

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

**Герасименко Тетяна Михайлівна**

УДК 681.5

**АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ СОЛОДОСУШАРКОЮ В  
КЛАСІ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.13.07

Автоматизація процесів керування

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ 2015

## Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Ладанюк Анатолій Петрович**  
Національний університет харчових технологій,  
м. Київ,  
завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних  
систем керування,  
заслужений діяч науки і техніки України

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Фурман Ілля Олександрович,**  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства ім. Петра Василенка,  
м. Харків,  
зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-  
інтегрованих технологій

доктор технічних наук, професор  
**Стасюк Олександр Іонович,**  
Державний економіко-технологічний університет  
транспорту, м. Київ,  
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-  
інтегрованих технологій транспорту,  
лауреат Державної премії України в галузі науки і  
техніки.

Захист відбудеться “16” грудня 2015 року о 15-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01033, м.Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. А–311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01033, м.Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий “12” листопада 2015 року.

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



О. М. М'якшило

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Технологічні об'єкти харчової промисловості, зокрема солодосушарки, працюють у змінних режимах, що впливає на якість процесу управління. Солодосушальна установка як об'єкт управління характеризується нестационарною поведінкою та внутрішніми взаємозв'язками між змінними, що обумовлено складними масо– та теплообмінними, фізико–хімічними перетвореннями і призводить до зниження якості готового продукту та збільшення витрат енергоносіїв.

В зв'язку з цим необхідно провести комплекс наукових досліджень, пошук нових алгоритмів та структур управління в системах автоматизації та діагностування солодосушальних установок, які можна віднести до одного класу нестационарних об'єктів.

Забезпечення технологічного режиму для отримання солоду необхідної якості з можливістю зменшення витрати енергоносіїв є актуальною задачею. Тому, одним з ефективних способів розв'язання задачі є удосконалення системи автоматичного управління за рахунок використання системи інтелектуального управління складними нестационарними об'єктами з використанням адаптивного управління на основі нечіткого підходу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана згідно плану науково-дослідних робіт кафедр автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації процесів управління Національного університету харчових технологій «Розроблення ефективних структур управління біотехнологічними комплексами в класі організаційно-технологічних систем» (номер державної реєстрації 0109U008311) 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 функціонування солодосушальної установки в класі нестационарних систем шляхом створення автоматизованої системи керування на основі математичної моделі та інтелектуальних методів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести системно-технічний аналіз солодосушарки, визначити її основні особливості;
- проаналізувати сучасні регулятори для нестационарних об'єктів та виконати їх класифікацію;
- розробити математичну модель для опису статички та динаміки солодосушарки, які відносяться до одного класу нестационарних об'єктів;
- проаналізувати виробничі ситуації, алгоритми керування та визначити методи управління солодосушаркою в класі нестационарних об'єктів;

- розробити нові структури САР для підвищення ефективності функціонування солодосушарки;
- виконати дослідження обраних систем автоматизації та провести їх комп'ютерне моделювання.

**Об'єктом дослідження** є процес автоматичного керування основними змінними шахтної вертикальної солодосушильної установки, який потребує використання сучасних систем автоматизації для забезпечення необхідного рівня показників якості готової продукції та зменшення енергоспоживання.

**Предметом дослідження** є математичні моделі, алгоритми керування та системи автоматичного регулювання складними технологічними об'єктами, зокрема алгоритми адаптивного керування, інтелектуальні методи, регулятори, які б забезпечили стабільно високу якість вихідного продукту та надійність функціонування з урахуванням енергоощадності.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених задач використовувались методи теорії системного та статистичного аналізу (для встановлення закономірностей та залежностей між необхідними змінними), теорія математичного моделювання (для створення математичної моделі, яка дала можливість змоделювати роботу системи автоматичного регулювання (САР), для встановлення ефективності її роботи), теорія нечітких множин та штучних нейромереж (для синтезу нових структур автоматичних регуляторів), а також методи імітаційного моделювання (для підтвердження ефективності отриманих результатів). Результати експериментів оброблювали методами математичної статистики в середовищі спеціального пакету з статистичного аналізу та обробки даних STATISTICA.

**Наукова новизна.** При вирішенні поставлених задач одержані нові наукові результати:

- вперше виконано системний аналіз солодосушарки та ідентифікація процесу її функціонування в класі нестационарних систем, що дало можливість обґрунтувати необхідність використання нейро-нечіткої мережі для оцінки показників та розробки системи автоматизації;
- удосконалено метод отримання математичної моделі шахтної солодосушарки шляхом розбиття за зонами, яка описує статичні та динамічні властивості, та в якій враховано інтервали зміни параметрів, що характеризують різні режими роботи об'єкта;
- розроблено метод опису статички та динаміки нестационарних об'єктів на основі інтервального оцінювання параметрів об'єкта, зокрема на основі використання функцій чутливості, що дало можливість виконати аналіз якості регулювання з різними регуляторами;
- знайшли подальший розвиток підходи до оцінки нестационарності об'єкта, зокрема способи управління та ідентифікації процесу функціонування нестационарних об'єктів на основі нейро-мережевої структури (нечітких множин);
- розроблено структури системи управління для дослідження та аналізу

якості перехідних процесів керування солодосушаркою з використанням системи адаптивного управління на основі нечіткого управління (Патент на корисну модель №89465).

**Практичне значення та реалізація одержаних результатів.** Одержані результати можуть бути використані в процесі проектування, розробки та впровадження нових та модернізації існуючих систем автоматизації солодосушарок.

Результати роботи пройшли дослідну перевірку на кафедрі автоматизації процесів управління Національного університету харчових технологій, використовуються у навчальному процесі підготовки фахівців з автоматизації виробництва та передані для подальшого впровадження на підприємстві.

**Особистий внесок у розробку наукових результатів.** У наведених публікаціях здобувачем виконано наступне: в [1] проведено дослідження адаптивного та ПД - регулятора з властивостями робастності для технологічних об'єктів харчової промисловості; в [2] наведено результати ситуаційного управління складним технологічним об'єктом – солодосушаркою шахтного типу з використанням апарату нечітких множин; в [3] наведено розроблену математичну модель, яка враховує основні закономірності сушіння зерна у вертикальній солодосушарці; в [4] розкрито питання підвищення енергозбереження та якості процесу сушіння солоду як нестационарного об'єкта; в [5] розглядається використання нечітких когнітивних карт при управлінні складними системами.

**Апробація роботи.** Основні результати досліджень доповідались і обговорювались на наукових конференціях Національного університету харчових технологій у 2011–2015 рр.; міжнародних конференціях з автоматичного управління, зокрема "Автоматика-2012" (Київ), "Автоматика-2013" (Миколаїв).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 14 друкованих праць, в яких викладено основний зміст виконаних досліджень, з них 5 статей в фахових виданнях, дві з яких в закордонних виданнях та 8 тез доповідей на наукових конференціях і 1 патент.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформувано мету та задачі досліджень, об'єкт, предмет, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Вказано на апробацію результатів дисертації та кількість публікацій.

У *першому розділі* проведено аналіз технологічних об'єктів, в яких відбуваються масо- та теплообмінні процеси, зміна режимів роботи, що дає можливість виділити окремий клас нестационарних об'єктів, в якому сушарки різного призначення займають особливе місце. В класі нестационарних об'єктів досліджуються властивості солодосушарки

шахтного типу, показники її функціонування та підходи до створення системи автоматизації. Проведено аналіз технологічного процесу сушіння солоду з позиції управління. Виявлені такі характерні особливості як нестаціонарність динамічних характеристик, нелінійність, невизначеність. Динамічні характеристики процесу сушіння носять нестаціонарний характер, зумовлений рядом фізико-хімічних перетворень у кожній з фаз (продукти життєдіяльності, продукти гідролізу, ферментативна активність та ін.), які визначають якість та сорт солоду, що залежить від режиму сушіння. Нестационарність параметрів часто призводить до втрати якості при управлінні подібними технологічними процесами.

Проведено аналіз науково-технічних розробок з автоматизації сушильних установок, де розглянуті підходи до розробки систем управління процесом сушіння різних матеріалів. Розробка математичних моделей базується на класичних роботах Ликова А.В., а для солодосушарок не існує загальних підходів до розв'язання задач аналізу та синтезу систем автоматизації. Основні вимоги, які ставляться при автоматизації процесу сушіння: можливість автоматичної підтримки температури агента сушіння (шляхом зміни витрати сушильного агента) на необхідному рівні регулювання, зміна тривалості сушіння в залежності від вихідної вологості; автоматизоване управління транспортними механізмами та клапанами, автоматичне регулювання кількістю повітря (потужність вентиляторів). Виконано класифікацію та представлено характеристику регуляторів, які можна використовувати в системах автоматизації сушарок.

Обґрунтовано перспективи автоматизації нестаціонарних об'єктів на основі використання інтелектуальних методів. На цій базі доведено необхідність синтезу системи адаптивного управління на основі нечіткого підходу з урахуванням технологічних вимог при зміні динамічних характеристик об'єкта управління.

На основі проведеного аналізу визначені науково-технічні основи роботи та основні напрямки досліджень.

У *другому розділі* визначено, що процес сушіння можна розглядати як зв'язний нестаціонарний об'єкт управління, так як динамічні характеристики процесу мають нестаціонарний характер, керувальні дії створюють перехресний вплив на технологічні змінні. Загальний процес сушіння в сушильній камері розглядається як сукупність процесів, що одночасно протікають в її локальних зонах. Враховуючи особливості її конструктивного виконання, вона представлена у вигляді сукупності  $n = L/h$  ( $L$  – висота сушарки,  $h$  – довжина зони) послідовно з'єднаних зон ( $n=4$ ), кожна з яких можна розглядати як об'єкт із зосередженими параметрами. На рис.1 представлена схема шахтної солодосушильної установки з зазначенням основних технологічних змінних, які впливають на її роботу та описують динаміку зміни параметрів солоду та сушильного агента при їх русі в солодосушарці.

Виділені нештатні ситуації, які можуть виникнути при роботі солодосушильної установки.

Аналіз різних форм опису математичних моделей для оцінки

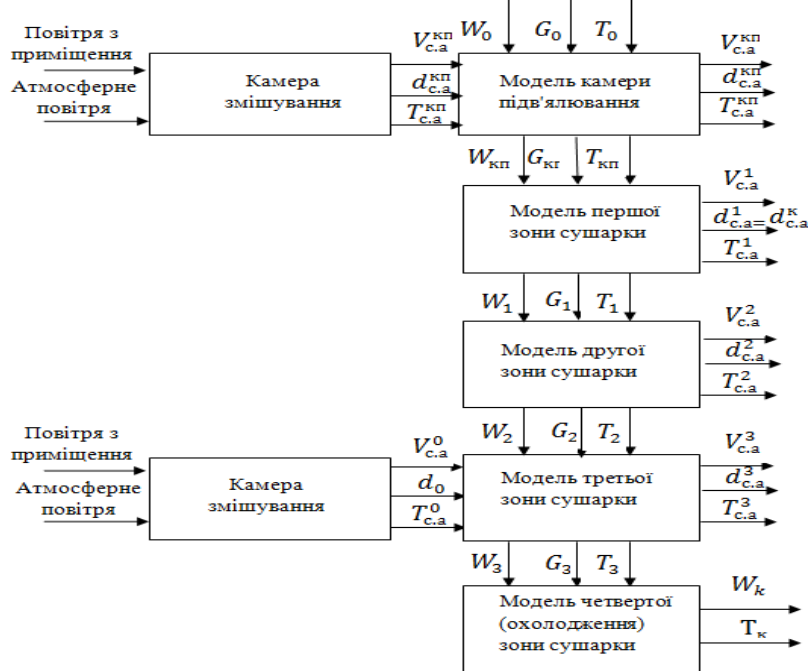


Рис.1. Параметрична схема змінних процесу сушіння солоду шахтної солодосушарки :

$V$  – об'ємна витрата сушильного агента;  $G$  – масова витрата солоду;  $W$  – вологість солоду;  $T$  – температура солоду;  $d$  – вологовміст сушильного агента; індекси "0,1,2,3,к" – відповідно початкові значення параметрів, значення параметрів в першій, другій та третій зонах сушарки, кінцеве значення; "с.а, з" – відповідно сушильний агент, зерновий матеріал, "к.п" – камера підв'ялювання.

нестаціонарності шахтних вертикальних солодосушильних установок в системах автоматичного управління (диференціальні рівняння зі змінними коефіцієнтами в нормальній формі Коші, імпульсні перехідні функції та ін.), показав, що імпульсні характеристики незручні для розв'язання задач аналізу та синтезу системи автоматизації. Отримані імпульсні характеристики для процесу сушіння солоду в вертикальній шахтній солодосушарці, зокрема для відображення вологості та температури в установці, апроксимовані передатними функціями. Нестаціонарність солоду оцінюється математичними моделями у вигляді диференціальних рівнянь, коефіцієнти яких відповідають виділеним інтервалам квазістаціонарності.

Проведено системний аналіз методів оцінки нестаціонарності солодосушарки. Для оцінки нестаціонарності технологічних об'єктів, запропоновано використання методів теорії чутливості. Аналіз чутливості пов'язаний з вивченням впливу зміни параметрів об'єкта на поведінку динамічної системи керування в цілому.

Проведено аналіз математичних моделей різного призначення, які описують процес сушіння різних матеріалів, на основі якого було удосконалено математичну модель шахтної вертикальної солодосушильної

установки з урахуванням її конструктивних особливостей та множини станів функціонування.

При розробці математичної моделі врахувати всі нестационарності в об'єкті неможливо, тому що це приведе до громіздких та складних математичних виразів, які важко буде використати для задач аналізу та синтезу. Передбачається що солодосушильна установка має камеру підв'ялювання та сушильну камеру, яка складається з чотирьох зон. Математична модель шахтної вертикальної солодосушильної установки, яка описує поведінку головних змінних – вологості та температури солоду, розроблено з урахуванням таких основних класифікаційних ознак та припущень:

- для сушіння матеріалу використовується конвективний спосіб підводу тепла;
- рух матеріалу та сушильного агента направлений та протилежний;
- не враховується теплообмін в навколишнє середовище;
- режим роботи: як статичний так і динамічний;
- кількість зон в сушарці : 4.
- кожному з зон сушарки за каналами керування температури та вологості солоду вважаємо об'єктами із зосередженими параметрами, так як розподіленість параметрів солоду та агента враховується тільки по довжині сушарки (вздовж руху матеріалу);
- в кожній зоні температуру, вологість, теплоємність приймаємо однаковою;
- приймаємо, що коефіцієнти теплообміну та швидкість сушіння однакові в відповідному діапазоні зміни параметрів матеріалу та сушильного агента;
- коефіцієнти теплообміну розраховуємо на основі інформації з літературних джерел та отриманих статистичних даних.

Математична модель солодосушильної установки після перетворень та лінеаризації приведена до такого вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 T_1 \frac{d\Delta W_{\text{кп}}(t)}{dt} + \Delta W_{\text{кп}}(t) = K_1 \Delta W_{\text{вх}}(t) + K_2 \Delta G_{\text{кп}}^M(t) - K_3 \Delta g_{\text{кп}}^M(t) + K_4 \Delta G_{\text{кп}}^H(t); \\
 T_2 \frac{d\Delta W_1(t)}{dt} + \Delta W_1(t) = K_5 \Delta W_{\text{кп}}(t) + K_6 \Delta G_1^M(t) - K_7 g_1^M(t) + K_8 \Delta G_1^H(t) + K_9 \Delta d_1(t); \\
 T_3 \frac{d\Delta W_2(t)}{dt} + \Delta W_2(t) = K_{10} \Delta W_1(t) + K_{11} \Delta G_2^M(t) - K_{12} \Delta g_2^M(t) + K_{13} \Delta G_2^H(t) + K_{14} \Delta d_2(t); \\
 T_4 \frac{d\Delta W_3(t)}{dt} + \Delta W_3(t) = K_{15} \Delta W_2(t) + K_{16} \Delta G_3^M(t) - K_{17} \Delta g_3^M(t) + K_{18} \Delta G_3^H(t) + K_{19} \Delta d_3(t); \\
 T_5 \frac{d\Delta W_4(t)}{dt} + \Delta W_4(t) = K_{20} \Delta W_3(t) + K_{21} \Delta G_4^M(t) - K_{22} \Delta g_4^M(t) + K_{23} \Delta G_4^H(t) + K_{24} \Delta d_4(t); \\
 T_6 \frac{d\Delta t_{\text{кп}}^M(t)}{dt} + \Delta t_{\text{кп}}^M(t) = K_{25} \Delta t_{\text{вх.кп}}^M(t) - K_{26} \Delta W_{\text{вх.кп}}(t) + K_{27} \Delta g_{\text{кп}}^M(t) + K_{28} \Delta W_{\text{кп}}(t) \\
 \quad - K_{29} \Delta G_{\text{кп}}^M(t) + K_{30} \Delta G_{\text{кп}}^H(t) + K_{31} \Delta t_{\text{кп}}^H(t); \\
 T_7 \frac{d\Delta t_1^M(t)}{dt} + \Delta t_1^M(t) = K_{32} \Delta t_{\text{кп}}^M(t) - K_{33} \Delta W_{\text{кп}}(t) + K_{34} \Delta g_1^M(t) + K_{35} \Delta W_1(t) - K_{36} \Delta G_1^M(t) \\
 \quad + K_{37} \Delta G_1^H(t) + K_{38} \Delta t_1^H(t) + K_{39} \Delta d_1(t);
 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_8 \frac{d\Delta t_2^M(t)}{dt} + \Delta t_2^M(t) = K_{40}\Delta t_1^M(t) - K_{41}\Delta W_{\text{кп}}(t) + K_{42}\Delta g_2^M(t) + K_{43}\Delta W_2(t) - K_{44}\Delta G_2^M(t) + \\ K_{45}\Delta G_2^H(t) + K_{46}\Delta t_2^H(t) + K_{47}\Delta d_2(t); \\ T_9 \frac{d\Delta t_3^M(t)}{dt} + \Delta t_3^M(t) = K_{48}\Delta t_2^M(t) - K_{49}\Delta W_2(t) + K_{50}\Delta g_3^M(t) - K_{51}\Delta W_3(t) - K_{52}\Delta G_3^M(t) \\ + K_{53}\Delta G_3^H(t) + K_{54}\Delta t_3^H(t) + K_{55}\Delta d_3(t); \end{array} \right.$$

де  $K_1-K_{55}$  – коефіцієнти передачі за каналами управління та збурення,  $T_1-T_9$  – постійні часу об'єкта,  $t_{\text{вх.кп}}^M$  – температура пророщеного солода, який подається на вхід установки,  $t_i^M$  – температура солода,  $t_i^H$  – температура повітря у відповідних зонах апарату,  $g_i^M$  – маса солода у відповідних зонах апарату,  $G_i^M, G_i^H$  – витрата солода та сушильного агента(повітря) відповідно,  $d_i$  – вологовміст сушильного агента,  $W_i$  – вологість солода, індекси "кп, 1,2,3,4" – камера підв'ялювання, значення параметру відповідно в першій, другій, третій та четвертій зоні.

Розроблено і реалізовано в пакеті Simulink системи MATLAB імітаційну модель солодосушальної установки за головними параметрами – температурою та вологістю, що базується на отриманих аналітичним шляхом диференціальних рівняннях тепло-масообмінних процесів, теплового і матеріального балансів. Модель відтворює процес функціонування солодосушарки в часі і складається з об'єднаних у єдину структуру моделей тепло-масообмінних процесів, що відбуваються в зонах сушарки та в камері підв'ялювання. Як видно зі системи, зміна будь-якої температури в зоні сушильної установки приводить до зміни температури в інших зонах, а зміна вологості матеріалу впливає на вологість матеріалу та температуру в наступних зонах. Зміна всіх інших змінних моделі приводить до зміни відповідної температури та вологості, що в свою чергу збурює інші температури та вологості.

Аналіз математичної моделі показав зв'язність регульованих змінних.

**У третьому розділі** проведено статистичний аналіз технологічних змінних на основі експериментальних даних, досліджено вплив режимних параметрів солодосушальної установки на економічний критерій, оцінка функцій чутливості. Проведено аналіз методів ідентифікації з точки зору їх застосування при нестационарній поведінці об'єкта.

На основі дескриптивного аналізу проведено визначення числових характеристик для всієї вибірки кожної змінної, які дозволяють в автоматичному режимі виявити статичні та динамічні властивості процесу, отримати додаткову інформацію про зміну стану функціональних груп параметрів технологічного процесу. Така інформація дає можливість підвищити якість управління і отримати необхідні відомості для формування оптимізуючих керувальних дій.

Проведено кореляційний аналіз та розраховано квадратну кореляційну матрицю для температур солоду по зонам солодосушальної установки. При рівні значущості 0.05 коефіцієнт кореляції Пірсона вказує на те, що кореляція є лінійно позитивною, тобто збільшення однієї змінної пов'язане зі збільшенням іншої, при цьому коефіцієнт кореляції додатний. Температура в третій зоні є найбільш впливовою на температуру в першій

зоні та менш впливовою на температуру в другій зоні, та немає лінійного зв'язку з камерою підв'ялювання.

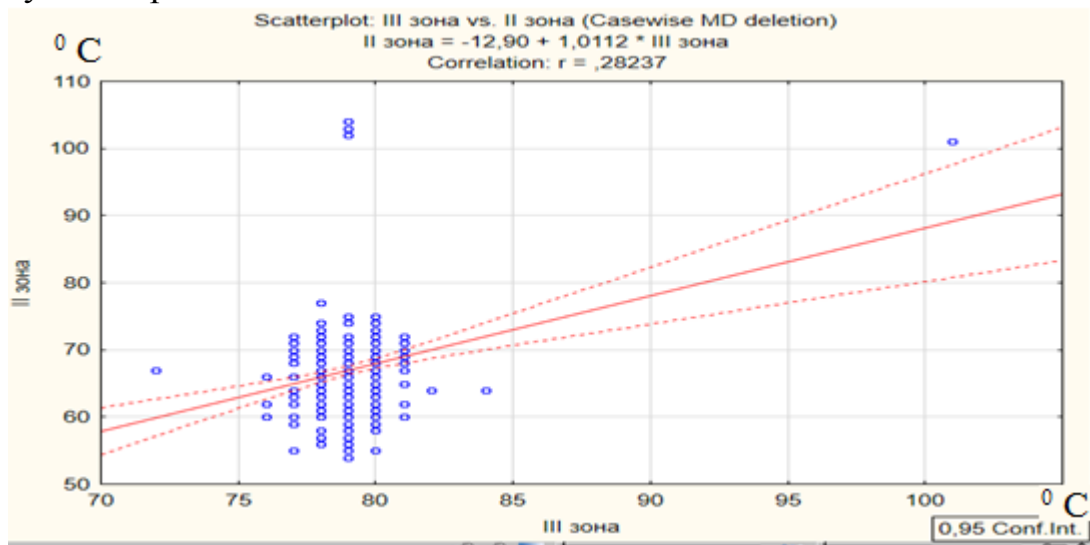


Рис. 2. Кореляційна залежність температури у другій та третій зонах

Графічний аналіз (Рис.2) виконується відносно прямої регресії, кут нахилу якої разом з точками – спостереженнями, вказує на позитивну кореляцію. Розміщення кожного спостереження на графіку розраховується за відповідним рівнянням, яке складається з суми вільного члену, коефіцієнту кута нахилу лінії регресії та зі значення незалежного параметру (вісь  $x$ , відповідно на осі  $y$  залежний параметр).

Для проведення оцінки статистичної керованості процесу, необхідності введення корегувальних впливів, доцільно використовувати контрольні карти Шухарта для середніх значень і стандартних відхилень. При аналізі якісних показників технологічного процесу, на одному листі будується контрольна карта Шухарта для середніх значень  $\bar{X}$ , призначена для керування за кількісною ознакою і дозволяє визначити вихід з ладу технологічного обладнання та карта стандартних відхилень  $R$ , яка вказує на погіршення управління.

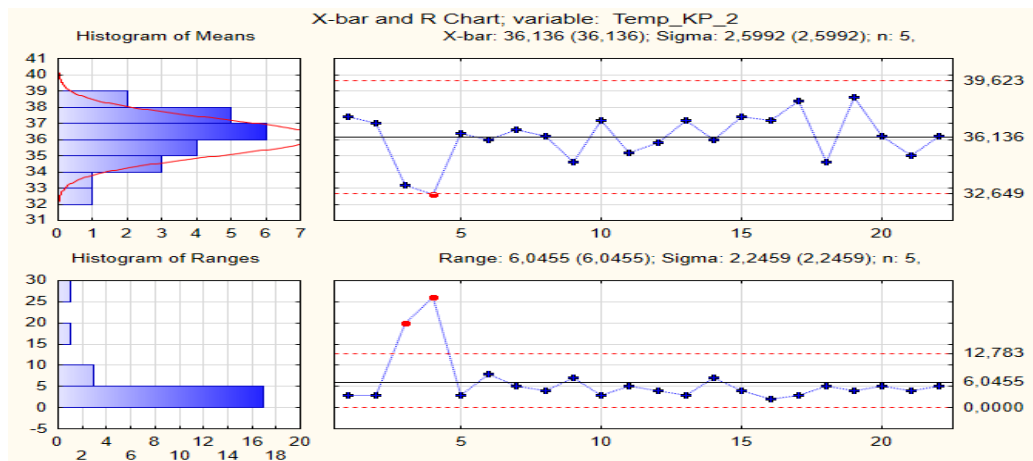


Рис.3. Контрольні карти Шухарта для температури в камері підв'ялювання солодосушильної установки

Наприклад, після побудови та аналізу контрольних карт Шухарта для температури на виході з камери підв'ялювання на X-карті та R-карті (рис.3), на R-карті з'являються викиди раніше ніж на X-карті при нормальному розподілі на X-карті, що є сигналом про необхідність введення коригувальних дій.

Після аналізу температури в камері підв'ялювання солодосушильної установки, проаналізовано температуру на виході з її останніх зон (Рис.4), на R-карті та X-карті з'являються викиди за контрольні межі, що є сигналом появи відхилень, і як наслідок, необхідність введення коригувальних впливів. МА-карти свідчать, що з часом відбудеться зсув ковзних середніх значень, що призведе до значного погіршення якості технологічного процесу. Отже, припущення про розлагодження технологічного процесу в камерах сушарки без оперативного втручання підтверджується.

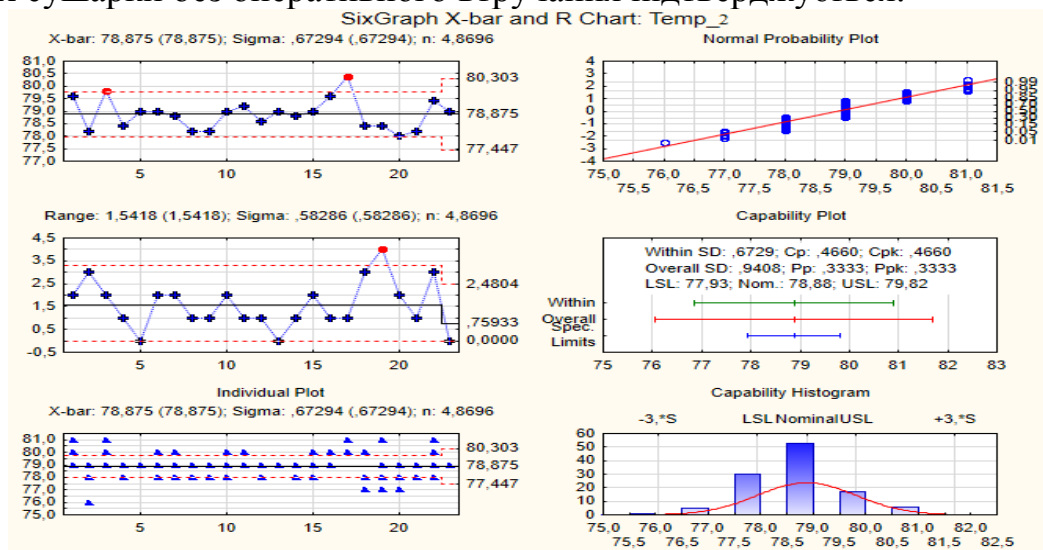


Рис.4. Контрольні карти для температури солоду на виході з останніх зон солодосушарки

В результаті проведеної ідентифікації параметрів технологічного процесу сушіння солоду на основі контрольних карт Шухарта, оцінені можливі комбінації точок для виявлення невідповідних порушень (Табл.1).

Таблиця 1

Комбінації точок для виявлення невідповідних порушень

Комбінація точок на контрольних картах	Особливості функціонування солодосушильної установки
Вихід точок за контрольні межі (перетин трьохсигмових ліній)	Вказує на значне погіршення функціонування технологічного процесу
Тренд (точки являють послідовний спад чи ріст)	Швидше за все, вказує на засміченість елементів конструкції установки, які виникли в процесі експлуатації (утворення різного роду відкладень на трубах)

Наближення до центральної лінії	При умові нормального закону розподілу вказує на задовільний стан роботи системи управління
Наближення точок до контрольних меж	Веде до різкого погіршення якості готового продукту (засмічення, накип на трубах, розрив решіток).

Статистичний аналіз технологічних змінних солодосушильної установки показав, що всі змінні для математичної моделі є випадковими та розподіляються за близьким до нормального законом. Для аналізу взаємозв'язаних змінних використано карти Хотеллінга на прикладі температур в солодосушильній установці.

При діагностуванні технологічних об'єктів для забезпечення стабільно високої якості вихідної продукції з мінімальними витратами, пропонується вирішення задачі ідентифікації об'єкта на основі нейро-нечіткого підходу, в якості типу функцій належності обрані трикутні функції належності, оскільки вони дозволяють відтворити достатню адекватність розроблюваної нейро-нечіткої моделі (Рис.5), який показав можливість встановлення причинно-наслідкових зв'язків між вхідними та вихідними змінними процесу сушіння солоду у вигляді нечітких правил на основі алгоритму Сугено.

Розглянуто ідентифікацію залежності зміни вологості солоду на виході від вхідних змінних: витрати зернового матеріалу, початкової температури та вологості зернового матеріалу на протязі місяця

$$W = f(F_z, T_{z0}, W_0) . \quad (1)$$

Для лінгвістичної апроксимації основних змінних, використовувався підхід на основі експертної інформації, отриманої з підприємства. Представлений підхід дозволяє спростити роботу експертів для виявлення основних залежностей між вхідними та вихідними змінними для процесу солодосушіння, та сформуванню інформаційний матеріал для осіб, які приймають рішення.

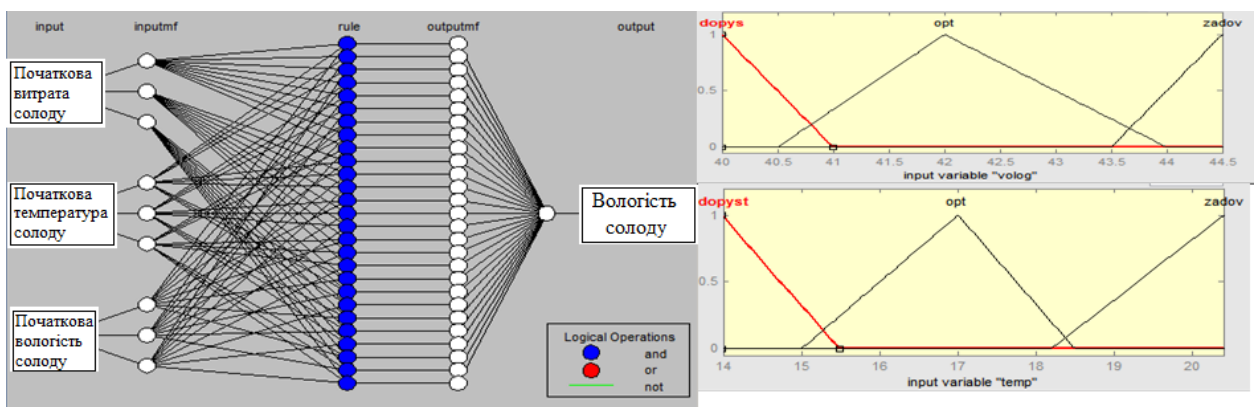


Рис. 5. Структура нейро-нечіткої мережі для ідентифікації причинно-наслідкових зв'язків оцінки процесу солодосушіння

Кожна з поверхонь відгуку (Рис.6) відображає області визначень оптимального виходу солоду, відповідно до яких може бути прийнято рішення по підтримці головних режимів функціонування для досягнення критерію максимальної продуктивності процесу сушіння солоду.

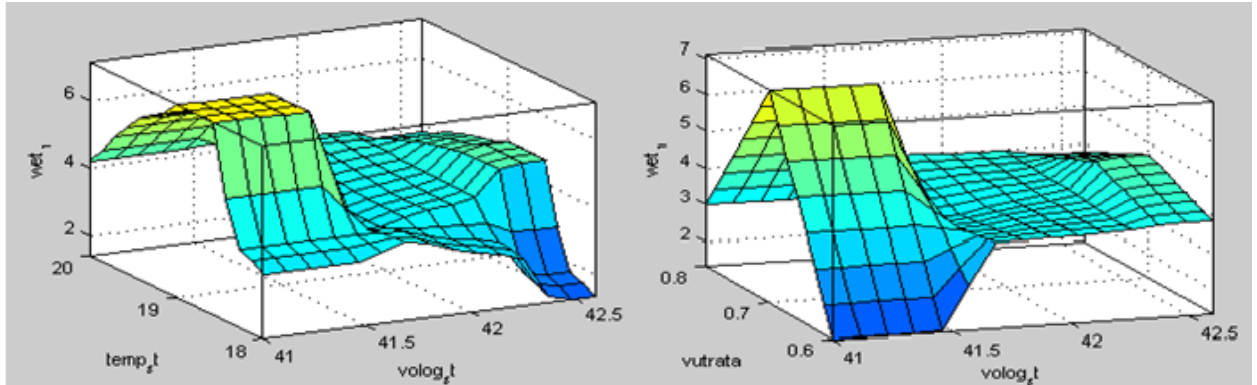


Рис.6. Поверхні відгуку

Проведено параметричну ідентифікацію на основі методу теорії чутливості, який дозволив визначити варіацію параметрів викликаних нестационарністю. Отримана оцінка функцій чутливості для температурного та вологісного режиму функціонування досліджуваного об'єкта щодо зміни коефіцієнтів математичної моделі. Наприклад, вологість матеріалу залежить:

$$W_c = f(t, K), \text{ де } \Delta W_c = \frac{\partial W_c(t, K_0)}{\partial K} \Delta K. \quad (2)$$

де  $K$  – ідентифікуючі параметри моделі,  $\Delta$  – допустима зміна параметра.

Якщо початкові умови та вхідні дії фіксовані, то властивості системи визначаються набором параметрів  $K$ . Зміна параметрів  $K$  буде призводити до змін вектору стану.

Розроблено таблицю допустимих змін коефіцієнтів математичної моделі (відповідно для вологості та температури матеріалу) в камері підв'ялювання та в першій зоні сушарки. Виділені коефіцієнти, які мають найбільший вплив на процес функціонування. Визначено, що найбільший вплив на вихідне значення вологості в камері підв'ялювання та в першій зоні сушарки має вхідна волога, а на температуру солоду в камері підв'ялювання: вологість на вході, вологість в камері підв'ялювання, витрата солоду, температура повітря, а на температуру матеріалу в першій зоні: вхідна вологість з камери підв'ялювання, маса солоду, вологість матеріалу в першій зоні, витрата матеріалу в першій зоні. Отримані перехідні характеристики зміни коефіцієнтів параметрів математичної моделі солодосушальної установки. Визначено необхідність створення адаптивних систем на основі нечіткої логіки.

**У четвертому розділі** розглянуто задачу розробки структури управління нестационарним технологічним процесом солодосушіння з

використанням адаптивного управління на основі нечіткого підходу. Проведено моделювання систем автоматизації.

Об'єкт описується рівнянням виду :

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Gw(t); \quad (3)$$

де  $A$ ,  $B$ ,  $G$  – задані матриці коефіцієнтів,  $x(t)$  – вектор стану об'єкта управління,  $u(t)$  – вектор управляючих дій,  $w(t)$  – випадкові процеси в каналах управління.

Для оцінки спостережності та керованості об'єкта, вона була приведена до вигляду в координатах стану. Визначено вектор параметрів стану, вектор управлінь, вектор збурень для двох головних змінних, при цьому матриці математичної моделі, наприклад, для вологості мають вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} -0.044 & 0 & 0 & 0 \\ 0.083 & -0.017 & 0 & 0 \\ 0 & 0.083 & -0.045 & 0 \\ 0 & 0 & 0.084 & -0.058 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.00041 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.000503 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00038 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00038 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.00128 & 0 & 0 & 0 & -0.0007 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00089 & 0 & 0 & 0 & -0.00066 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0011 & 0 & 0 & 0 & -0.00029 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00038 & 0 & 0 & 0 & -0.00012 \end{bmatrix}.$$

Об'єкт не повністю керований та неповністю спостережний, але при виділенні двох головних змінних температури та вологості, можна стверджувати, що ці характеристики забезпечуються.

На основі проведених досліджень запропоновано і розроблено структуру системи управління процесом сушіння солоду на основі методу табличного управління коефіцієнтами регулятора при зміні властивостей сушарки (коефіцієнтів моделі), при варіації яких виділені інтервали квазістаціонарності.

Проведено розрахунок параметрів регулятора при варіації номінальних параметрів (коефіцієнтів) моделі при:

- почерговій зміні кожного номінального параметру (в додатну та від'ємну сторону);
- одночасній зміні декількох номінальних параметрів;
- параметри не піддавались варіації.

Вплив зміни коефіцієнтів математичної моделі на перехідні процеси представлено на рис.7.

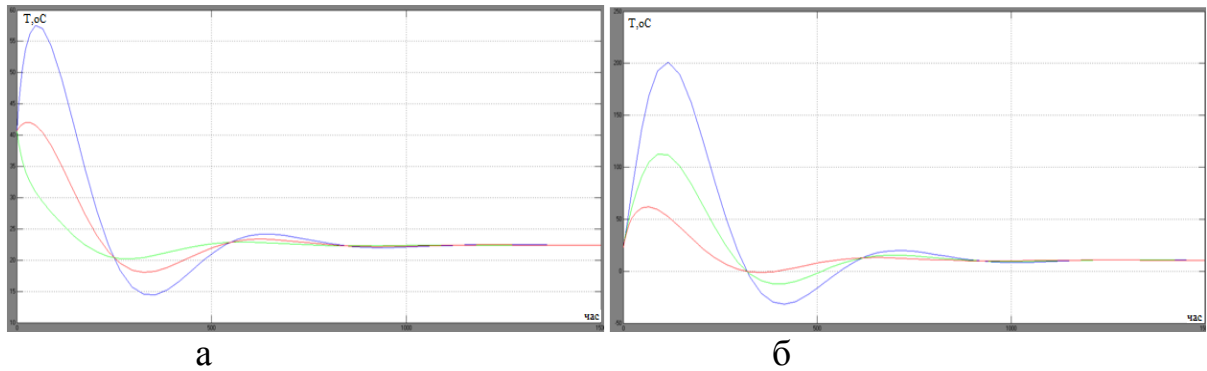


Рис.7. Перехідні процеси за вологістю при зміні коефіцієнтів математичної моделі (K7) та збуренням за масою матеріалу: а) в першій зоні; б) в другій зоні

При зміні коефіцієнтів математичної моделі за вологістю, або іншим коефіцієнтом в будь-якій, зоні вплив буде відбуватися в рівній мірі на всю систему управління солодосушаркою.

Табличне управління відтворюється за допомогою адаптивної системи управління, яка має наступний вигляд (рис.8).

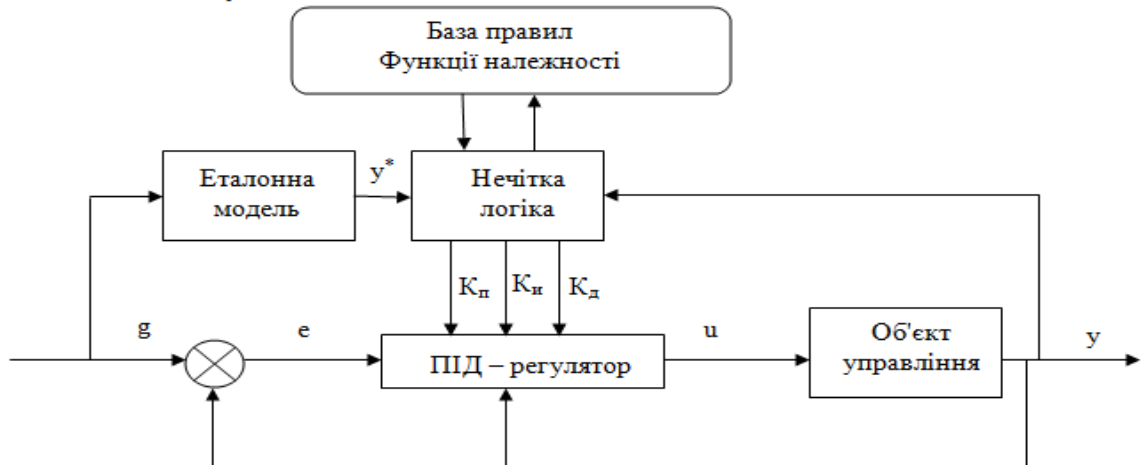


Рис.8. Структурна схема САР

Для солодосушарки шахтного типу визначено основні виробничі ситуації, які базуються на аналізі процесу її функціонування. Для сушарки виділено ситуації, які на початковому етапі можна поділити на такі класи:

- відхилення від розрахункового (оптимального) технологічного режиму;
- порушення роботи енергетичного або технологічного обладнання;
- зміни характеристик зовнішнього середовища.

Відхилення від технологічного режиму значно погіршує якість солоду, що приводить до необхідності забезпечення точності підтримання технологічного режиму за допомогою систем автоматизації. Створена системи управління солодосушаркою з використанням адаптивного управління на основі нечіткого підходу, для забезпечення необхідної якості

управління та отримання вихідного продукту заданої якості, який буде підвищувати роботу вже діючої сушильної установки (Рис.9). В солодосушильній установці температура по зонах апарату регулюється непрямим методом, оскільки управляючою дією для підтримання температурного режиму є витрата пари. Тому існує час запізнення між зміною витрати та зміною температури по зонам солодосушарки, причому ці технологічні змінні зв'язані між собою.

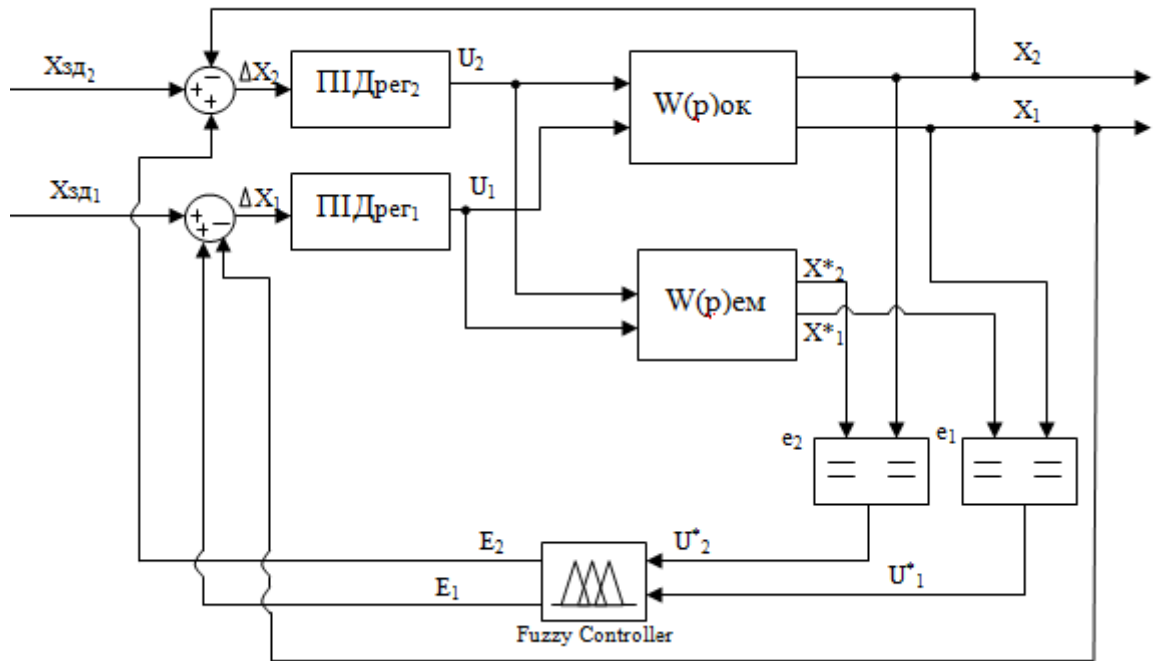


Рис.9. Система управління сушаркою солоду:

де  $X_{zd}$  – вектор заданих значень регульованих змінних;  $\Delta X_1, \Delta X_2$  – вектор розузгодження;  $W(p)_{ок}$  – передатна функція сушарки;  $W(p)_{EM}$  – передатна функція еталонної моделі сушарки;  $U_1, U_2$  – вектор керувальних дій;  $U^*_1, U^*_2$  – небаланс;  $X_1, X_2$  – вектор дійсного значення регульованих величин;  $X^*_1, X^*_2$  – вектор еталонного значення регульованих змінних;  $e_1, e_2$  – блок порівняння;  $E_1, E_2$  – величини корегуючих дій.

При зміні властивостей об'єкта в процесі роботи розраховані настройки регулятора не забезпечують в подальшому необхідної якості і виникає необхідність пристосування системи до нових умов роботи. Блок порівняння постійно порівнює координати стану об'єкта і еталонної моделі, якщо виникає різниця  $\varepsilon = x_i - x_{zd} \neq 0$ , то сигнал поступає на блок нечіткої логіки, який складається з двох вхідних каналів, на які надходять сигнали небалансу  $U^*_1, U^*_2$  та двох вихідних каналів, що подають сигнали корегувальних дій  $E_1, E_2$  на входи пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів, а основною частиною блока нечіткої логіки є база правил, яка реалізує гнучкі алгоритми формування  $E_1, E_2$  та формується на основі процедури лінгвістичної апроксимації, та формуванні причинно-наслідкових зв'язків між входами та виходами, типу «ЯКЩО... ТО...», на

основі експертної та експериментальної інформації. Коли спрацьовує логічне правило, закладене в базі нечітких правил, то результат логічного висновку буде додатнім або від'ємним і впливатиме як корегувальна дія  $(E_1, E_2)$  на кожен із входів пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів основних контурів регулювання сушарки.

З метою дослідження розробленої системи проведено імітаційне моделювання в програмі Matlab. Розроблена система управління дає можливість прийняти оператору швидке рішення і адаптувати об'єкт до нових змінюваних умов. Вона може бути побудована на базі будь-якого контролера, який задовольняє обчислювальним можливостям.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення ефективності функціонування солодосушарки в класі нестационарних об'єктів, в яких відбуваються складні фізико-хімічні перетворення речовини, шляхом розробки нових ефективних САР.

1. Системно-технічний аналіз сушарки, показав, що вона відноситься до класу нестационарних об'єктів, що проявляється в зміні параметрів об'єкта в процесі функціонування. Нестационарність солодосушарки безпосередньо впливає на якість висушеного солоду.
2. Розроблено математичну модель вертикальної шахтної сушарки, заснованої на виділенні окремих елементів (зокрема, камера підв'ялювання та чотири зони сушильної камери), для кожного з яких отримано диференціальні рівняння, коефіцієнти яких відповідають інтервалам квазістационарності та отримані часові характеристики, коефіцієнти яких відповідають певній зоні та особливостям функціонування.
3. Визначено інтервали зміни параметрів солодосушарки, які безпосередньо впливають на режим функціонування та якість готового продукту. Найбільший вплив на якість висушеного солоду, крім вхідної вологості, має температурний режим, що потребує розробки системи автоматизації з високими якісними показниками.
4. Проведений статистичний, у тому числі дескриптивний аналіз, на основі інформаційних технологій з використання карт Шухарта та Хотеллінга показав можливість керування солодосушаркою з урахуванням допустимих відхилень технологічного режиму в різних ситуаціях.
5. Солодосушарка працює в умовах суттєвих невизначеностей, наприклад, пов'язаних з виходом з ладу обладнання, зміни технологічних режимів, тому при розробці систем керування використано ситуаційний підхід на основі класифікацій виробничих ситуацій та ідентифікації процесу функціонування.

6. Розроблена система підтримки прийняття рішень на основі використання нейро-нечіткої мережі, яка складається з трьох входів(вхідної температури, вологості, витрати) та одного виходу(вологість). На основі функцій належності вхідних змінних створено базу нечітких правил на основі алгоритму Сугено.
7. Виконано аналіз існуючих автоматичних регуляторів та проведено комп'ютерне моделювання для різних типів регуляторів на основі табличного управління та нейро-мережових структур.
8. Розроблена адаптивна система керування на основі нечіткого підходу, яка враховує нестационарність солодосушарки (патент на корисну модель №89465 від 25.04.2014).

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Герасименко Т.М. Особливості використання спеціальних автоматичних регуляторів для нестационарних технологічних об'єктів/ Т.М. Герасименко, А.П. Ладанюк//Східно–європейський журнал передових технологій. – 2012. – №2/3 (56). – С.11–14.
2. Ладанюк А.П. Ситуаційне управління складним динамічним об'єктом/ А.П. Ладанюк,Р.О.Бойко, Т.М. Герасименко, Я.В. Смітюх//Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2014. – Випуск 27. – С.299 –304.
3. Герасименко Т.М. Математичне моделювання процесу сушіння солоду як об'єкта регулювання температури та вологості об'єктів/ Т.М. Герасименко, А.П. Ладанюк//Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" : науковий збірник/ Черніг. нац. технол. ун–т. – Чернігів, 2014. – № 2(73). – С. 195 – 200.
4. Герасименко Т.М. Автоматизація солодосушки в класі нестационарних систем/ Т.М. Герасименко, А.П. Ладанюк, О.В. Савчук// Новый университет, Серія "Технические науки". – г. Йошкар– Ола. – 2014.– №11(33). – С. 15 – 20.
5. Савчук О.В. Нечеткое когнитивное моделирование в системах управления технологическим комплексом молокоперерабатывающего предприятия/ О.В. Савчук., А.П. Ладанюк, Т.М. Герасименко//Новый университет, Серія "Технические науки". – г. Йошкар– Ола. – 2015.– №1–2(35–36). – С. 13 – 19.
6. Патент на корисну модель №89465UA, МПК C12C 1/00 (2014.01) Система адаптивного управління сушаркою солоду на основі нечіткого підходу / Ладанюк А.П., Герасименко Т.М., Смітюх Я.В.; Національний університет харчових технологій; опубліковано 25.04.2014, Бюл. №8.
7. Герасименко Т.М. Особливості аналізу та синтезу нестационарних

систем при управлінні технологічними об'єктами / Т.М. Герасименко// 19 Міжнародна конференція з автоматичного управління "АВТОМАТИКА/AUTOMATICS – 2012", 26 – 28 вересня 2012р. – Київ : НУХТ,2012. – С. 172 – 173.

8. Герасименко Т.М. Особливості динаміки нестационарних об'єктів харчової промисловості / Т.М. Герасименко//Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: 78-а наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів, 2 -3 квітня 2012р.: тези доп. – Київ : НУХТ,2012. – Ч.2 – С. 279–280.

9. Герасименко Т.М. Автоматизоване управління солодосушаркою з урахуванням нестационарності її характеристик / Т.М. Герасименко//Матеріали 79-ої міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів" Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті.", 15 -16 квітня 2013р. – Київ : НУХТ, 2013. – Ч.2 .Секція 17. – С.521–522.

10. Герасименко Т.М. Управління солодосушаркою в класі нестационарних систем/ Т.М. Герасименко//Матеріали ХХ Міжнародної конференція з автоматичного управління , присвяченої 100-річчю з дня народження академіка НАНУ О. Г. Івахненка "АВТОМАТИКА/AUTOMATICS – 2013", 25 – 27 вересня 2013р. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 302.

11. Герасименко Т.М. Можливості використання спеціальних регуляторів в системах автоматизації нестационарних об'єктів/ Т.М. Герасименко//80 міжнародна наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів" Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті.", 10 -11 квітня 2014р. – Київ : НУХТ, 2014. –Ч.2. – С.404 – 405.

12. Герасименко Т.М. Математична модель солодосушарки в класі нестационарних систем/ Т.М. Герасименко//Міжнародна наукова конференція присвячена 130-річчю Національного університету харчових технологій "Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості", 13-16 жовтня 2014р. Київ : – НУХТ, 2014.–С.264.

13. Герасименко Т.М. Ідентифікація солодосушарки на основі нейромережевої структури / Т.М. Герасименко//81 міжнародна наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів" Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті.", 23–24 квітня 2015р. – Київ : НУХТ, 2015. –Ч.2. – С.308.

14. Герасименко Т.М. Статистичне дослідження процесу сушіння пивоварного солоду[Електронний ресурс]/Т.М. Герасименко//Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 27 листопада 2014 р.– К: НУХТ, 2014 р. –С.32. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>.

## АНОТАЦІЯ

**Герасименко Т.М. Автоматизоване управління солодосушаркою в класі нестационарних систем. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2015.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності роботи процесу сушіння солоду в класі нестационарних систем та забезпеченню кількості якісно просушеного солоду та зменшення витрат енергоносіїв. Проведено аналіз об'єкта керування, методів і моделей, що використовуються при керуванні процесом сушіння солоду.

Розроблено математичну модель, яка описує процес сушіння солоду. Проведено статистичний аналіз технологічних змінних на основі експериментальних даних. Здійснена ідентифікація процесу солодосушіння на основі нейро – нечіткої технології моделювання та оцінка нестационарності математичними моделями зі змінними коефіцієнтами (в роботі значенню коефіцієнтів відповідають певним інтервалам квазістационарності – 1.5–2 год), що дає можливість використовувати табличний метод управління. Проведено параметричну ідентифікацію солодосушальної установки на основі методу теорії чутливості, який дозволяє оцінити варіацію параметрів, визваних нестационарністю. Для проведення діагностування проходження технологічного процесу запропоновано використовувати контрольні карти Шухарта і Хотеллінга, які дозволяють на ранніх стадіях виявити відхилення від проходження технологічного процесу і введення коригуючих дій: зміна параметрів регулятора, зміна завдання регулятора або зміна закону регулювання, з метою їх ліквідації.

Розроблено структуру системи автоматизованого керування шахтною вертикальною солодосушальною установкою, в якій реалізуються алгоритми адаптивного управління на основі нечіткої логіки.

**Ключові слова:** автоматизація, математичні моделі процесу солодосушіння, сушарки шахтного типу, нечітка логіка, адаптивність, управління.

## АННОТАЦИЯ

**Герасименко Т.М. Автоматизированное управление солодосушаркою в классе нестационарных систем. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация процессов управления. - Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2015.

Диссертация посвящена повышению эффективности работы процесса сушки солода в классе нестационарных систем и обеспечению количества качественно просушенного солода и уменьшения затрат энергоносителей. Проведен анализ объекта управления, методов и моделей, используемых при управлении процессом сушки солода.

Разработана математическая модель, которая описывает процесс сушки солода. Проведен статистический анализ технологических переменных на основе экспериментальных данных. Осуществлена идентификация процесса солодосушения на основе нейро - нечеткой технологии моделирования и оценка нестационарности математическими моделями с переменными коэффициентами (в работе значения коэффициентов соответствуют определенным интервалам квазистационарности – 1.5–2 ч), что дает возможность использовать табличный метод управления. Проведено параметрическую идентификацию солодосушительной установки одним из методов теории чувствительности, который позволяет оценить вариацию параметров, вызванных нестационарностью. Для проведения диагностики прохождения технологического процесса предложено использовать контрольные карты Шухарта и Хотеллинга, которые позволяют на ранних стадиях определить отклонения от протекания технологического процесса и введение корректирующих действий: изменение параметров регулятора, изменение задания регулятора или изменение закона регулирования с целью их ликвидации.

Разработана структура системы автоматизированного управления шахтной вертикальной солодосушительной установкой, в которой реализуются алгоритмы адаптивного управления на основе нечеткой логики.

**Ключевые слова:** автоматизация, математические модели процесса солодосушения, сушилки шахтного типа, нечеткая логика, адаптивность, управление.

## ANNOTATION

Gerasymenko T.M. Automated control of malt drying apparatus in the class of non-stationary systems. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.07 – Automation of control processes. – National University of Food Technologies, Kyiv, 2015.

The thesis is dedication to increasing the efficiency of the drying process of malt in the class of non-stationary systems and providing a range of quality dried malt and reduce energy costs. There was conducted the analysis of the control object, methods and models, that are used in the control of process of drying malt.

The was developed the mathematical model that describes the process of drying malt. There was done a statistical analysis of technological variables on the basis of experimental data. Carried the identification of process of malt drying based on neuro–fuzzy technology of modeling and assessment of non-stationary mathematical models with variable coefficients (the value of the coefficients meet certain intervals quasistationarity –1.5–2 hours), which enables to use of spreadsheet control. There was done a parametric identification of malt drying apparatus on the basis of method of the theory of sensitivity which allows to evaluate variation of parameters dictated by non- stationarity. For the carrying out of the diagnosis of passage process is suggested to use control cards Hotelling and Shuharta that allow early on to detect the deviations from the passage of the technologic process and the introduction of corrective actions: change the parameters of the regulator, change the regulator of the task or change the law regulation, in order to eliminate them.

Developed the structure of automated control of shaft type of malt drying apparatus in which algorithms of adaptive control are implemented on the basis on fuzzy logic.

**Keywords:** automation, mathematical model of the process of malt drying, dryers of shaft type, fuzzy logic, adaptability, control.