

У статті розглянуто питання автоматизації продуктового відділення цукрового заводу з використанням інтелектуальних систем управління. Для опису функціонування продуктового відділення використано методологію IDEF0. На її основі визначено основні контролюючі та управляючі змінні процесу уварювання утфелю у вакуум-апараті I кристалізації. Проведена лінгвістична апроксимація функцій належності визначених змінних та визначені діапазони їх зміни з урахуванням при цьому експертної інформації, отриманої в результаті експертного опитування

Ключові слова: інтелектуальні системи прийняття рішень, нечітка логіка, логіко-лінгвістична модель, лінгвістичні змінні

В статье рассмотрены вопросы автоматизации продуктового отделения сахарного завода с использованием интеллектуальных систем управления. Для описания функционирования продуктового отделения использована методология IDEF0. На ее основе определены основные контролирующие и управляющие переменные процесса уваривания утфеля в вакуум-аппарате I кристаллизации. Проведена лингвистическая аппроксимация функций принадлежности определенных переменных и определены диапазоны их изменения с учетом при этом экспертной информации, полученной в результате экспертного опроса

Ключевые слова: интеллектуальные системы принятия решений, нечеткая логика, логико-лингвистическая модель, лингвистические переменные

УДК 681.513:5.664.12

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43789

РОЗРОБКА НЕЧІТКИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРОДУКТОВИМ ВІДДІЛЕННЯМ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

Р. М. Сокол

Аспірант*

E-mail: sokolrm@ukr.net

Я. В. Смітюх

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: Smityuh@yandex.ru

*Кафедра автоматизації процесів управління

Національний університет

харчових технологій

вул. Володимирська, 68,

м. Київ, Україна, 01601

1. Вступ

У всьому світі дослідженням систем та технологій інтелектуального управління приділяється значна увага. Аналіз публікацій показує, що проведені науково-дослідні програми, комплексні проекти і окремі роботи по інтелектуальному управлінню можна згрупувати за певними критеріями [1]:

- інтелектуальне управління промисловими об'єктами і виробничими системами;
- створення систем інтелектуального управління динамічними об'єктами різного призначення і транспортними засобами;
- розробка засобів і методів управління інтелектуальними роботами спеціального, промислового, медичного, побутового і інших застосувань;
- розробка і створення спеціалізованих апаратних засобів для систем інтелектуального управління.

Зацікавленість до інтелектуальних систем управління (ІСУ) пояснюється низкою підстав:

Перша з них полягає в тому, що традиційні технології вже не можуть забезпечити підвищення якості управління, оскільки не враховують усіх невизначеностей, що впливають на систему. Вдосконалення відомих алгоритмів адаптивного управління не завжди дає бажаний результат. Це пояснюється як складністю самих алгоритмів, так і труднощами їх реалізації на цифровій техніці з урахуванням умов

забезпечення стійкості дискретної системи управління.

Другою підставою, яка сприяє інтенсифікації досліджень в області інтелектуальних технологій управління, є наявність фундаментальної теоретичної бази, якими є роботи Д. О. Поспелова, Л. Заде та інших вчених [1, 2].

Третя підстава пов'язана з доцільністю та необхідністю використання переваг інтелектуальних технологій управління. При цьому можна і треба говорити про реальність застосування існуючої елементної бази для створення певних класів ІСУ, відносна простота яких пов'язана з обробкою обмеженого набору знань в конкретній предметній області. При цьому природно виникає і вимагає спеціального дослідження цілий комплекс питань: про склад і оптимальні обсяги знань, про вибір форми їх представлення і способи формування тощо. Проблема створення нової елементної бази, наприклад, нейромережних структур, нечітких контролерів і т. д., спеціально орієнтованих на підтримку інтелектуальних технологій обробки інформації і управління, залишається украй актуальним і самостійним напрямом досліджень.

І, ймовірно, остання, четверта причина пов'язана з тим, що подальший розвиток інтелектуальних технологій управління як на виконавчому рівні (інтелектуальний привод), так і на рівні вироблення адекватних дій і поведінки дозволяє забезпечити створення прин-

ципово нового покоління машин, що мають високі технічні характеристики і функціональні можливості.

Враховуючи напрямки розвитку ІСУ можна виділити чотири основні інтелектуальні технології управління:

- технологія експертних систем, орієнтована на обробку знань з явною формою представлення у вигляді продукційних правил, семантичних мереж, предикатів і фреймових структур;

- технологія нечіткої логіки, орієнтована на обробку логіко-лінгвістичних моделей представлення знань за допомогою продукційних правил і розмитих множин;

- технологія нейромережних структур з неявною формою представлення знань, прихованих в архітектурі мережі, параметрах нейронів і зв'язків;

- технологія асоціативної пам'яті, орієнтована на обробку знань з неявною формою представлення у вигляді гіперповерхні в багатовимірному просторі ознак.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Процес уварювання та кристалізації, який проводиться у продуктовому відділенні цукрового заводу, – завершальний етап виробництва цукру. Метою процесу – є виділення сахарози, яка розчинена в сиропі у вигляді кристалів для отримання готового продукту належної якості.

До теперішнього часу настільки відповідальний процес уварювання утфелю часто проводиться на рівні часткової автоматизації об'єкту управління [3]. Результат роботи відділення цілком залежить від досвіду апаратника: інтуїтивно визначається момент заведення кристалів, проводиться підкачка сиропу тощо. Лабораторія лише по закінченню уварювання може точно визначити якість утфелю. Такий стан автоматизації свідчить про складність тих технологічних процесів (масообміну, теплообміну, гідродинамічних процесів), які проходять під час уварювання та багатопараметричність процесу управління.

Використання класичних методів для управління складним динамічним об'єктом, яким є продуктове відділення цукрового заводу, істотно обмежується труднощами формування єдиного критерію, що охоплює різні, а в деяких випадках і суперечливі вимоги. Так, наприклад, при вирішенні практичних завдань часто необхідно оптимізувати швидкість уварювання утфелю і мінімізувати енергетичні витрати або одночасно забезпечити максимальну продуктивність роботи.

Ще одна з найважливіших проблема управління складними динамічними об'єктами пов'язана з формалізацією невизначеностей, численні джерела яких мають різну природу [4]. В першу чергу до них слід віднести погрішності обчислень і вимірів, що призводить до можливості встановлення параметрів поточного стану об'єкту і його зовнішнього середовища тільки з деякою достовірністю. З іншого боку, умови автономного функціонування цілого ряду підсистем спеціального призначення характеризується апріорною неповною заданістю (непоінформованістю) робочої обстановки, непередбачуваністю її змін, випадковістю зовнішніх збуджуючих дій і нечіткістю формульованих цілей.

В останні роки нечітке моделювання є одним з найбільш активних та перспективних напрямків прикладних досліджень в області управління та прийняття рішень. Нечітке моделювання виявляється найбільш корисним, коли в описі технічних систем присутня невизначеність, яка ускладнює або виключає використання точних кількісних методів та підходів [4–6].

В області управління технологічними процесами нечітке моделювання дозволяє отримувати адекватніші результати в порівнянні з результатами, які ґрунтуються на використанні традиційних аналітичних моделей і алгоритмів управління [7–10].

Нечітка логіка, яка служить основою для реалізації методів нечіткого управління, природніше описує характер людського мислення і хід його міркувань, чим традиційні формально-логічні системи.

Очевидно, що використання природної мови з усім набором наявних в ній засобів для вираження людських способів мислення і ухвалення рішень за допомогою якісних представлень, понять і оцінок на зразок «мало», «багато», «досить далеко», «дуже близько» і т. д. дозволяє усебічно і компактно описати загальну смислову постановку завдань управління. Логіко-лінгвістичні моделі, отримані в результаті інтерпретації цих описів в термінах теорії нечітких множин, можуть служити конструктивною основою для розробки алгоритмів і систем інтелектуального управління складними динамічними об'єктами, які діють в умовах неповної інформації.

Проблеми, які пов'язані з автоматизацією продуктового відділення цукрових заводів, поява нових алгоритмів управління та прийняття рішень на основі інтелектуальних систем, обумовлюють необхідність проведення досліджень в напрямку використання нечіткого моделювання в управлінні технологічними процесами.

3. Мета та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету розробку нечіткої системи логічного виводу для технологічної схеми уварювання та центрифугування утфелю І кристалізації продуктового відділення цукрового заводу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- провести декомпозицію продуктового відділення, як складної технологічної системи;
- визначити основні вхідні і вихідні змінні для побудови функцій належності;
- визначити нечіткі правила поведінки системи;
- отримати поверхню відгуку об'єкту дослідження.

4. Матеріали та методи досліджень використання нечіткої логіки для управління технологічними процесами

4. 1. Опис технологічної схеми продуктового відділення

Виділення сахарози на більшості цукрових заводів України проходить в три ступені. Перевагою використання трьохкристалізаційної схеми є максимально

можливе виснаження міжкристального розчину та мінімізація втрат сахарози в мелясі. На першому ступені, коли вміст кристалів в утфелі досягає приблизно половини по масі, а утфель стає в'язким та малорухомим, кристали цукру відділяються в полі дії відцентрової сили, а міжкристальний розчин знову згущують та подають на другий. На третьому ступені під час кристалізації підтримують необхідний коефіцієнт пересичення: спочатку шляхом випарювання у вакуум-апараті, а потім шляхом охолодження в мішалках-кристалізаторах. Після відділення кристалів сахарози від міжкристального розчину, який містить майже всі нецукри, що надійшли в продуктове відділення з сиропом, з нього не можливо отримати кристалічну сахарозу. Тому відтік, отриманий в результаті центрифугування утфелю III кристалізації – мелясу, виводять як відходи виробництва. З мелясою видаляють до 15% сахарози, яка міститься в цукрових буряках, що надійшли на переробку. Кристалізацію сахарози проводять при низьких температурах кипіння цукрових розчинів (не більше 80 °C). Для цього у вакуум-апаратах, де проходить процес уварювання, утворюють глибоке розрідження. Тим самим забезпечується мінімальний розклад сахарози та слабе нарощування кольоровості [11, 12].

Процес уварювання утфелю I кристалізації має дуже важливе значення, так як в результаті отримують готовий товарний продукт – білий цукор-пісок. Тому під час проведення процесів уварювання та центрифугування утфелю I кристалізації необхідно контролювати та підтримувати оптимальні параметри під час кожної технологічної операції для отримання готового продукту найвищої якості та в максимальній кількості.

На рис. 1 представлено принципову технологічну схему уварювання та центрифугування утфелю I кристалізації.

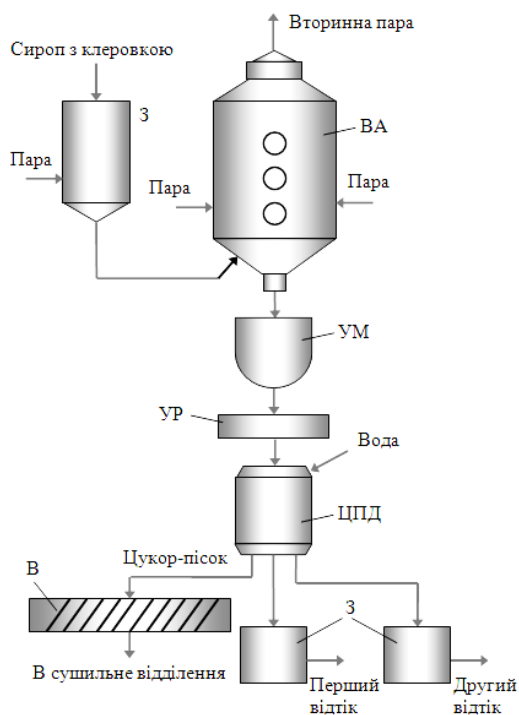


Рис. 1. Спрощена принципова технологічна схема уварювання та центрифугування утфелю I кристалізації

За приведеною схемою утфель I кристалізації уварюють із сиропу з клеровкою жовтих цукрів. Вміст сухих речовин сиропу складає 65–67%, чистота 89–92%. Утфель уварюють у вакуум-апаратах (ВА) при температурі 73–75 °C та при розрідженні 0,085–0,09 МПа протягом ≈ 180 хв. Зварений утфель з СР 92–92,5% спускають в приймальну утфелемішалку (УМ), де його зрошують водою для зниження коефіцієнта пересичення від 1,25–1,3 до 1,1–1,2 з метою запобігання утворенню «муки». Далі утфель подається в утфелерозподільувач (УР), а з нього направляється на центрифуги періодичної дії (ЦПД) для розділення кристалічної фази (кристалів цукру) від рідкої фази (міжкристального розчину). При центрифугуванні отримують вологий білий цукор-пісок з вмістом вологи 0,8–1%, та кольоровістю не більше 104 од. ICUMSA, який вивантажується на віброконвеєр (В) та елеватором підіймається в сушильне відділення, а також два відтоки, які перекачуються у збірники (З). Перший відтік – міжкристальний розчин утфелю I кристалізації, та другий відтік, який отриманий в результаті промивання цукру водою в центрифугах для змивання плівки міжкристального розчину.

4. 2. Визначення основних контролюючих та управляючих змінних

Для детального опису продуктового відділення необхідно провести аналіз об'єкта автоматизації, виділити підсистеми, визначити основні технологічні режими, контролюючі та управляючі змінні для кожної підсистеми. З цією метою використано методологію IDEF0 (Integrated Computer Aided Manufacturing Definition for Function Modeling) [13]. Основна мета моделювання – описати функціонування продуктового відділення цукрового заводу.

Згідно опису технологічного процесу продуктового відділення основною функцією є отримання готового продукту – цукру-піску. Таким чином, визначено єдиний загальний процес контекстної діаграми «Уварювання та кристалізація» (рис. 2). Вхідними значеннями є сироп, а вихідними значеннями готовий продукт, відходи виробництва – меляса, а також клеровка жовтих цукрів, яку перекачують в сокоочисне відділення. Керуванням є технологічні режими процесу уварювання та центрифугування та ДСТУ, які визначають якість готового продукту. Механізмом є працівники продуктового відділення і лабораторії, а також автоматизована система управління (АСУ).

Для побудови структури управління технологічного процесу уварювання та центрифугування використовується метод декомпозиції, що дозволяє розглядати даний процес як сукупність підсистем. Оскільки в статті розглядається процес уварювання та центрифугування утфелю I кристалізації, під час якого отримується готовий продукт, в процесі декомпозиції була отримана IDEF0-діаграма I кристалізації, представлена на рис. 3.

Вакуум-апарат є основною технологічною одиницею процесу уварювання та центрифугування I кристалізації, що характеризується складними масообмінними, теплообмінними та гідродинамічними процесами. Робота вакуум-апарату I кристалізації, а відповідно і САУ вакуум-апаратом, визначають в цілому якість готового продукту.



Рис. 2. Контекстна діаграма уварювання та центрифугування

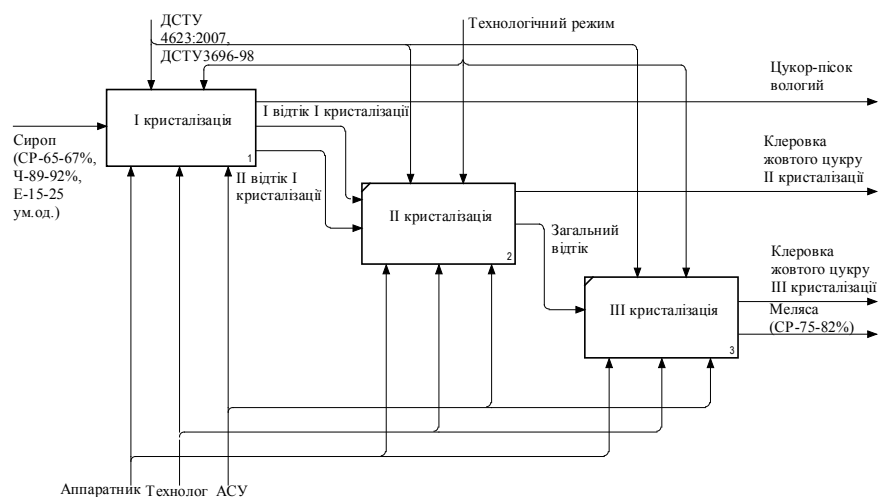


Рис. 3. Декомпозиція процесу уварювання та центрифугуванні утфелю I кристалізації

На основі декомпозиції процесу уварювання утфелю I кристалізації визначені основні контролюючі та управляючі змінні вакуум-апарату I кристалізації, які наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні контролюючі та управляючі змінні вакуум-апарату I кристалізації

№ з/п	Параметри	Позначення параметрів	Оптимальна величина
1	Вміст сухих речовин у сиропі, %	CP	65–67
2	Чистота сиропу, %	Ч	89–92
3	Кольоровість сиропу, ум. од.	E	15–25
4	Температура, °C	T	72–75
5	Розрідження у вакуум-апараті, МПа	P	0,02–0,015
6	Тривалість процесу уварювання, хв.	J	180

Основними контролюючими змінними, які визначають технологічні режими роботи вакуум – апарату I кристалізації є: вміст сухих речовин, чистота та кольоровість сиропу на входу перед вакуум-апаратом. В залежності від вхідних показників якості підготовленого сиропу визначені оптимальні параметри управління вакуум-апаратом.

4. 3. Побудова логіко-лінгвістичних моделей представлення знань

Множина факторів, які впливають на режими роботи вакуум-апарату I кристалізації (в якості факторів впливу на процеси виділено нечіткі величини), представляємо у вигляді лінгвістичних змінних (табл. 2).

Фактори, які впливають на виконання простих цілей управління вакуум-апаратом, визначають режими роботи та можливість оптимізації процесів уварювання утфелю I кристалізації. Визначальними факторами впливу на стабільність роботи вакуум-апарату є забезпечення управління оптимальних режимів його роботи.

Реалізація нечіткого моделювання здійснюється за допомогою інструментального середовища Matlab та його додатку Fuzzy Logic [6, 14–15].

Програмно сценарій представлено за допомогою нечітких продукційних правил. Загалом система нечіткого виводу для управління вакуум-апаратом охоплює 3 вхідні та 3 вихідні змінні (рис. 4).

Для реалізації алгоритмів управління роботою вакуум-апарату необхідним є формалізація змінних, які характеризують процес уварювання. Для цього здійснюється вирішення задачі лінгвістичної апроксимації.

Як приклад, розглядається апроксимація функцій належності вмісту сухих речовин сиропу. Побудова функцій належності вмісту сухих речовин сиропу оцінюється п'ятьма термами з чітко визначеним робочим діапазоном, даний фактор визначений на універсальній множині Ф1 в діапазоні від 58,0 до 74,0 %.

Для лінгвістичної апроксимації сухих речовин в сиропі використовується аналітичний підхід. При цьому діапазон зміни сухих речовин в сиропі розбитий на піддіапазони, враховуючи при цьому експертну інформацію, отриману в результаті експертного опитування. На рис. 5 наведений приклад лінгвістичної апроксимації змінної – «сухі речовини».

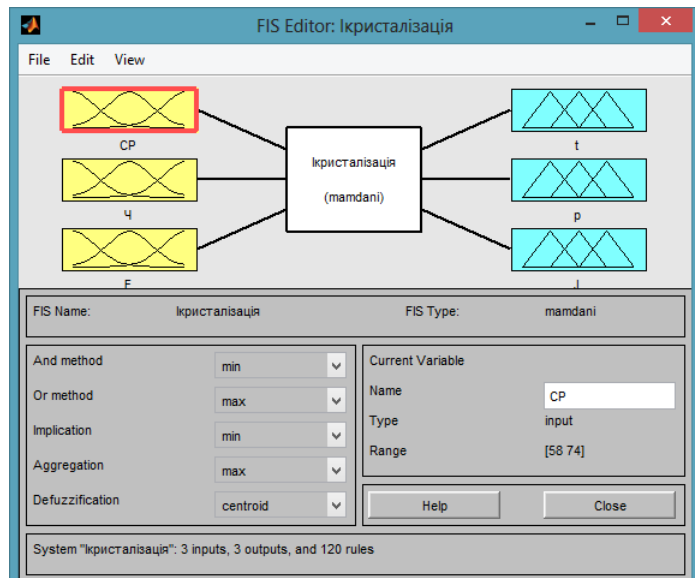


Рис. 4. Структура підсистеми аналізу та управління вакуум-апаратом

Послідовність управляючих дій визначається на множині вхідних та вихідних змінних представлених як нечіткі величини.

Вибір необхідного сценарію, як блоку нечіткої моделі сценаріїв, здійснюється модулем вибору сценаріїв управління із бази знань в результаті аналізу та розпізнавання ситуацій і прогнозу розвитку об'єкта. На програмному рівні кожний блок являє собою окрему автономну підсистему загальної системи бази знань, представлених за допомогою продукційних правил типу If ... then (Якщо ,Тоді).

База знань складається з максимально можливої кількості правил (120 правил). Приклад запису продукційних правил, які містить база знань вибору оптимального режиму роботи вакуум-апарату, має наступний запис:

Правило 1. If (CP is низ) and (Ч is низ) and (E is низ) then (t is вис)(p is вис)(J is вис). (1)

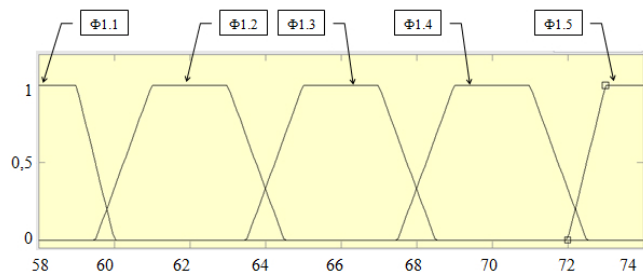


Рис. 5. Лінгвістична апроксимація вмісту сухих речовин в сиропі

В результаті побудови бази знань отримано поверхні нечіткого виводу. Приклади отриманих поверхонь відгуку (з дев'яти можливих) представлені на рис. 6, а, б.

Приведені на рис. 6 поверхні нечіткого виводу представляють собою залежності між значеннями основних вхідних та вихідних лінгвістичних змінних (табл. 2). За їх допомогою можна перевірити настройку алгоритму виводу, а також адекватність при реалізації

управління вакуум-апаратом за допомогою нечіткого логічного регулятора.

Таблиця 2

Позначення основних факторів роботи під час процесу уварювання утфелю І кристалізації

Фактори впливу на протікання процесів уварювання у вакуум-апараті І кристалізації		
Позначення	Зміст	
Ф1	Ф1.1	вміст сухих речовин у сиропі низький
	Ф1.2	вміст сухих речовин у сиропі нижче норми
	Ф1.3	вміст сухих речовин у сиропі в нормі
	Ф1.4	вміст сухих речовин у сиропі вище норми
	Ф1.5	вміст сухих речовин у сиропі високий
Ф2	Ф2.1	чистота сиропу низька
	Ф2.2	чистота сиропу нижче норми
	Ф2.3	чистота сиропу в нормі
	Ф2.4	чистота сиропу вище норми
	Ф2.5	чистота сиропу висока
Ф3	Ф3.1	кольоровість сиропу низька
	Ф3.2	кольоровість сиропу нижче норми
	Ф3.3	кольоровість сиропу в нормі
	Ф3.4	кольоровість сиропу вище норми
	Ф3.5	кольоровість сиропу висока
Ф4	Ф4.1	температура низька
	Ф4.2	температура нижче норми
	Ф4.3	температура в нормі
	Ф4.4	температура вище норми
	Ф4.5	температура висока
Ф5	Ф5.1	розрідження у вакуум-апараті низьке
	Ф5.2	розрідження у вакуум-апараті нижче норми
	Ф5.3	розрідження у вакуум-апараті в нормі
	Ф5.4	розрідження у вакуум-апараті вище норми
	Ф5.5	розрідження у вакуум-апараті високе
Ф6	Ф6.1	тривалість процесу уварювання низька
	Ф6.2	тривалість процесу уварювання норми
	Ф6.3	тривалість процесу уварювання в нормі
	Ф6.4	тривалість процесу уварювання вище норми
	Ф6.5	тривалість процесу уварювання висока

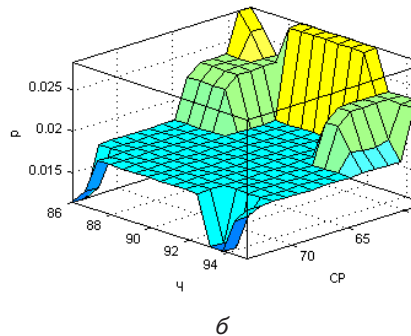
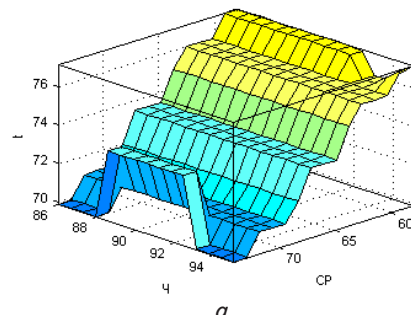


Рис. 6. Поверхні нечіткого виводу: а – залежність регулювання температури у вакуум-апараті від вмісту сухих речовин і чистоти сиропу; б – залежність регулювання розрідження у вакуум-апараті від вмісту сухих речовин і чистоти сиропу

6. Висновки

В процесі дослідження було встановлено, що продуктове відділення цукрового заводу є складним динамічним об'єктом, який супроводжується багатопараметричними процесами управління. Для детального опису продуктового відділення було використано методологію IDEF0, яка дозволила провести декомпозицію складного технологічного процесу та отримати детальну інформацію про зв'язки між підсистемами.

Проведена декомпозиція системи дозволила визначити основні групи контролюючих вхідних та регулюючих вихідних змінних процесу уварювання та кристалізації утфелю І продукту.

Проведена лінгвістична апроксимація функцій належності визначених змінних та визначені діапазони їх зміни з урахуванням при цьому експертної інформації, отриманої в результаті експертного опитування.

На основі отриманих функцій належності побудована база знань, яка представляє собою нечітку модель сценаріїв.

На основі бази знань отримано поверхні нечіткого виводу, які дозволяють оцінити настройку алгоритму виводу, а також адекватність управління вакуум-апаратом.

Проведені дослідження та їх результати показали, що використання методів нечіткого аналізу в дослідженні та розробці систем автоматизації, доводять свою ефективність у формуванні алгоритмів інтелектуального управління.

Інтеграція інтелектуальних систем управління технологічними процесами дозволяє визначити оптимальні технологічні режими роботи вакуум-апарату І кристалізації вже на початковому етапі уварювання утфелю, враховуючи якісні показники сиропу на вході та сформувані ефективні алгоритми управління з метою отримання цукру високої якості.

Література

1. Интеллектуальные системы автоматического управления [Текст] / под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
2. Поспелов, Д. А. Искусственный интеллект: справоч. в 3 кн. Кн. 2. Модели и методы [Текст] / Д. А. Поспелов. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
3. Сокол, Р. М. Автоматизація управління продуктивним відділенням на основі інтелектуальних систем [Текст] / Р. М. Сокол, Я. В. Смітюх // Вісник НТУ „ХПІ”. – 2015. – № 11. – С. 83–87.
4. Городецкий, А. Е. Управление в условиях неопределенности [Текст] / А. Е. Городецкий. – СПб.: СПбГТУ, 2002. – 398 с.
5. Белоглазов, Д. А. Необходимость построения систем управления на основе методов искусственного интеллекта [Текст] / Д. А. Белоглазов, И. С. Коберси // Известия Южного федерального университета. – 2009. – № 5. – С. 186–191.
6. Мишта, П. В. Нечеткая логика – современный путь развития теории управления [Текст] / П. В. Мишта, П. Г. Бызов, Е. В. Васильева // Известия ВолгГТУ. – 2010. – № 3. – С. 139–142.
7. Макаров, И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления [Текст] / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов. – Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
8. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами : учеб. пособие [Текст] / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 267 с.
9. Гостев, В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления [Текст] / В. И. Гостев. – К.: Радиоаматор, 2008. – 972 с.
10. Карпенко, Д. С. Застосування нечіткої логіки в керуванні процесом бродіння пива [Текст] / Д. С. Карпенко, Л. Д. Ярошук // Вісник НТУУ «КПІ». – 2011. – № 2. – С. 115–118.
11. Сапронов, А. Р. Технология сахарного производства [Текст] / А. Р. Сапронов. – М.: Колос, 1999. – 495 с.
12. Ярчук, М. Правила ведення технологічного процесу виробництва цукру з цукрових буряків. Правила усталеної практики 15.83-37-106:2007 [Текст] / М. Ярчук, М. Калініченко, В. Чупахіна, Л. Галацан та ін. – К.: Цукор України, 2008. – 420 с.
13. Ананьев, И. В. Область эффективного применения нотации IDEF0 для задач описания бизнес-процесов [Текст] / И. В. Ананьев, Е. Г. Серова // Вестник СПбГУ. – 2008. – № 2. – С. 161–172.
14. King, R. Computational intelligence in control engineering [Text] / R. King. – Presented at Marcel Dekker, The United States of America, 1999. – 304 с.
15. Zhang, H. Fuzzy Modeling and Fuzzy Control [Text] / H. Zhang, D. Liu. – Presented at Birkhauser, Boston, 2006. – 416 с. doi: 10.1007/978-0-8176-4539-7