

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

На правах рукопису



ЧЕРНЕЦЬКИЙ МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 004.896:681.511.4:663.44

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ
ПРИГОТУВАННЯ ПИВНОГО СУСЛА НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ ТА
МЕТОДІВ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ**

Спеціальність 05.13.07 - Автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Кишенько Василь Дмитрович,
Національний університет харчових технологій,
м. Київ,
професор кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Богушевський Володимир Святославович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
м. Київ,
професор кафедри фізико-хімічних основ технології металів;

доктор технічних наук, професор
Нефьодов Леонід Іванович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
м. Харків,
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Захист відбудеться « 25 » травня 2016 року о 14-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий « 18 » квітня 2016 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 26.058.05,
к. т. н., доцент



О. М. М'якило

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Одним із основних елементів пивоварного виробництва, як складної організаційно-технічної системи, є заторно-варильне відділення. Його робота визначає в цілому ефективність функціонування пивзаводу, тому що режим роботи відділення і самий продукт, пивне сусло, забезпечують необхідну кількість та якість продукції, визначають енергетичні витрати і характеризують в значній мірі втрати сухих речовин в процесі виробництва. Характерним для технологічних процесів приготування пивного сусла є наявність переміжності, що полягає в змінюванні типів технологічних режимів як з регулярного, детермінованого характеру на стохастичний і хаотичний, суттєвої нелінійності, нестаціонарності, значної невизначеності в оцінці технологічних параметрів та виробничих ситуацій. Такі особливості об'єкта керування вимагають при синтезі системи керування технологічними процесами приготування пивного сусла застосування принципів нелінійної динаміки, методів синергетичного керування та детермінованого хаосу, інтелектуальних механізмів, сучасних інформаційних технологій. Для цього необхідно розробити та дослідити математичні нелінійні моделі кінетики процесу затирання пивного сусла, що дозволить виявити агреговані багатообрази-атрактори на всіх рівнях ієрархії керування технологічним комплексом приготування пивного сусла, встановити визначальні параметри порядку та керування, які забезпечують організацію телеомного ресурсощадного керування за рахунок топологічно узгоджених керувальних дій резонансного характеру. Потрібно синтезувати такі алгоритми керування на основі методу АКАР (аналітичного конструювання агрегованих регуляторів), які формують оптимальні переходи між атракторами. Причому, реалізація алгоритмів керування буде виконана на основі інтелектуальних методів, що значно підвищить швидкодію та робастність системи керування. Впровадження розробок буде організоване на основі сучасних інформаційних засобів (локально-обчислювальних мережах, базах даних та знань). Розв'язання таких науково-технічних задач при розробці системи автоматизованого керування технологічним комплексом приготування пивного сусла пивзаводу є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами планами, темами.

Дисертація виконана в рамках науково-дослідних робіт кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій «Створити динамічні експертні системи керування біотехнологічними комплексами харчових виробництв в умовах ситуаційної невизначеності» (номер державної реєстрації 0112U001085), «Теоретичні основи розробки робастно-оптимальних систем керування складними технологічними об'єктами та комплексами в умовах невизначеності» (номер державної реєстрації 0115U000379) та «Наукові основи створення автоматизованих систем управління для комп'ютерно-інтегрованих виробництв харчової промисловості» (номер державної реєстрації 0112U001496).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності пивоварного виробництва шляхом створення інтелектуальної системи керування технологічними процесами приготування пивного суслу і системного синтезу ресурсощадних стратегій керування на основі методів синергетики та детермінованого хаосу.

Для досягнення вказаної мети визначені такі основні задачі:

- провести системний аналіз об'єкта керування і виявити чинники для поліпшення якості продукції, підвищення продуктивності, зменшення витрат ресурсів;

- дослідити моделі кінетики гідролізу затору для визначення параметрів порядку та керувальних параметрів в умовах дії зовнішніх стохастичних збурень;

- встановити ефекти переміжності, утворення дисипативних хаотичних просторово-часових структур, виявити атрактивну поведінку об'єкта та оцінити показники хаотичності за часовими рядами технологічних змінних процесів приготування пивного сусла, отриманих при експериментальних дослідженнях у виробничих умовах пивзаводу;

- здійснити ідентифікацію математичних статичних та динамічних моделей заторно-варильного відділення пивзаводу, що відображають впливи якісних показників сировини та режимних параметрів на протікання технологічних процесів приготування пивного сусла;

- виявити на основі математичних моделей як інваріантних багатообразів-атракторів направлену самоорганізацію процесів приготування пивного сусла згідно із визначеними цілями керування заторно-варильним відділенням пивзаводу;

- провести синтез оптимальних законів синергетичного керування процесами приготування пивного сусла у відповідності із методологією аналітичного конструювання агрегованих регуляторів із використанням лінгвістичної апроксимації за Коско для забезпечення оперативних малопотужних ефективних керувальних дій резонансного характеру;

- створити структуру та розробити алгоритмічне і програмне забезпечення інтелектуальної системи синергетичного керування процесами приготування пивного сусла.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси приготування сусла на пивзаводі.

Предметом дослідження є системи автоматизованого керування заторно-варильним відділенням пивзаводів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використовуються методи системного аналізу, методи нелінійної динаміки та детермінованого хаосу, вейвлет-аналізу, флікер-шумової спектроскопії, імітаційного моделювання, базові принципи ситуаційного підходу, методи синергетичного керування технологічними процесами та інженерії знань. Вірогідність основних теоретичних положень і результатів досліджень підтверджувалась шляхом використання математичного моделювання та експериментальних даних.

Наукова новизна:

- вперше для технологічних об'єктів пивоварного виробництва здійснений синтез синергетичних агрегованих систем керування з використанням лінгвістичної апроксимації за Коско для організації малопотужних ресурсощадних керувальних дій резонансного стимулюючого характеру, що забезпечує досягнення визначених в залежності від виробничої ситуації цілей – атракторів як відображення бажаного у відповідності з фізико-хімічною природою об'єкта його цільового стану;

- вперше розроблена структура інтелектуальної автоматизованої системи синергетичного керування процесами приготування пивного суслу на основі динамічних баз знань та кінетичних нелінійних моделей;

- одержали подальший розвиток математичні моделі процесів кінетики біохімічних процесів за рахунок врахування впливів стохастичних збурень в широкому діапазоні їх змінювань, що дозволило виявити характерну атрактивну поведінку об'єкта керування та встановити діапазони змінювання керувальних параметрів при виникненні явищ самоорганізації;

- удосконалено процедуру встановлення показників переміжності, хаотичності на основі теорії русел і джокерів та рекурентних діаграм, що дає можливість підвищити ефективність синтезу стратегій синергетичного керування процесами приготування пивного суслу;

- удосконалені нелінійні моделі кінетики процесів приготування пивного затору, що дозволяють в реальному часі змінювати температурні режими та тривалість стадій приготування пивного затору.

Практичне значення та реалізація отриманих результатів. Розроблена функціональна структура інтелектуальної системи керування процесами приготування пивного суслу, яка може бути використана при проектуванні сучасних автоматизованих систем в галузях промисловості, де відбуваються процеси біохімічних перетворень (спиртова, мікробіологічна, хлібопекарська та інші).

Результати дисертаційної роботи передані для впровадження на ПАТ «Оболонь», а також використовуються у навчальному процесі на кафедрі автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, що викладені в даній роботі, отримані здобувачем особисто. Дисертація є самостійною роботою автора. В публікаціях у співавторстві особистий внесок автора полягає в наступному: в [1] обґрунтовані параметри моделей багатообразів-атракторів, які визначають оптимальні траєкторії в поведінці об'єкта; в [2] автором запропонована методика розрахунку керувальних дій у відповідності із ситуаціями; в [3] запропонований новий підхід до аналізу часових рядів технологічних змінних заторно-варильного відділення пивзаводу з використанням принципів синергетики; в [4] проведена оцінка кількісних показників хаотичності, стохастичності та ентропії; в [5] здійснений аналіз моделей-предикторів для задач автоматичного керування процесами приготування пивного суслу; в [6] запропонований алгоритм виявлення

системних змінювань в об'єкті керування; в [7] запропоновані додаткові інтелектуальні функції системи керування процесами приготування пивного суслу; в [9] проведений аналіз об'єкта для організації ресурсощадних стратегій керування; в [11] проведений аналіз ефективності моделей прогнозування тенденцій поведінки технологічних об'єктів керування на основі теорії детермінованого хаосу; в [14] здійснений вибір типів вейвлетів та їх параметрів; в [16] виявлені області русел та джокерів методом графічного тесту Гілмора; в [17] запропонована методика дослідження хаотичної поведінки технологічного об'єкта керування; в [18] проведений синтез синергетичних регуляторів технологічних параметрів заторно-варильного відділення пивзаводу; в [19] розроблено методи зменшення невизначеностей у вхідній інформації, яка надходить від мікропроцесорних систем керування та лабораторії.

Планування основних напрямків роботи, обговорення результатів та підготовка публікацій проходили за безпосередньою участю наукового керівника В.Д. Кишенька.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на: Міжнародній конференції з автоматичного управління АВТОМАТИКА/ AUTOMATICS – 2013, (Миколаїв, 2013); Всеукраїнській науково-практичній internet-конференції "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку", (Черкаси, 2014); Наукових конференціях молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, НУХТ, 2012-2015); 21 Міжнародній конференції з автоматичного управління АВТОМАТИКА/ AUTOMATICS – 2014 (Київ, 2014); 3 Міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ-2014)", (Чернівці, 2014); XII міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)», (Вінниця, 2014); Міжнародній науковій конференції, присвяченій 130-річчю Національного університету харчових технологій "Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти в харчовій промисловості", (Київ, 2014); Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами", (Київ, 2014); 3 Міжнародній науково-практичній конференції "Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)", (Черкаси, 2015); 22 Міжнародній конференції з автоматичного управління "АВТОМАТИКА / AUTOMATICS – 2015", (Одеса, 2015).

Публікації. Основні результати роботи викладено у 20 друкованих працях, з яких - 6 статей у фахових виданнях, 2 із них у закордонних; один патент України та 13 тез доповідей.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (204 найменувань) і додатків. Загальний обсяг становить 202 стор., з яких зміст викладено на 168 стор. тексту і включає 73 рисунки та 9 таблиць та 10 додатків.

Основні положення, що виносяться на захист: результати досліджень технологічного процесу приготування пивного суслу як складного об'єкта в умовах невизначеності, переміжності та детермінованого хаосу; нелінійні моделі кінетики процесів приготування пивного затору; математичні моделі, що зв'язують режимні параметри процесу приготування пивного суслу з якісними показниками сировини і продуктів; моделі прогнозування поведінки об'єкта керування – заторно-варильного відділення пивзаводу; моделі знань, в яких визначені процедури прийняття рішень при керуванні технологічними процесами приготування пивного суслу; алгоритми, структура та параметри системи синергетичного керування заторно-варильним відділенням пивзаводу на основі методу АКАР; функціональна структура, алгоритмічне та програмне забезпечення інтелектуальної системи керування процесами приготування пивного суслу.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень. Визначена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ присвячений аналізу технологічних процесів приготування пивного суслу, як складного біотехнологічного об'єкта керування, оцінці рівня систем автоматизації заторно-варильного відділення пивзаводу, визначено перспективи розвитку систем керування технологічним комплексом приготування пивного суслу на основі принципів та методів сучасної теорії автоматичного керування складними організаційно-технічними об'єктами.

Встановлено, що технологічні процеси приготування суслу на пивзаводах мають всі характерні ознаки складних технологічних систем, серед яких можна виділити наявність складного переплетіння технологічних процесів, що мають різну фізико-хімічну природу явищ, багатofакторність, нестаціонарність, високий ступінь невизначеності, нелінійність, складний характер поведінки. Ефективне керування таким об'єктом можливе при умові застосування сучасних методів керування з використанням передових інформаційних технологій.

Аналіз розробок в області технології виробництва пива показав, що створені необхідні передумови для розробки та реалізації складних систем автоматичного керування. Серед таких робіт слід відмітити праці таких вчених як В. Кунце, Л. Нарциса, В.А. Домарецького, В.Л. Яровенка, П.М. Мальцева, Ф. Главачека. Значний вклад в розвиток систем автоматизації пивоварного виробництва внесли такі вчені: П.І. Теліс, Ю.Д. Серпер, Л.М. Третьак. Принципи та методи синергетики як науки про самоорганізацію в складних системах розроблені Г. Хакеном, І.Р. Пригожиним, Г.Г. Малинецьким, Б.Б. Мандельбротом, Е. Федером. Досягнуті значні успіхи у використанні методології синергетики та нерівноважної термодинаміки при дослідженні технологічних об'єктів В.В. Кафаровим, В.П. Гачком, Г.Ю. Різніченко, П.Є. Стрижаком. Школою професора А.А. Колеснікова створені та застосовані методи синергетичного керування складними об'єктами, в тому числі,

ефективний метод аналітичного конструювання агрегованих регуляторів. Високу ефективність в керуванні технологічними об'єктами забезпечили інтелектуальні технології в розробках І. Мамдані, Д.О. Поспелова, М.З. Згуровського.

Аналіз систем автоматизації заторно-варильного відділення пивзаводу показав їх недостатню ефективність через низький рівень реалізації прикладних функцій керування, які не враховують особливостей перебігу технологічних процесів такого складного об'єкта. Визначені основні напрямки розвитку систем автоматизації пивоварного виробництва на основі застосування синергетичних принципів та використання інтелектуальних методів. Сформульовані задачі досліджень.

У другому розділі з позиції системно-синергетичного підходу проведений аналіз процесів приготування пивного суслу як складного об'єкта ферментативного каталізу гідролізу крохмалю; на основі кінетичної моделі біохімічних процесів приготування пивного затору обґрунтовані керувальні параметри, завдяки яким забезпечується самоорганізація об'єкта через утворення дисипативних просторово-часових структур; шляхом комп'ютерного моделювання виявлений вплив таких параметрів на характер атрактивної поведінки системи; здійснений аналіз та охарактеризована дія зовнішніх стохастичних збурень на поведінку об'єкта.

На основі аналізу технологічних процесів приготування пивного суслу як складної біотехнологічної системи з позиції нерівноважної термодинаміки та синергетики виявлені її параметри порядку, що дозволило удосконалити базову нелінійну модель кінетики гідролізу В.П. Гачка, В.Й. Грицяя і адаптовану для процесів гідролізу затору М.Д. Місюрою у вигляді системи нелінійних кінетичних рівнянь:

$$\frac{dG_n}{dt} = a - l \frac{E}{L + E} \frac{G_n}{K + G_n + M_1 G_2} \quad (1)$$

$$\frac{dG_2}{dt} = k \frac{E}{L + E} \frac{G_n}{K + G_n + M_1 G_2} - l_1 \frac{E_1}{L_1 + E_1} \frac{G_2}{K_1 + G_2 + M_2 G} \quad (2)$$

$$\frac{dG}{dt} = k_1 \frac{E_1}{L_1 + E_1} \frac{G_2}{K_1 + G_2 + M_2 G} - \mu \frac{XG}{1 + G + \mu_2 X} \quad (3)$$

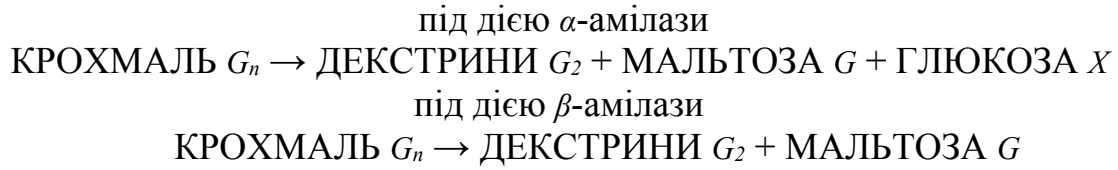
$$\frac{dE}{dt} = E_0 \frac{G_n}{\beta + G_n} X \frac{N}{N + G_2 + MG} - \alpha E \quad (4)$$

$$\frac{dE_1}{dt} = E_{01} \frac{G_2}{\beta_1 + G_2} X \frac{N_1}{N_1 + G} - \alpha_1 E_1 \quad (5)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_1 \frac{XG}{1 + G + \mu_2 X} - \mu_0 X \quad (6)$$

G_n – концентрація крохмалю; G_2 – концентрація мальтодекстрину; G – концентрація мальтози; E – концентрація α -амілази; E_1 – концентрація β -амілази; X – концентрація глюкози; E_0 – коефіцієнт активності α -амілази; E_{01} – коефіцієнт активності β -амілази; $a=0,5$, $l=0,01$, $K=0,001$, $L=0,09$, $M_1=1$, $k=0,5$, $l_1=1$, $L_1=0,6$, $K_1=0,5$, $M_2=1$, $k_1=3$, $\mu=3$, $\mu_2=1$, $\beta=1$, $N=0,01$, $\alpha=0,001$, $\beta_1=1$, $N_1=0,5$, $\alpha_1=0,5$, $\mu_1=2,3$, $M=1$, $\mu_0=0,389$ – параметри моделі.

Модель (1-6) відображає процес гідролізу крохмалю до цукру (мальтози, глюкози) під дією ферментів α -амілази та β -амілази за схемою:



Проведене комп'ютерне моделювання з метою оцінки впливу визначених керувальних параметрів E_0 , E_{01} на змінювання структури фазового портрета об'єкта (рис. 1).

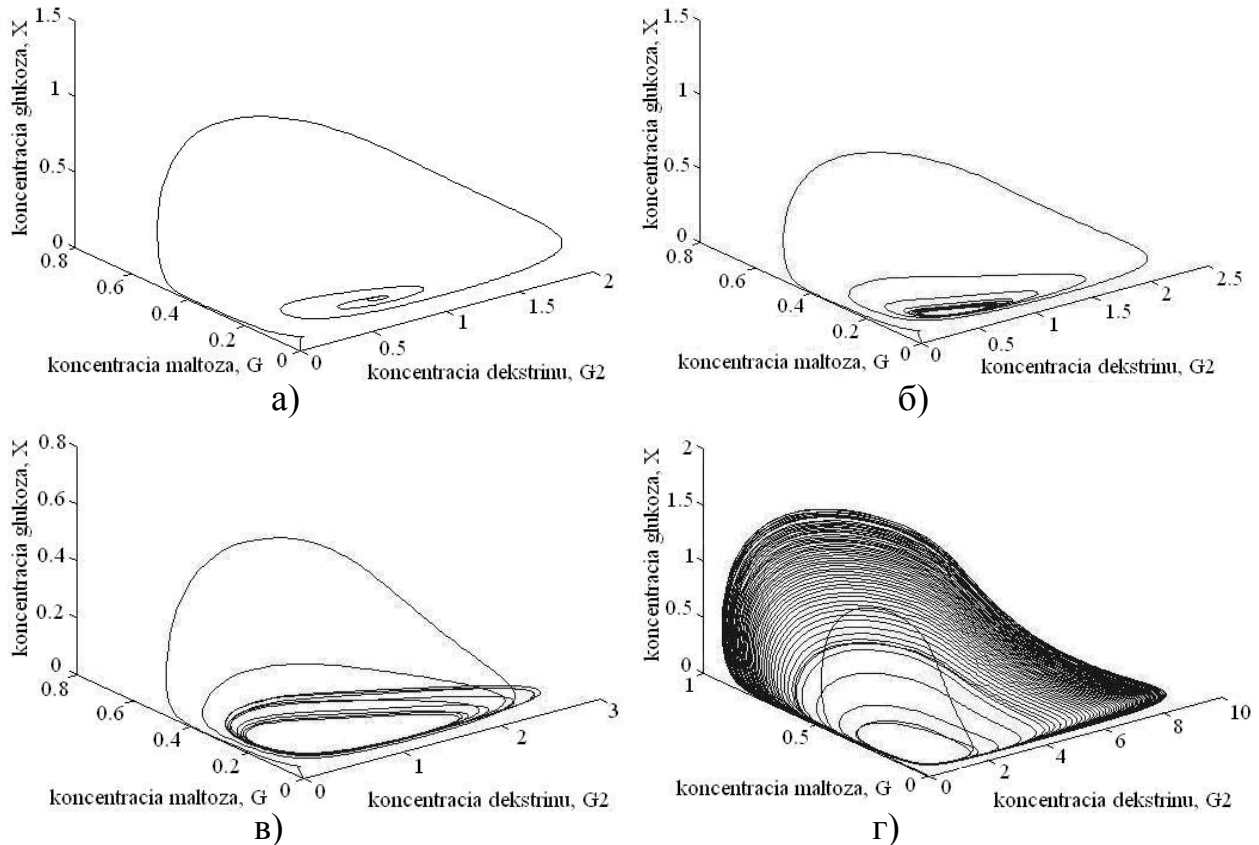


Рис. 1. Фазові портрети об'єкта при: а) $E_0=0,06$, $E_{01}=0,6$; б) $E_0=0,06$, $E_{01}=0,8$; в) $E_0=0,08$, $E_{01}=1,3$; г) $E_0=0,08$, $E_{01}=1,5$

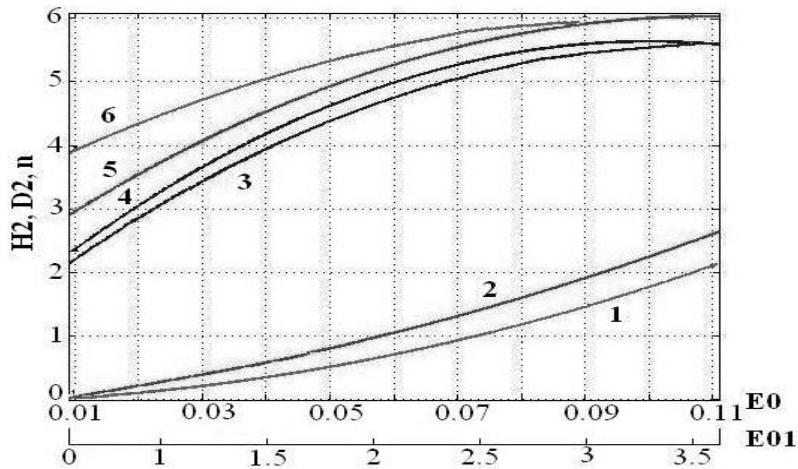


Рис. 2. Характер впливу керувальних параметрів на показники атрактора: 1) $H_2 - E_{01}$; 2) $H_2 - E_0$; 3) $D_2 - E_0$; 4) $D_2 - E_{01}$; 5) $n - E_{01}$; 6) $n - E_0$

Результати моделювання показали, що збільшення керувальних параметрів E_0 , E_{01} викликають ускладнення структури фазових портретів об'єкта за сценарієм: стійкий фокус – граничний цикл – дивний атрактор. Оцінка структурних змінювань здійснювалась за кореляційною розмірністю D_2 , кореляційною ентропією Колмогорова H_2 та

розмірністю вкладення n (рис. 2).

Встановлені значні структурні змінювання в поведінці об'єкта, викликані ендогенними параметрами, порівнювались із впливом екзогенних факторів у вигляді стохастичних збурень як вінерівський процес різної інтенсивності. Розглядалась система нелінійних диференціальних стохастичних рівнянь Іто:

$$d \begin{bmatrix} G_n(t) \\ G_2(t) \\ G(t) \\ E(t) \\ E_1(t) \\ X(t) \end{bmatrix} = [M]dt + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C \end{bmatrix} d \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ f_4(t) \\ f_5(t) \\ f_6(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

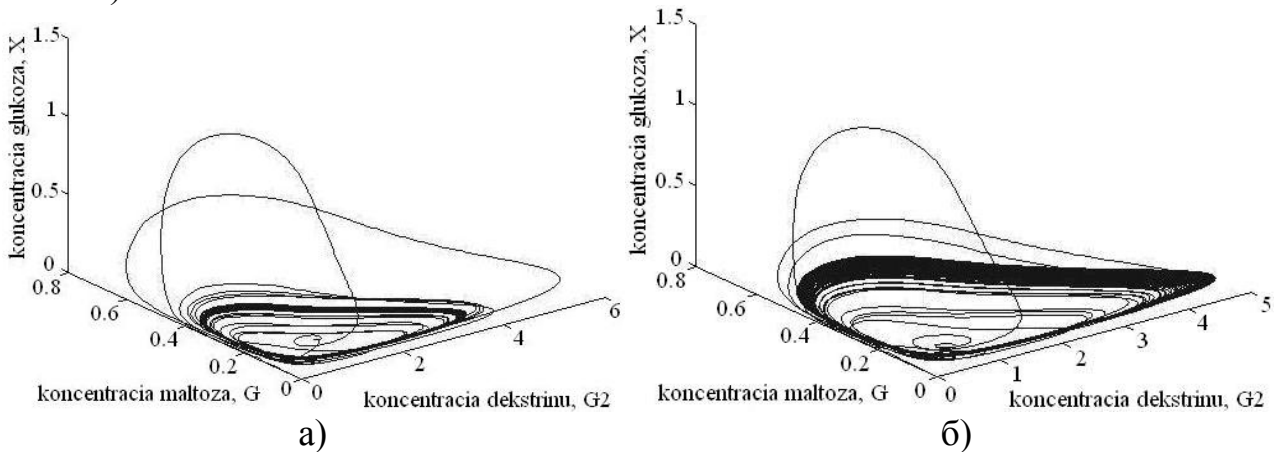
де $G_n(t)$, $G_2(t)$, $G(t)$, $E(t)$, $E_1(t)$, $X(t)$ – компоненти розв'язку рівняння (7); $f_1(t)$ – $f_6(t)$ – вінерівський процес; C – постійна.

Розв'язання системи (7) здійснювалось за методикою професора Д.Ф. Кузнецова шляхом розкладання стохастичних інтегралів за Тейлором-Іто:

$$R(x_s, s) = R(x_t, t) + \sum_{q=1}^r \sum_{k,j,l_1,\dots,l_k} (k, j, l_1, \dots, l_k) \in A_q \frac{(s-t)^j}{j!} \times \\ \times \sum_{i_1, \dots, i_k=1}^m G_{l_1}^{(i_1)} \dots G_{l_k}^{(i_k)} L^j R(x_t, t) I_{l_1, \dots, l_k, s, t}^{(i_1, \dots, i_k)} + D_{r+1, s, t} \quad (8)$$

де $R(x_s, s)$ – випадковий процес $r+1$ раз диференційований за Іто на проміжку $[0, T]$; $I_{l_1, \dots, l_k, s, t}^{(i_1, \dots, i_k)}$ – розкладання повторних стохастичних інтегралів Іто і Стратоновича; $L^j R(x_t, t)$ – поліном Лежандра; $G_{l_1}^{(i_1)} \dots G_{l_k}^{(i_k)}$ – оператор дифузії; A_q – деяка підмножина; $s, t \in [0, T]: s \geq t$ – моменти часу; k, m, j – коефіцієнт ($k=1$), ($j=0, 1, \dots$); l_1 – параметр ($l_1=0, 1, 2, \dots$); $D_{r+1, s, t}$ – залишковий елемент.

Дослідження системи (7) показало еволюцію фазових траєкторій об'єкта при змінюванні впливу стохастичних збурень, що характеризується параметром C , при цьому утворення дивного хаотичного атрактора відбувається при менших значеннях керувальних параметрів та приводить до відносно незначного змінювання кількісних характеристик фазових портретів (рис. 3, табл. 1).



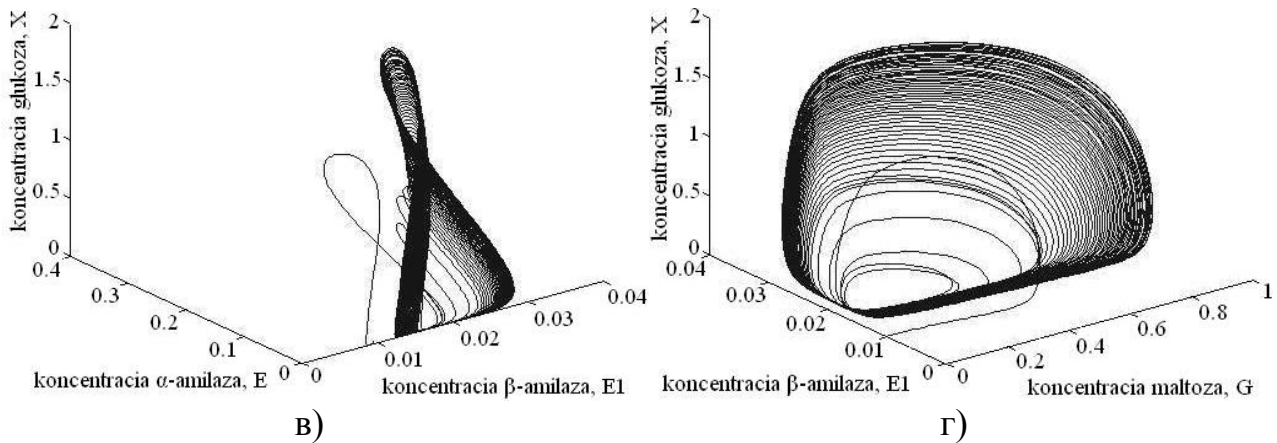


Рис. 3. Фазові портрети об'єкта при: а) $E_0=0,06$, $E_{01}=0,8$, $C=1$; б) $E_0=0,06$, $E_{01}=0,9$, $C=3$; в) $E_0=0,07$, $E_{01}=1,0$, $C=4$; г) $E_0=0,07$, $E_{01}=1,0$, $C=4$

Табл. 1. Кількісна оцінка впливу керувальних параметрів та стохастичних збурень на характер поведінки атрактора

Показник Експеримент	Кореляційна розмірність, D_2	Кореляційна ентропія Колмогорова, H_2	Розмірність фазового простору, n
$E_0=0,06$; $E_{01}=0,8$; $C=1$	6,031	2,871	7
$E_0=0,06$; $E_{01}=0,9$; $C=3$	5,562	1,723	6
$E_0=0,07$; $E_{01}=1,0$; $C=4$	6,351	2,569	7
$E_0=0,07$; $E_{01}=1,0$; $C=4$	6,418	2,903	7

В третьому розділі на основі аналізу часових рядів проведена оцінка типів поведінки об'єкта з позиції нелінійної динаміки та детермінованого хаосу; здійснена реконструкція атракторів системи; встановлені топологічні структури та кількісні оцінки показників хаотичності, стохастичності, детермінованості часових рядів; розроблені моделі прогнозування поведінки об'єкта.

За часовими рядами основних технологічних змінних заторно-варильного відділення пивзаводу виявлений інтермітанс (переміжність) поведінки об'єкта на основі теорії русел та джокерів за допомогою методу графічного тесту Гілмора (рис. 4), за яким виявлені області інтервальних і точкових джокерів (рис. 4а) та інтервальних джокерів із наявними руслами складного частотного спектру у вигляді квазіперіодичних орбіт (рис. 4б).

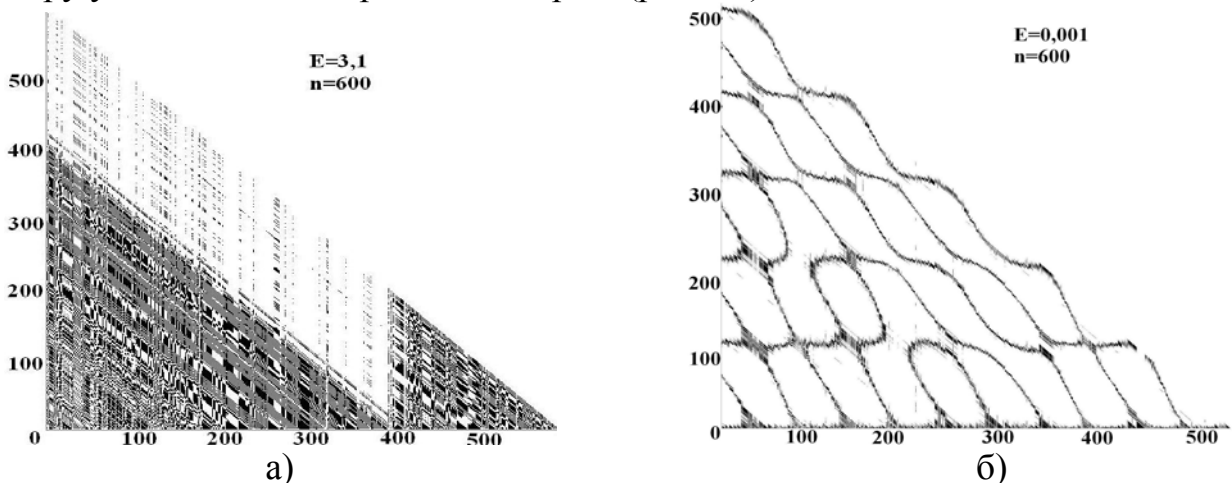


Рис. 4. Графічний тест Гілмора: а) витрати сусла б) температура затирання

Дослідження властивостей технологічних процесів приготування пивного сусла як складної системи з переміжністю проводилось за допомогою рекурентних діаграм, що відображають властивості об'єкта у вигляді геометричних просторово-часових структур (рис. 5). За рекурентними діаграмами проводилась кількісна оцінка переміжності об'єкта за такими показниками: міра рекурентності (RR), міра детермінованості (DET), дивергенція (DIV), ентропія ($ENTR$), частотне розподілення довжин діагональних ліній ($RATIO$), міра замирання (LAM), показник затримки (TT), міра частоти (стохастичності) ($CLEAN$) (табл. 2).

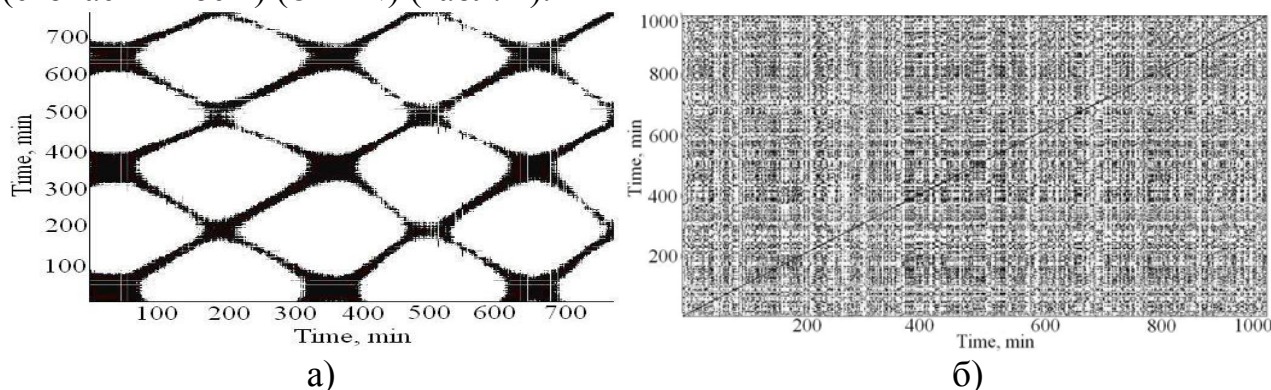


Рис. 5. Топологія рекурентних діаграм: а) температура варки б) витрата сусла

Табл. 2. Кількісна оцінка складності структур рекурентних діаграм

Міра	Температура варки	Витрата сусла	Концентрація сухих речовин	Ступінь оцукрювання
RR	0.079	0.197	0.091	0.262
DET	0.431	0.555	0.521	0.481
DIV	0.021	0.029	0.035	0.041
$ENTR$	1.208	1.358	1.447	1.81
$RATIO$	5.261	4.673	4.675	5.183
LAM	0.528	0.462	0.557	0.423
TT	2.103	5.129	3.653	2.199
$CLEAN$	1,083	4,421	2,193	1,364

Аналіз явищ переміжності проводився також на основі вейвлет-перетворень технологічних змінних за допомогою вейвлетів Морле, що дозволило виділити області хаотичних та стохастичних режимів.

Проведена реконструкція хаотичних атракторів системи у відповідності із теоремою Такенса, згідно з якої уявлення про динаміку складної системи в якісному відношенні можна скласти за поведінкою однієї змінної, з використанням методу Грасбергера і

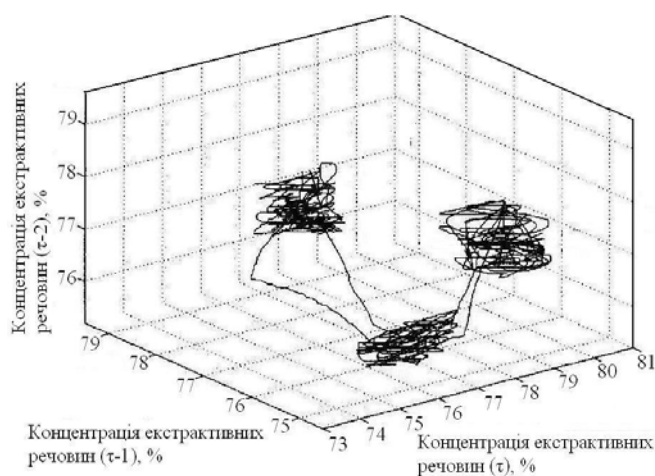


Рис. 6. Реконструйований фазовий портрет динамічної системи із аттракторами

Прокаччіа шляхом побудови лагового фазового простору (рис. 6).

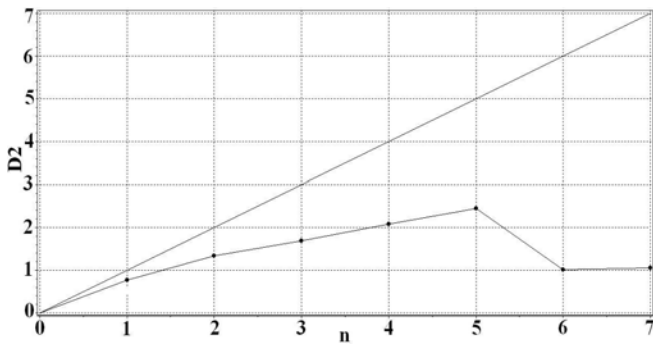


Рис. 7. Залежність кореляційної розмірності D_2 від розмірності вкладення n для температури затирання

Аналіз складної поведінки об'єкта з переміжністю, що включає хаотичні прояви, проводився за показниками кореляційної розмірності D_2 (рис. 7), кореляційної ентропії Колмогорова H_2 (рис. 8), Херста H (рис. 9) та фрактальної розмірності D . Отримані результати по оцінці таких показників дозволили зробити висновок про наявність ділянок в часових рядах із проявами детермінованої поведінки та з переходами в хаотичний чи

стохастичний режими, тобто утворенням дисипативних просторово-часових структур, що мають змінну розмірність вкладення (табл. 3).

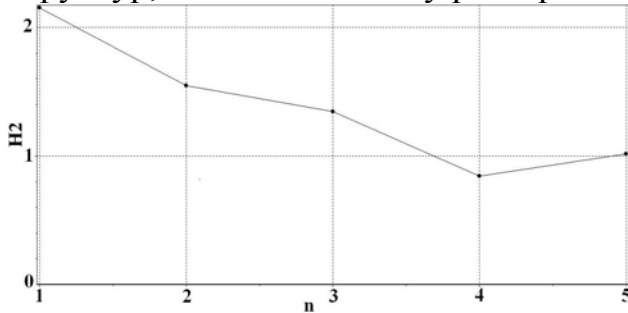


Рис. 8. Залежність ентропії Колмогорова H_2 від розмірності вкладення n для температури затирання

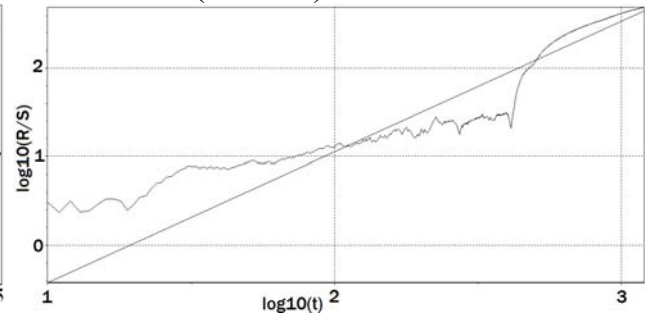


Рис. 9. Визначення показника Херста H на основі аналізу часового ряду температури затирання

Табл. 3. Показники хаотичності часових рядів температури затирання

Доба роботи апарата	Кореляційна розмірність, D_2	Кореляційна ентропія, H_2	Показник Херста, H	Фрактальна розмірність, D	Розмірність вкладення, n
1	2,037	0,845	0,6380	1,3620	4
2	4,881	1,532	0,9801	1,0199	5
3	1,313	0,650	0,8362	1,1638	3
4	3,104	4,751	0,9058	1,0942	4
5	2,251	3,219	0,7326	1,2674	5
6	5,793	1,865	0,7920	1,2080	7
7	4,437	1,063	0,9819	1,0181	7
8	3,174	2,638	0,9213	1,0787	5
9	2,889	0,913	0,6537	1,3463	4
10	4,609	0,784	0,8629	1,1371	6

Кореляційна розмірність D_2 дозволила встановити розмірність фазового простору атракторів, тобто визначити оптимальний порядок системи, кореляційна ентропія Колмогорова H_2 охарактеризувала середню швидкість втрати інформації про стан динамічної системи із плином часу, а показник

Херста H характеризував виникнення стохастичних та хаотичних режимів шляхом врахування персистентності (трендостійкості) часового ряду.

Для виявлення провісників кардинальних змінювань в поведінці об'єкта розроблені моделі прогнозування системних тенденцій у розвитку об'єкта за допомогою методу флікер-шумової спектроскопії, згідно з яким визначається динаміка змін функцій спектра потужності $S(f)$ і різницевого моменту $\Phi^{(2)}(\tau)$, динамічної змінної $V(t)$, що представлена у вигляді часового ряду, при послідовному зміщенні інтервалу T $[t_k, t_k + T]$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots i, t_k = k\Delta T$. Кардинальні змінювання в об'єкті пов'язані з найбільш різкими змінами залежностей $S(f)$ (9) і $\Phi^{(2)}(\tau)$ (10) при наближенні верхньої границі часового інтервалу усереднення t_k до моменту t_c катастрофічної події, коли в системі відбувається різке змінювання зони нестационарності (11,12) (рис.10).

$$S(f) = \int_{-T/2}^{T/2} \langle V(t)V(t+\tau) \rangle \exp(-2\pi i f \tau) d\tau, \quad (9)$$

$$\Phi^{(2)}(\tau) = \langle [V(t) - V(t+\tau)]^2 \rangle, \quad (10)$$

$$C(t_{k+1}) = 2 \cdot \frac{Q_{k+1} - Q_k}{Q_{k+1} + Q_k} \cdot \frac{\Delta T}{T}, \quad (11)$$

$$Q_k = \int_0^{\tau_{\max}} [\Phi^2(\tau)]_k d\tau, \text{ або } Q_k = \int_0^{f_{\max}} [S(f)]_k df \quad (12)$$

де t – поточний час; τ – часова затримка; f – частота.

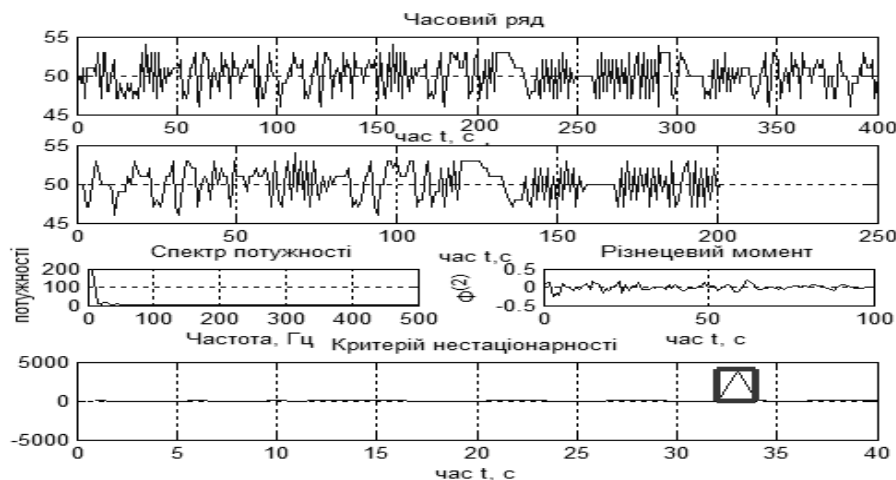


Рис. 10. Виявлення провісників системних змінювань в об'єкті

В умовах переміжності при наявності хаотичних режимів виникає необхідність прогнозування поведінки об'єкта на певному часовому проміжку шляхом реконструкції системи нелінійними диференціальними рівняннями, що мають деякий функціональний базис для апроксимації у вигляді предиктор-функції. Проведене імітаційне моделювання дозволило визначити в якості предиктор-функцій стандартний поліном, стандартний поліном із адитивним гармонійним впливом, дробово-раціональну функцію, які забезпечують достатню точність прогнозування (рис. 11).

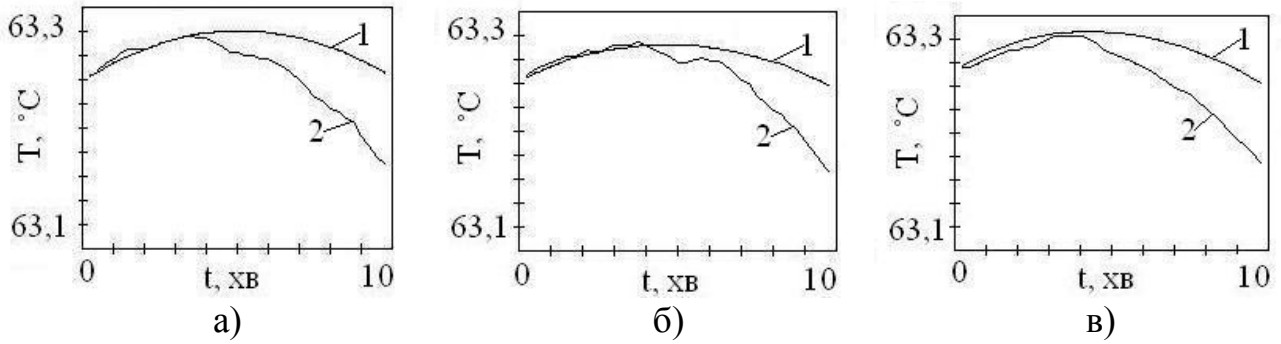


Рис. 11. Результати прогнозування температури затирання (1 – прогнозовані значення; 2 – експериментальні значення); а) стандартний поліном б) стандартний поліном із адитивним гармонійним впливом в) дробово-раціональна функція

В четвертому розділі розроблені та досліджені нелінійні моделі кінетики процесів приготування пивного затору, що забезпечують змінювання технологічних режимів в реальному часі; здійснений синтез синергетичних агрегованих нечітких регуляторів; розроблена функціональна структура інтелектуальної автоматизованої системи синергетичного керування технологічними процесами приготування пивного сусла; проведено імітаційне моделювання та виробничі випробовування запропонованих технічних рішень з впровадженням у виробництво.

Для організації ефективних стратегій синергетичного ресурсощадного керування розроблена нелінійна модель кінетики приготування пивного затору, за допомогою якої створюються можливості автоматичного визначення параметрів технологічного режиму як тривалість та температура пауз. Дана модель має такі компоненти: динамічну складову (13); логічну складову (14); моделі оцінки впливу режимних параметрів на активність ферментів на кожній температурній паузі (15)

$$\begin{aligned}
 \frac{dG_n}{dt} &= M_1 - \frac{M_2 E}{M_3 + E} \frac{H_1 G_n}{M_4 + G_n + M_5 G_2} \\
 \frac{dG_2}{dt} &= \frac{M_6 E}{M_3 + E} \frac{H_1 G_n}{M_4 + G_n + M_5 G_2} - \frac{M_7 E_1}{M_8 + E_1} \frac{H_2 G_2}{M_9 + G_2 + M_{10} G} \\
 \frac{dG}{dt} &= \frac{M_{11} E_1}{M_8 + E_1} \frac{H_2 G_2}{M_9 + G_2 + M_{10} G} - \frac{M_{12} X G}{1 + G + M_{13} X} \\
 \frac{dE}{dt} &= E_0 \frac{G_n}{M_{14} + G_n} X \frac{M_{15}}{M_{15} + G_2 + M_{16} G} - M_{17} E \\
 \frac{dE_1}{dt} &= E_{01} \frac{G_2}{M_{18} + G_2} X \frac{M_{19}}{M_{19} + G} - M_{20} E_1 \\
 \frac{dX}{dt} &= \frac{M_{21} X G}{H_3 (1 + G + M_{13} X)} - M_{22} H_4 X
 \end{aligned} \tag{13}$$

де M_1-M_{22} – параметри моделі, що враховують конструктивні особливості апарата; H_1-H_4 – параметри моделі, що визначаються сортністю пива.

$$\begin{aligned}
 \text{IF } G_2 \geq G_{\text{peg}} \text{ THEN } t=t_{p1} \text{ and } T=T_{p1} \text{ and } B=B_{p1}; \\
 \text{IF } G \geq G_{\text{peg}} \text{ THEN } t=t_{p2} \text{ and } T=T_{p2} \text{ and } B=B_{p2}; \\
 \text{IF } X \geq X_{\text{peg}} \text{ THEN } t=t_{p3} \text{ and } T=T_{p3} \text{ and } B=B_{p3}; \\
 \text{IF } G_n \leq G_{n_\text{peg}} \text{ THEN } t=t_{p4} \text{ and } T=T_{p4} \text{ and } B=B_{p4}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

де $G_{2_рег}$ – регламентоване значення концентрації декстринів; $G_{рег}$ – регламентоване значення концентрації мальтози; $X_{рег}$ – регламентоване значення концентрації глюкози; $G_{n_рег}$ – регламентоване значення концентрації крохмалю; t – тривалість температурної паузи, хв.; $t_{p1}-t_{p4}$ – тривалість температурної паузи на відповідній стадії процесу, хв.; T – температура затирання, °C; $T_{p1}-T_{p4}$ – температура паузи на відповідному етапі затирання, °C; B – гідромодуль; $B_{p1}-B_{p4}$ – величина гідромодуля на відповідному етапі затирання.

$$E_0(t, T, B) = -30.05 - 2.81 * T - 2.712 * t + 1.43 * B + 1.275 * T * B - 0.95 * T * t - 0.7937 * T^2 - 0.67 * t^2 - 0.01 * B^2$$

$$E_{01}(t, T, B) = -5.975 - 42.26 * T + 30.31 * t - 36.1 * B + 1.661 * T * t + 0.9832 * T * B + 2.338 * t * B + 2.212 * T^2 + 0.6833 * t^2 - 0.2142 * B^2$$
(15)

Динамічна складова моделі враховує особливості приготування певного сорту пива, що обумовлюється відповідними значеннями коефіцієнтів, які отримані із бази знань. Логічна складова встановлює тривалість температурних пауз шляхом визначення часу досягнення значень концентрацій крохмалю, декстринів, мальтози, глюкози згідно із технологічним регламентом для відповідного сорту пива (рис. 12).

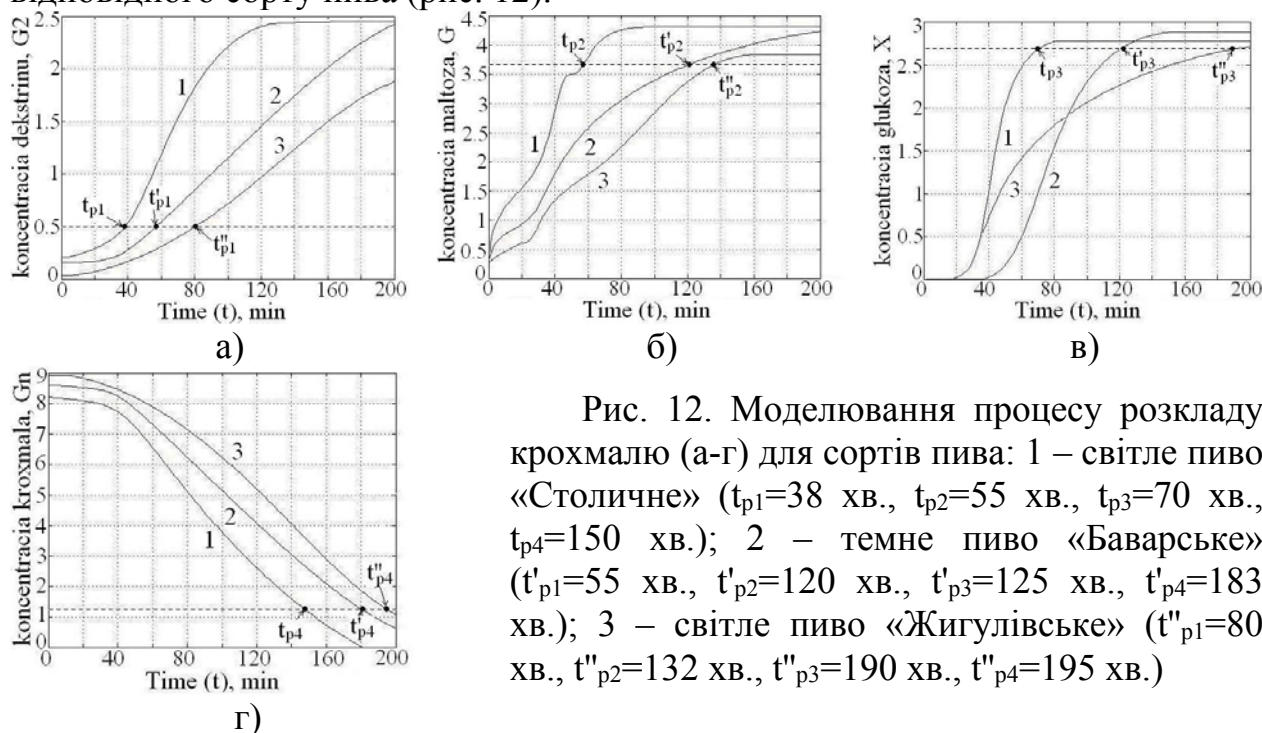


Рис. 12. Моделювання процесу розкладу крохмалю (а-г) для сортів пива: 1 – світле пиво «Столичне» ($t_{p1}=38$ хв., $t_{p2}=55$ хв., $t_{p3}=70$ хв., $t_{p4}=150$ хв.); 2 – темне пиво «Баварське» ($t'_{p1}=55$ хв., $t'_{p2}=120$ хв., $t'_{p3}=125$ хв., $t'_{p4}=183$ хв.); 3 – світле пиво «Жигулівське» ($t''_{p1}=80$ хв., $t''_{p2}=132$ хв., $t''_{p3}=190$ хв., $t''_{p4}=195$ хв.)

Ідентифікація моделі (15) проводилась методом найменших квадратів на основі експериментальних даних, отриманих у виробничих умовах ПАТ «Оболонь», шляхом вибору оптимальної структури та параметрів для певних сортів пива із використанням критеріїв: детермінізації, Акаїке, Хокінга та Фішера. Значущість коефіцієнтів рівнянь регресії оцінювалась за критерієм Стюдента. Оптимальні значення температурних пауз та гідромодуля визначались за моделлю (15) (рис. 13) шляхом розв'язання задачі оптимізації методом деформованого багатогранника Нелдера-Міда.

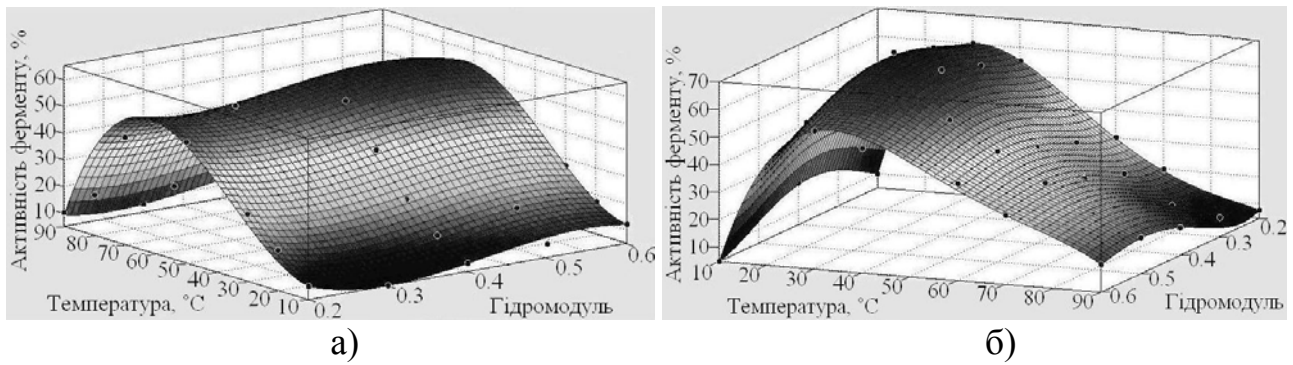
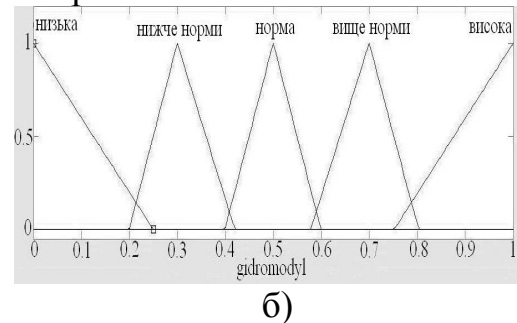
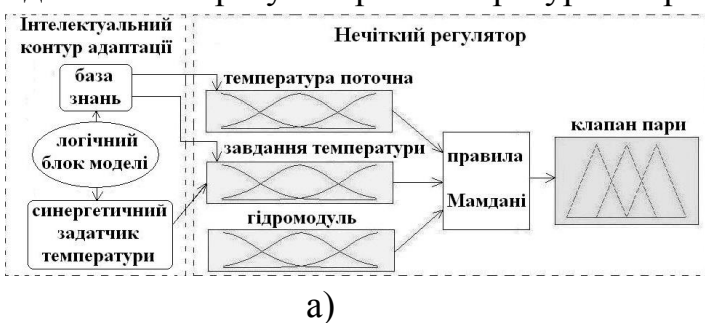


Рис. 13. Поверхні відгуку моделі: а) $E_0(t, B, T)$ б) $E_{01}(t, B, T)$

Здійснений синтез систем взаємозв'язаного керування заторним апаратом методом аналітичного конструювання агрегованих регуляторів (АКАР), який заснований на ідеології синергетичної теорії керування. Для синтезу законів синергетичного керування технологічними процесами приготування пивного суслу використані інваріантні багатообрази (атрактори), на яких найкращим чином узгоджуються природні властивості об'єкта і вимоги задач керування. Завданням синтезу законів керування є формування дій $u(G_n, G_2, G, E, E_1, X)$, що забезпечують необхідне значення концентрацій $G_{ns}=G_n$; $G_{2s}=G_2$; $G_s=G$; $E_s=E$; $E_{1s}=E_1$; $X_s=X$, на кожній температурній паузі $G_{ns}=G_{2s}=G_s=E_s=E_{1s}=X_s=0$. Відповідно до методу АКАР вводиться макрозмінна ψ і на основі моделі (13) отримуємо закон керування u , що дозволяє здійснити перехід системи у фазовому просторі із довільної позиції в околицю атракторів-багатообразів $\psi=0$. В якості керувальних дій вибрані концентрації ферментів α - і β -амілаз (E, E_1). Закони синергетичного керування u встановлювались на основі лінгвістичної апроксимації за Коско.

Реалізація прикладних функцій регулювання здійснювалась за допомогою нечітких регуляторів. Наприклад, нечіткий адаптивний регулятор температури є дворівневою системою з нечітким регулятором та інтелектуальним контуром адаптації на другому рівні (рис. 14). Контур адаптації на основі інформації про перехід між температурними режимами від блоку логічної складової моделі (14) викликає із бази знань функції належності відповідного температурного режиму та його завдання, що формується синергетичним задатчиком температури, в залежності від сорту пива, які надходять в блоки фазифікації відповідних змінних (поточного значення температури та його завдання). Нечіткий регулятор має незмінну базу правил і забезпечує формування регулювальної дії (витрата пари) згідно із правилами Мамдані та наступної дефазифікації. Результати імітаційного моделювання роботи нечіткого адаптивного регулятора температури зображені на рис. 15.



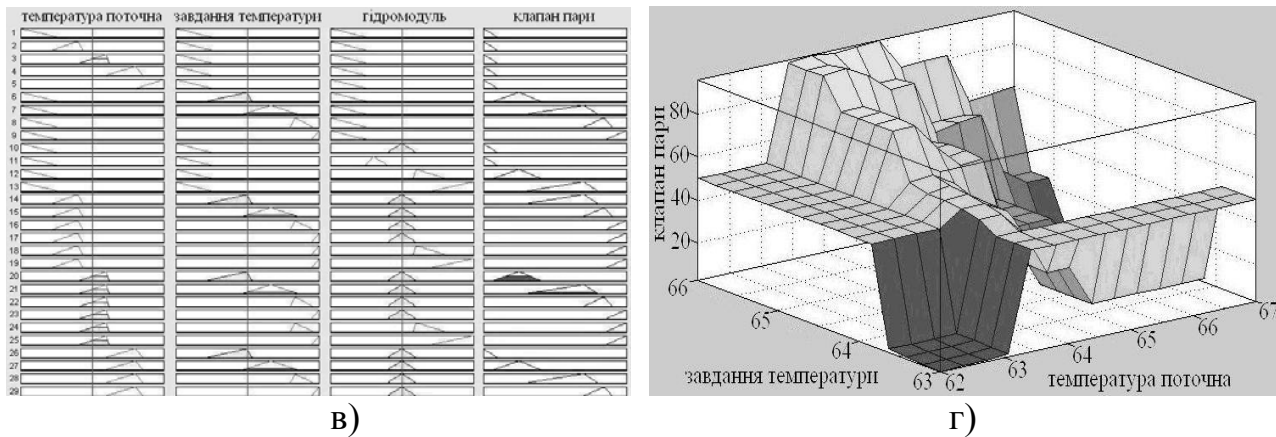


Рис. 14. Нечіткий адаптивний регулятор температури: а) структура регулятора; б) функція належності за гідромодулем; в) база нечітких правил регулятора; г) поверхня відгуку



Рис. 15. Перехідний процес зміни температури при роботі нечіткого адаптивного регулятора: а) гідромодуль – 0,2; б) гідромодуль – 0,3; в) гідромодуль – 0,5

Розроблена функціональна структура інтелектуальної системи синергетичного керування процесами приготування пивного суслу, захищена патентом UA 103580 (рис. 16). Інтелектуальне синергетичне регулювання процесу затирання солоду здійснюється наступним чином: на основі інформації від датчиків про температуру (TE), густину затору (DE) і ступеню оцукрювання затору (QE), а також від блоку аналізу якості сировини і сформованого завдання на виробництво, а також інформації, отриманої від бази знань, блоком ідентифікації математичних кінетичних моделей здійснюється оцінка параметрів математичної кінетичної моделі, яка і визначає технологічний режим конкретної варки затору. На основі імітаційного моделювання ідентифікованої математичної кінетичної моделі в блоці синергетичного синтезу завдань регуляторам здійснюється визначення інваріантних багатообразів (атракторів), в яких забезпечуються оптимальні режими на кожній стадії процесу затирання солоду. Технологічні режими на кожній стадії процесу затирання солоду реалізується нечіткими регуляторами (НР) гідромодуля, температури і тривалості виробничого циклу, які змінюють відповідно положення виконавчих механізмів подачі солоду, подачі води та пари, а також зливу суслу з апарата.

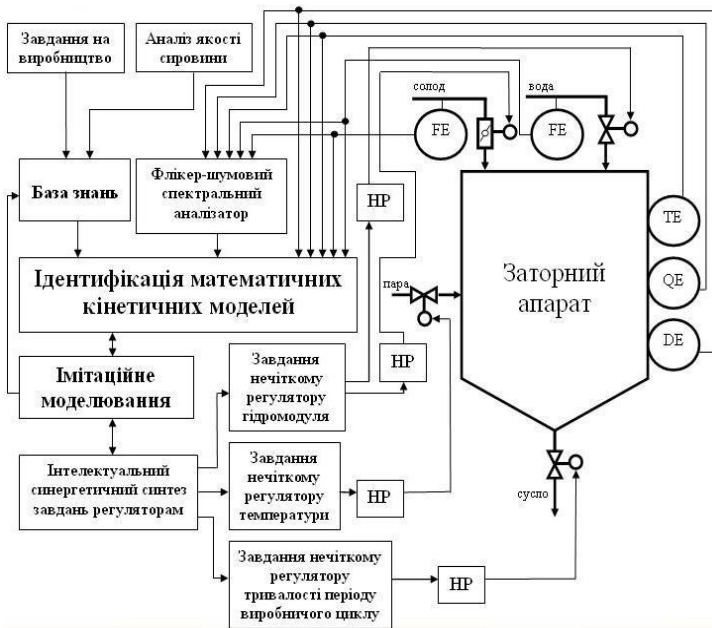


Рис. 16. Функціональна структура інтелектуальної системи синергетичного керування процесами приготування пивного сусла

Для дослідження ефективності функціонування розробленої системи керування технологічними процесами приготування пивного сусла побудовано імітаційну модель, яка складається з таких блоків: імітатор входних дій; модель мікропроцесорної системи локального керування окремими параметрами; модель інтелектуальної системи синергетичного керування; блок представлення та інтерпретації результатів. Формування входних дій здійснювалось за допомогою робастних планів експерименту Тагучі.

Результати імітаційного моделювання при різних значеннях сигнал-шум наведені в табл. 4.

Табл. 4. Результати імітаційного моделювання

Відношення сигнал-шум, ($Eta_{less-good}$) і ($Eta_{more-good}$)	Традиційна система керування			Синергетична система керування		
	Екстрактивність, %	Втрати, %	Продуктивність, м³/год	Екстрактивність, %	Втрати, %	Продуктивність, м³/год
$Eta_{less-good} = -10 * \log_{10} \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i^2$	-	0,4	-	-	0,31	-
$Eta_{more-good} = -10 * \log_{10} (\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2})$	78,2	-	5,4	79,1	-	5,7

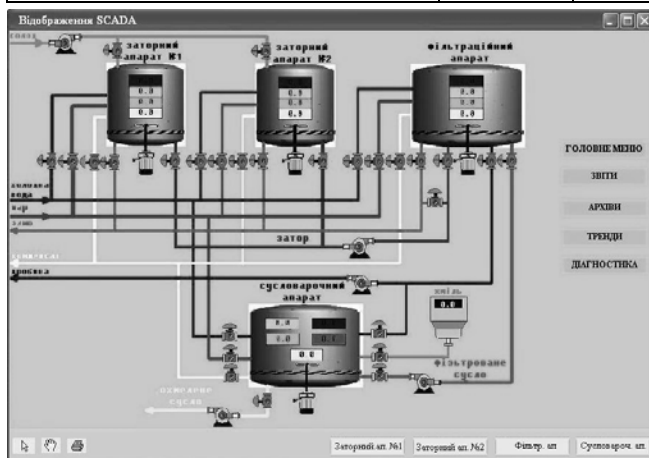


Рис. 17. Інтерфейс інтелектуальної системи синергетичного керування

Інтелектуальна система синергетичного керування (рис. 17) інтегрована в інформаційну вертикаль технологічного комплексу пивзаводу. Проведені дослідження та виробничі випробовування запропонованих технічних рішень показали покращення якості продукції, збільшення продуктивності виробництва на 4,4%, збільшення на 0,83% ступеню екстрактивності, зменшення на 0,07% втрат затору.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до удосконалення систем автоматизованого управління заторно-варильним відділенням пивзаводу, який полягає в організації ресурсоощадних стратегій керування на основі розроблених синергетичних моделей і алгоритмів

1. На основі проведеного системного аналізу технологічного комплексу заторно-варильного відділення пивзаводу виявлені чинники підвищення ефективності процесів приготування пивного сусла та сформульовані задачі оперативної реалізації ресурсоощадного керування, побудованих на засадах синергетики, детермінованого хаосу з використанням інтелектуальних технологій.

2. Одержали подальший розвиток математичні моделі процесів кінетики біохімічних перетворень за рахунок оцінки впливу зовнішніх стохастичних збурень, що передбачило виявлення проявів атрактивної поведінки об'єкта керування та встановлення діапазонів змінювання керувальних параметрів при утворенні дисипативних просторово-часових структур внаслідок самоорганізації процесів приготування пивного затору.

3. Удосконалено процедуру встановлення показників виявлення переміжності, хаотичності, що забезпечує підвищення ефективності синтезу стратегій синергетичного керування процесами приготування пивного сусла.

4. Удосконалені нелінійні моделі кінетики процесів приготування пивного затору, які дозволяють змінювати в реальному часі температурні режими та тривалості стадій приготування пивного затору для досягнення максимальної ефективності функціонування заторно-варильного відділення пивзаводу.

5. Вперше для технологічних об'єктів пивоварного виробництва здійснений синтез синергетичних агрегованих систем керування з використанням лінгвістичної апроксимації за Коско для організації малопотужних ресурсоощадних керувальних дій резонансного стимулюючого характеру, що гарантує досягнення визначених в залежності від виробничої ситуації цілей – атракторів як відображення бажаного у відповідності з фізико-хімічною природою об'єкта його цільового стану.

6. Вперше розроблена структура інтелектуальної автоматизованої системи синергетичного керування процесами приготування пивного сусла на основі динамічних баз знань та кінетичних нелінійних моделей.

7. Проведене імітаційне моделювання та виробничі випробовування запропонованих технічних рішень підтвердило покращення якості продукції, збільшення продуктивності виробництва на 4,4%, збільшення на 0,83% ступеню екстрактивності, зменшення на 0,07% витрат затору.

8. Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення передано до впровадження на ПАТ "Оболонь" та використовується у навчальному процесі на кафедрі автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій, що засвідчується відповідними довідками.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Кишенько, В.Д. Синергетичне управління технологічними процесами приготування пивного суслу [Текст] / В.Д.Кишенько, О.П. Лобок, М.В. Чернецький // Наукові праці НУХТ. – К.: НУХТ, 2012. – С. 81 – 86.
2. Кишенько, В.Д. Моделирование аттрактивного поведения технологических процессов приготовления пивного сусла [Текст] / В.Д. Кишенько, Н.В. Чернецкий // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж – 2013. – №6(84). – С. 570 – 575.
3. Чернецький, М.В. Дослідження властивостей атракторів складних систем на основі аналізу часових рядів варочного відділення [Текст] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 6/2 (72). – С. 38 – 42.
4. Кишенько, В.Д. Нелінійний рекурентний аналіз часових рядів процесу затирання солоду як складної системи з переміжністю [Текст] / В.Д. Кишенько, М.В. Чернецький // Харчова промисловість. – К.: НУХТ, 2015. – № 17. – С. 90 – 96.
5. Чернецький, М.В. Реконструкція предиктор-функцій на основі аналізу часових рядів процесу затирання пивного сусла [Текст] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько, А.П. Ладанюк // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 4/2 (76). – С. 57 – 62.
6. Чернецький, Н.В. Интеграция интеллектуальных технологий в систему управления технологическими процессами приготовления пивного сусла [Текст] / Н.В. Чернецкий, В.Д. Кишенько // Новый университет. Серия «Технические науки». – г. Йошкар-Ола. – 2015. – № 7–8 (41–42). – С. 4 – 9.
7. Пат. 103580, Україна : МПК(2015.01), C12C7/00, G05B13/04. Спосіб інтелектуального синергетичного регулювання процесу затирання солоду / Кишенько В. Д., Чернецький М. В.; заявник і власник Національний університет харчових технологій. – № u 201505454 ; заявл. 03.06.15; опубл. 25.12.15, Бюл. № 24. – 4 с.
8. Чернецький, М.В. Синергетичне керування технологічними процесами приготування пивного сусла [Текст] / М.В. Чернецький // Матеріали 78-ої міжнародної наукової конференції молодих вчених,аспірантів і студентів. – К.: НУХТ, 2012. – ч.2. – С. 282 – 283.
9. Чернецький, М.В. Бекстепінг і пасифікація в класі нелінійних систем із запізненням [Текст] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько // 20 Міжнародна конференція з автоматичного управління "АВТОМАТИКА / AUTOMATICS – 2013", 25 -27 вересня 2013 р.: тези доп. - Миколаїв: НУК, 2013. – С. 197 – 198.
10. Чернецький, М.В. Математична модель кінетики гідролізу затору в класі стохастичних нелінійних диференціальних рівнянь [Текст] / М.В. Чернецький // Матеріали 79-ої міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. – К.: НУХТ, 2013. – ч.2. – С. 548 – 549.
11. Чернецький, М.В. Прогнозування функціонування варочного відділення пивзаводу на основі теорії детермінованого хаосу [Текст] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько // Всеукраїнська науково-практична internet-конференція "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у

виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку", 17 -21 березня 2014 р.: тези доп. – Черкаси: ЧНУ, 2014. – С. 27 – 29.

12. Чернецький, М.В. Аналіз часових рядів варочного відділення пивзаводу з позиції нелінійної динаміки [Текст] / М.В. Чернецький // Матеріали 80-ої міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. – К.: НУХТ, 2014. – ч.2. – С. 409 – 410.

13. Чернецький, М.В. Оцінка динамічної системи варочного відділення пивзаводу методами флікер-шумової спектроскопії [Текст] / М.В. Чернецький // 21 Міжнародна конференція з автоматичного управління "АВТОМАТИКА / AUTOMATICS – 2014", 23 -27 вересня 2014 р.: тези доп. – К.: КПІ, 2014. – С. 302 – 303.

14. Чернецький, М.В. Дослідження особливостей часових рядів варочного відділення пивзаводу методами вейвлет-перетворення [Текст] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько // 3 Міжнародна науково-практична конференція "Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ-2014)", 27 -30 травня 2014 р.: тези доп. – Чернівці: ЧНУ, 2014. – С. 75 – 76.

15. Чернецький, М.В. Використання методу флікер-шумової спектроскопії для дослідження змінних технологічного процесу затирання [Текст] / М.В. Чернецький // XII міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)», 14 – 16 жовтня 2014 р.: тези доп. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – С. 175.

16. Чернецький, М.В. Дослідження динамічної системи варочного відділення пивзаводу на основі джокер-методу [Текст] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько // Міжнародна наукова конференція, присвячена 130-річчю Національного університету харчових технологій "Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти в харчовій промисловості", 13 -16 жовтня 2014 р.: тези доп. – К.: НУХТ, 2014. – С. 259.

17. Чернецький, М.В. Дослідження хаотичної поведінки технологічного об'єкта управління, аналіз, шляхи розв'язання проблем [Електронний ресурс] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько // Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами", 27 листопада 2014 р.: тези доп. – К.: НУХТ, 2014. – С. 108. – Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

18. Чернецький, М.В. Аналітичне конструювання агрегованих регуляторів варочного відділення пивзаводу [Текст] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько // Матеріали 81-ої міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. – К.: НУХТ, 2015. – ч.2. – С. 310.

19. Чернецький, М.В. Нечітке синергетичне регулювання технологічних параметрів варочного відділення пивзаводу [Текст] / М.В. Чернецький, В.Д. Кишенько // 3 Міжнародна науково-практична конференція "Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)", 12 -15 травня 2015 р.: тези доп. – Черкаси: ЧДТУ, 2015. – С. 271.

20. Чернецький, М.В. Отримання і обробка інформації в підсистемі

технологічного моніторингу процесу варки сусла [Текст] / М.В. Чернецький // 22 Міжнародна конференція з автоматичного управління "АВТОМАТИКА / AUTOMATICS – 2015", 10 -11 вересня 2015 р.: тези доп. – Одеса: ОНПУ, 2015. – С. 102 – 103.

АНОТАЦІЯ

Чернецький М.В. Інтелектуальне керування технологічними процесами приготування пивного сусла на основі принципів та методів нелінійної динаміки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2016.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності пивоварного виробництва шляхом створення інтелектуальної системи керування технологічними процесами приготування пивного сусла заторно-варильного відділення пивзаводу. На основі сучасних методів аналізу складних динамічних систем методами нелінійної динаміки та детермінованого хаосу розроблені нелінійні математичні моделі, що дозволяють встановити ефекти самоорганізації процесів приготування пивного сусла через утворення дисипативних просторово-часових структур та забезпечити оптимальні міжатрактивні переходи при керуванні об'єктом. На основі методу аналітичного конструювання агрегованих регуляторів проведений синтез системи синергетичного керування процесами приготування пивного сусла, яка дозволяє сформулювати малопотужні ресурсоощадні керувальні дії резонансного стимулюючого характеру, що забезпечує досягнення визначених в залежності від виробничої ситуації цілей – атракторів як відображення бажаного у відповідності з фізико-хімічною природою об'єкта його цільового стану. Розроблено функціональну структуру, алгоритмічне та програмне забезпечення інтелектуальної системи керування технологічним комплексом заторно-варильного відділення пивзаводу.

Ключові слова: пивоварне виробництво, заторно-варильне відділення, приготування пивного сусла, нелінійна динаміка, детермінований хаос, синергетичний регулятор, математична модель, інтелектуальна система керування.

АННОТАЦИЯ

Чернецкий Н.В. Интеллектуальное управление технологическими процессами приготовления пивного сусла на основе принципов и методов нелинейной динамики. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация процессов управления. - Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2016.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности пивоваренного производства путем создания интеллектуальной системы управления технологическими процессами приготовления пивного сусла

заторно-варочного отделения пивзавода.

Проведенный системный анализ объекта управления показал, что технологические процессы приготовления пивного суслу имеют все характерные признаки сложных систем: наличие сложного переплетения технологических процессов, имеющих разную физико-химическую природу явлений, многофакторность, нестационарность, значительная неопределенность. Определены проблемы автоматизации заторно-варочного отделения пивзавода. Намечены основные направления повышения эффективности управления технологическими процессами приготовления пивного суслу, которые заключаются в реализации современных методов нелинейной динамики с помощью перспективных информационных технологий.

Усовершенствована модель кинетики гидролиза крахмала и ее анализ с позиций неравновесной термодинамики и синергетики, что позволило определить параметры порядка и провести оценку влияния ферментов-амилаз как управляющих на характер аттрактивного поведения объекта. Решение стохастических дифференциальных уравнений Ито определило влияние внешних возмущений на показатели качества функционирования объекта. Установлены значительные структурные изменения в поведении объекта, обусловленные эндогенными параметрами, в сравнении с влиянием экзогенных факторов.

Анализ временных рядов основных технологических переменных заторно-варочного отделения пивзавода с помощью графического теста Гилмора установил перемежаемость поведения объекта на основании теории русел и джокеров. Перемежаемость в поведении объекта подтверждена также с помощью рекуррентного и вейвлет-анализа.

Проведена реконструкция хаотических аттракторов методом временной задержки и определены основные показатели хаотичности как корреляционной размерности, энтропии Колмогорова, показателя Херста и фрактальной размерности, что подтвердило гипотезу о наличии явлений детерминированного хаоса. С применением метода восстановления обыкновенных дифференциальных уравнений получены модельные уравнения прогнозирования, определены предиктор-функции, которые обеспечивают необходимую точность прогнозирования. Разработан алгоритм определения предвестника кардинальных изменений системы. Данный алгоритм базируется на методологии фликкер-шумовой спектроскопии, анализе спектра мощности и разностных моментов.

На основе современных методов анализа сложных динамических систем методами нелинейной динамики и детерминированного хаоса разработаны нелинейные математические модели, позволяющие установить эффекты самоорганизации процессов приготовления пивного суслу из-за образования диссипативных пространственно-временных структур и обеспечить оптимальные межаттрактивные переходы при управлении объектом. На основе метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов проведен синтез системы синергетического управления процессами приготовления

пивного сусла, которая позволяет сформировать маломощные ресурсосберегающие управляющие действия резонансного стимулирующего характера, обеспечивает достижение определенных в зависимости от производственной ситуации целей - аттракторов как отражение желаемого в соответствии с физико-химической природой объекта его целевого состояния. Разработана функциональная структура, алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной системы управления технологическим комплексом заторно-варочного отделения пивзавода.

Ключевые слова: пивоваренное производство, заторно-варочное отделение, приготовление пивного сусла, нелинейная динамика, детерминированный хаос, синергетический регулятор, математическая модель, интеллектуальная система управления.

THE SUMMARY

N. Chernetski. Intelligent process control beer wort preparation based on the principles and methods of nonlinear dynamics. - Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.07 - automation of control processes. – National University of Food Technologies, Kyiv, 2016.

Dissertation is devoted to improving the efficiency of the brewing industry by creating intellectual process control systems preparation of beer wort mash-brew brewery branch. Based on modern methods of analysis of complex dynamical systems methods of nonlinear dynamics and nonlinear deterministic chaos developed mathematical models that allow us to establish the effects of self-organization process of making beer wort through the creation of space-time dissipative structures and provide optimum between attractor transitions in driving object. On the basis of analytical design of aggregated regulators conducted a synthesis systems synergetics process management preparation of beer wort, which allows you to create low-power resource saving control actions resonance stimulating nature that achieves defined according to the production situation needs - attractors as displaying desired in accordance with the physical and chemical nature object its intended state. The functional structure, algorithmic and software intelligent control system of technological complex mash-brew brewery branch.

Keywords: brewing industry, mash-brew brewery, preparation of beer wort, nonlinear dynamics, deterministic chaos, synergetics regulator, mathematical model, intelligent control system.

Підп. до друку 13.04.2016. Наклад 85 пр. Зам. № 11-16

НУХТ. 01601 Київ-33, вул. Володимирська, 68
Свідectво про реєстрацію серія ДК № 1786 від 18.05.04 р.