объекта управления при изменениях технологических параметров: концентрации ферментов, концентрации субстрата, концентрации сахаров. Исследовано влияние внешних возмущающих факторов на характер поведения биотехнологического объекта. Сформулирована задача ресурсосберегающего управления процессами приготовления пивного сусла на основе синергетического подхода. Проведен синтез иерархической системы управления технологическими процессами приготовления пивного сусла с использованием метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов.*

*Ключевые слова:* производство пива, пивное сусло, управления технологическими процессами, синергетика, математическое моделирование, кинетические уравнения.

**V. Kyshenko, O. Lobok,  
M. Chernetskyi**

### **Synergetic management of technological processes of beer wort production**

*The article examines the problem of increase of efficiency of functioning of difficult technological complex of beer wort production. It also presents the methods of improvement of control system by technological processes production of beer by organization of resource saving of managing actions on the basis of principles of*

*nonlinear dynamics. Nonlinear dynamic model of the kinetics processes of hydrolysis of starch during mashing is built. Computer simulations are conducted, mathematical model is developed and behavioural manifestations attractive control object by changing process parameters is set. They are: the concentration of enzyme, substrate concentration, the concentration of sugars. The article presents the influence of external disturbing factors on the behaviour of biotech facility. It deals with the problem of resource saving processes of making beer wort on the basis of synergetic approach. It also presents the synthesis of hierarchical control systems of technological processes of making beer wort using the method of analytical design of aggregated regulators.*

**Key words:** *production of beer, beer wort, process control, synergetics, mathematical modelling, kinetic equation.*

---

*e-mail:* jimp@ukr.net

*Надійшла до редколегії 20.05.2012 р.*