

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ГЛУЩЕНКО МАРГАРИТА СЕРГІЇВНА

УДК 664.126.43:681.51

МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИМИ
ПРОЦЕСАМИ В УТФЕЛЬНИХ ВАКУУМ-АППАРАТАХ

05.13.07 Автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2008

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій.

Науковий керівник: доктор технічних наук,
професор Трегуб Віктор Григорович,
професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій, НУХТ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
професор Кузьменко Б.В.,
професор кафедри Автоматизації
сільськогосподарського виробництва ім.
академіка Мартиненка І.І.,
Національного аграрного університету

кандидат технічних наук,
доцент Мовчан Анатолій Павлович,
доцент кафедри

Провідна установа: НВК "Київський інститут автоматики",
Міністерство промислової політики, м. Київ

Захист відбудеться "12" квітня 2008 року о 14⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за
адресою: 01033, м.Київ-33, вул. Володимирська, 68, ауд. A311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових
технологій за адресою: 01033, м.Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий "06" березня 2007 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

В.М.Філоненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Процес кристалізації цукру є різновидом процесів масовою кристалізації з розчину, яка проходить при виникненні і рості великої кількості кристалів. Основна кристалізація цукру відбувається в утфельному вакуум-апараті, який є однофункціональним чотирьох стадійним апаратом періодичної дії основного виробництва з підживленням і змінним об'ємом робочого середовища. Основний процес у вакуум-апараті проходить при створенні і рості нової фази у цукровому розчині, пересичення якого підтримують за рахунок випаровування частини розчинника (води) під вакуумом. Процес кристалізації цукру є одним з найбільш складних технологічних процесів, які проводять в харчовій промисловості в апаратах періодичної дії.

Моделювання і оптимальне керування періодичних процесів є актуальною темою для задач автоматизації, а у випадку процесів в утфельних вакуум-апаратах ця тема набуває особливої уваги, оскільки цей процес є кінцевим у виробництві цукру і від нього в великій мірі залежить якість готового продукту. Автоматизація з використанням найсучасніших підходів потребує постійного вдосконалення. Мета моделювання цього процесу полягає у вивченні поведінки в різних ситуаціях, а також знаходження ефективної та оптимальної роботи даного процесу на виробництві.

Оптимізація процесу кристалізації проводиться для знаходження оптимальних режимів даного процесу та для підвищення ефективності роботи утфельних вакуум-апаратів, а саме підвищити вихід кристалічного цукру та зменшити час варіння.

Таким чином, моделювання і оптимальне керування періодичними процесами в утфельних вакуум-апаратах є актуальною задачею, розв'язання якої потребує комплексу теоретичних та експериментальних досліджень.

Робота виконувалась у відповідності з планом науково-дослідних робіт Національного університету харчових технологій та держбюджетної теми «Наукові основи створення АСУ для комп'ютерно-інтегрованих виробництв харчової промисловості» (кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій)

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є підвищення техніко-економічних показників функціонування утфельних вакуум-апаратів і зменшення витрат енергоносіїв шляхом створення оптимальної системи керування цими апаратами на основі ситуаційного підходу, що розроблений з використанням математичних моделей.

Для досягнення вказаної мети визначені такі основні задачі:

- системний аналіз утфельного вакуум-апарата, як об'єкта керування;
- аналіз та синтез математичних моделей;
- розробка комплексу задач оптимального управління, що включає:
 - вибір критерію оптимального управління в залежності від ситуації;
 - мінімізація тривалості процесу;
 - максимізація виходу готового продукту;
- реалізація системи оптимального керування утфельним вакуум-апаратом.

Об'єкт досліджень - процеси керування утфельними вакуум-апаратами періодичної дії для кристалізації цукру.

Предметом дослідження є алгоритми оптимального управління утфельними вакуум-апаратами періодичної дії на цукрових заводах.

Методи дослідження базуються на положеннях сучасної теорії автоматичного керування, методах системного аналізу, оптимального управління, методів оптимізації, імітаційного моделювання з використанням уніфікованої мови моделювання.

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

- розроблені алгоритми розв'язання задачі координації роботи технологічного комплексу (ТК) апаратів періодичної дії (АПД), що забезпечують неперервність потоку продукту на вході і виході ТК у неперервно функціонуючому виробництві;
- запропоновано ситуаційний підхід до вибору критерія управління і відповідного режиму функціонування утфельного вакуум-апарата періодичної дії (ВАПД);
- розроблено комплекс алгоритмів оптимального керування ВАПД для розв'язання задач мінімізації тривалості процесу і максимізації виходу готового продукту;
- створено логічну модель ВАПД з використанням уніфікованої мови моделювання UML.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблені спосіб варіння утфелю першого продукту (одержано деклараційний патент), спосіб та систему автоматичного управління утфельним вакуум-апаратом першого продукту (одержані деклараційні патенти). На основі ситуаційного підходу розроблено програмне забезпечення мікропроцесорної автоматизованої системи управління.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету харчових технологій та передані для впровадження на Андрушівський цукровий завод, виробничо-науковій фірмі для використання в системах автоматизації на цукрових заводах України, що підтверджено відповідними довідками.

Особистий внесок у розробку наукових результатів. Особисто автором розроблені положення, викладені в розділі автореферату "Основні положення, що виносяться на захист". В публікаціях у співавторстві особистий внесок автора полягає в наступному: в [1, 4, 10] виведені математичні моделі процесу згущення сиропу, та розглянута можливість зменшення тривалості процесу; в [2, 8] розроблено математична модель утфельного вакуум-апарата в термінах уніфікованої мови моделювання UML, що дало можливість проаналізувати часову послідовність стадій і операцій циклу та залежність їх від характеристик утфельного вакуум-апарата і його регламенту, розроблено алгоритм логічного керування; в [3] розроблені варіанти забезпечення неперервності технологічного потоку для узгодження роботи апаратів періодичної дії та визначено оптимальне

керування технологічним комплексом; в [5, 9] розроблено алгоритм мінімізації тривалості процесу кристалізації за рахунок кінетичної оптимізації та знайдені оптимальні значення змінних управління; в [6] розроблений спосіб варки утфеля першої кристалізації, який дозволяє скоротити процес варки утфеля та збільшити вихід готового продукту; в [7] запропонована оптимізація продуктового відділення за кількісним показником, а саме за кількістю сиропу в проміжному збірнику, розроблений алгоритм завантаження та вивантаження утфельного вакуум-апарата; в [11] розроблений один з варіантів оптимізації, а саме максимізація виходу готового продукту на основі кінетичної оптимізації; в [12] запропоновано оптимальне керування утфельним вакуум-апаратом за двома варіантами: мінімізація тривалості процесу або максимізація готового продукту; в [13] розроблена система автоматичного керування процесом варки утфелю в вакуум-апараті, яка дозволяє оптимально керувати цим процесом; в [14] розроблено спосіб управління процесом варки утфеля в вакуум-апараті, який враховує ситуаційний підхід.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались і обговорювались на наукових конференціях і семінарах у Національному університеті харчових технологій в 2004-2007 рр.; міжнародних конференціях з автоматичного управління "Автоматика-2004" (м.Київ, 2004), "Автоматика-2005" (м.Харків, 2005); та "Автоматика-2006" (м.Вінниця, 2006); 9-ій міжнародній науково-технічній конференції (м.Київ, 2005).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 13 друкованих праць, в яких викладено основний зміст виконаних досліджень, з них 4 статей в фахових виданнях, 3 деклараційних патентів, 7 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, списку літератури з 122 найменувань і 6 додатків. Повний обсяг дисертації 196 стор., з яких зміст викладено на 130 стор. друкованого тексту, містить 52 рисунка, 18 таблиць та 10 додатків.

Основні положення, що виносяться на захист: результати досліджень властивостей утфельного вакуум-апарата періодичної дії цукрового заводу та процесів його функціонування; критерії та задачі оптимальної роботи; математичні моделі процесів, які відбуваються в вакуум-апараті; алгоритми оптимального керування, структура автоматизованої системи утфельного вакуум-апарата періодичної дії, технічне та програмне забезпечення для реалізації оптимального керування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Показана актуальність роботи з точки зору важливості оптимального керування продуктового відділення для цукрової промисловості з урахуванням розвитку інформаційних технологій та переходу на мікропроцесорну техніку. Сформульована мета та задачі дослідження. Визначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Вказано на апробацію результатів дисертації та кількість публікацій.

Перший розділ присвячений аналізу особливостей утфельного вакуум-апарата, як складного об'єкта управління, та його математичних моделей, аналізу існуючих розробок систем автоматизації утфельного вакуум-апарата, визначено

перспективи та шляхи вдосконалення систем управління вакуум-апаратом. Проведений аналіз математичних моделей показав, що існуючі математичні моделі не дають повну інформацію про проходження процесів в вакуум-апаратах та не підходять для вирішення задачі оптимального керування з використанням ситуаційного підходу.

Проведений аналіз стану проблеми дозволяє наступним чином сформулювати мету дослідження. Вона складається з формування єдиного методологічного підходу до моделювання та наступного оптимального керування періодичними процесами в утфельних вакуум-апаратах.

Визначені науково-технічні основи роботи та основні напрямки досліджень.

Другий розділ присвячений розробці математичних моделей періодичних процесів в утфельних вакуум-апараті, перевірці чутливості та адекватності цих моделей за допомогою експериментальних даних взятих з цукрових заводів.

Традиційні методи процедурного програмування та моделювання не можуть справитись зі складністю, яка пов'язана з процесом варіння утфеля. Тому об'єктно-орієнтоване програмування використано для моделювання періодичних процесів в утфельних вакуум-апаратах. Використання мови програмування UML (Unified Modeling Language) зв'язане не тільки зі складністю процесу, а із логіко-динамічною структурою такої моделі. При цьому комп'ютерне моделювання цих систем виконувалось у такій послідовності: 1) опис системи у термінах UML; 2) реалізація моделі системи; 3) аналіз результатів комп'ютерного моделювання.

В роботі для відображення статички і динаміки системи використані основні типи діаграм: *класів*, яка показує статичну структуру системи; *взаємодії*, яка показує часову послідовність використання об'єктів; *стану*, що визначає послідовність станів об'єкта в залежності від зовнішніх подій; *діяльності*, що описує зміну стану об'єкта в залежності від внутрішніх дій.

Перелічені діаграми дали змогу представити процес варіння утфеля, таким чином, щоб були визначені зв'язки як між апаратом та контролером, так і всередині самого апарата. А це в свою чергу допомогло змодельовати та реалізувати логічну структуру цього процесу. Розроблена модель використовувалась для побудови логічної підсистеми управління утфельним вакуум-апаратом.

Для розв'язання задачі оптимального керування проаналізовані і скореговані нелінійні математичні моделі, що описують стадії згущення сиропу та заведення і нарощування кристалів, а також розроблені нелінійні моделі для опису стадії відварювання. Розроблені математичні моделі дали змогу прослідкувати динаміку зміни процесу в часі за стадіями.

З допомогою оцінки чутливості математичних моделей до збурень, встановлено, що тривалість процесу мало чутлива до зміни характеристик сиропу, що підкачується. А це дало можливість у подальшому не корегувати знайдені оптимальні значення змінних керування у разі зміни у процесі варки характеристик сиропу, що підкачується.

Була проведена експериментальна перевірка розроблених моделей трьох стадій кристалізації цукру, яка показала, що вони адекватно описують виробничу реалізацію цього процесу і можуть бути використані для знаходження оптимального керування.

В третьому розділі поставлена задача оптимального керування апаратами періодичної дії в цілому і окремими утфельним вакуум-апаратом.

Для узгодження роботи апаратів періодичної дії (АПД) з безперервно функціонуючим виробництвом їх організують в технологічні комплекси, які за умови безперервної подачі сировини чи початкового напівпродукту безперервно видають готовий продукт або напівпродукт за рахунок підключення одних агрегатів після закінчення розвантаження інших. Тому метою керування технологічним комплексом апаратів періодичної дії є забезпечення неперервності технологічного потоку через цей комплекс:

$$Q_{\text{ТК}} \rightarrow \text{continuity} \Rightarrow \tau_{\text{ци}}^{\text{H}}, \quad (1)$$

$\tau_{\text{ци}}$

де $Q_{\text{ТК}}$ – витрата потоку через технологічний комплекс; $\tau_{\text{ци}}$, $\tau_{\text{ци}}^{\text{H}}$ – тривалість циклу і-го апарата періодичної дії відповідно поточна і та, що забезпечує неперервність технологічного потоку. Задача (1) може розглядатися як задача координації технологічного комплексу апаратів періодичної дії, а задача оптимізації такого технологічного комплексу в цьому разі розв'язується на рівні окремого апарата (локальна задача), причому обмеженням для її розв'язання є результати розв'язання задачі (1).

Крім того, на розв'язання задачі керування ТК АПД впливають такі класифікаційні технологічні ознаки цього комплексу: послідовність завантаження та вивантаження АПД, тобто можливість чи неможливість одночасного завантаження та вивантаження кількох АПД – ТК АПД з паралельно-часовим (ПрЗ) та послідовно-часовим (ПсЗ) завантаженням чи вивантаженням (ПрВ, ПсВ). Перші, звичайно, мають на виході накопичувальні ємності, до яких у період вивантаження можуть одночасно підмикатися кілька АПД. Можливі 4 схеми поєднання видів завантаження-вивантаження: ПсЗ – ПсВ, ПсЗ – ПрВ, ПрЗ – ПсВ, ПрЗ – ПрВ. Для допоміжного ТК АПД наведено тільки дві схеми поєднання видів завантаження-вивантаження, враховуючи що дві інші повторюють конфігурацію схем з ПрЗ-ПсВ та ПсВ-ПрЗ для основного ТК АПД.

Для постановки задачі оптимального керування обирали критерій оптимізації в залежності від аналізу ситуації. Для кожної ситуації синтезували відповідне їй оптимальне керування. В даному випадку ситуаційне управління зводилось до розв'язання однієї з таких задач:

- 1) мінімізація тривалості процесу,
- 2) максимізація виходу готового продукту.

Мінімізації тривалості використовується у разі, коли продуктове відділення стає „вузьким” місцем у виробництві цукру і запаси сиропу досягають критичної межі, тобто втрати сиропу потрібно звести до мінімуму і вихід готового продукту може розглядатись як обмеження. Максимізації виходу готового продукту використовується при достатній продуктивності відділення і головна ціль є досягнення збільшення виходу готового продукту, а тривалість проходження процесу стає обмеженням. Відображення цих задач з обмеженнями, які накладаються, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Варіанти розв'язання задачі оптимізації

1-ий ВАРІАНТ	2-ий ВАРІАНТ
$\tau_k \rightarrow \min \quad (2)$ $Kp_k / Kp_m \geq (Kp_k / Kp_m)_{\text{дон}} \quad (3)$	$Kp_k / Kp_m \rightarrow \max \quad (4)$ $\tau_{\text{ц.озр}} > \tau_k \quad (5)$

У табл.1. Kp_k , Kp_m , $(Kp_k / Kp_m)_{\text{дон}}$ – відповідно кінцеве та максимальне значення відсоткового масового вмісту кристалів в утфелі та допустиме значення їх відношення; τ_k , $\tau_{\text{ц.озр}}$ – відповідно тривалість циклу кристалізації та його обмеження.

Один з можливих варіантів розв’язання локальних задач у разі, коли готовий продукт утворюється в вакуум-апараті за рахунок фазових переходів і кінетична модель стає одночасно і динамічною моделлю апарата, пов’язаний з використанням кінетичної оптимізації. В цьому випадку зміною технологічних режимів досягаються такі значення кінетичних параметрів, які доставляють оптимум критерію управління.

На розв’язання задачі оптимального керування вакуумом-апаратом періодичної дії впливають класифікаційні технологічні ознаки цього комплексу. Для їх визначення були проаналізовані реальні апаратурно-технологічні схеми Лохвицького та Андрушівського цукрового заводу.

Для утфельного вакуум-апарата першого продукту застосовується послідовно-часове завантаження та вивантаження апарату періодичної дії через неможливість одночасного завантаження та вивантаження кількох вакуум-апаратів. Утфелемішалка не може розглядатись як вихідна накопичувальна ємність, тому що через її обмежений об’єм не можливе одночасне вивантаження в цю мішалку кількох вакуум-апаратів.

Кількісно оцінити зміну ситуації можливо за допомогою кількості сиропу, який надходить до утфельних вакуум-апаратів.

Якщо в проміжних збірниках після випарної станції об’єм сиропу досягає 2/3 їх загального об’єму і більше та випарна станція продовжує працювати, тоді обираємо мінімізацію тривалості варіння утфелю. Якщо ж сиропу буде менше, і випарна станція продовжує працювати або ні, тоді обираємо збільшення виходу готового продукту до максимально можливого.

Отже кількісна оцінка ситуації буде мати вигляд:

$$V_c < V_{\text{зб}} \cdot K_{\text{з1}} \cdot K_{\text{з2}}, \quad \text{тоді} \quad Kp / Kp_m \rightarrow \max,$$

$$V_c \geq V_{\text{зб}} \cdot K_{\text{з1}} \cdot K_{\text{з2}}, \quad \text{тоді} \quad \tau_k \rightarrow \min.$$

де V_c - об’єм сиропу, м^3 , $V_{\text{зб}}$ - об’єм проміжного збірника після випарної станції, м^3 ; $K_{\text{з1}}=0,75 \dots 0,85$ - коефіцієнт запасу для запобігання переливу, $K_{\text{з2}}=0,95 \dots 0,98$ - коефіцієнт, що враховує можливість зменшення об’єму у процесі експлуатації.

Враховуючи класифікаційні ознаки вакуум-апаратів першого продукту алгоритм вибору утфельного вакуум-апарату для його вивантаження буде простим: утфельний вакуум-апарат вивантажується одразу після досягнення умови варіантів 1 та 2 по критеріям оптимізації.

При розробці параметричної схеми (рис.1) ситуаційного підходу саме кількісний параметр взятий за головний - кількість сиропу, який поступає після випарної станції.

На параметричній схемі змінними управліннями є кількість сиропу, який підкачується $G_{cn}(\tau)$, а також температура в гріючій камері та тиск вторинної пари (t_n і p_e). Змінними стану будуть: температура утфелю t_y , концентрація сухих речовин в утфелі CB_y , температура стінок t_{cm} , приріст гідростатичного рівня Δh , швидкість випаровування W_H та масовий вміст кристалів цукру Kp . До збурень відносимо температуру сиропу, який поступає з випарної станції t_c , вміст сухих речовин CB_{cn} та доброякісність продукту $Дб_{cn}$, який підкачується.

Змінні управління, збурення і змінні стану для задач (2) і (4) будуть однаковими, тому параметрична схема за винятком критерію оптимізації не зміниться при зміні ситуації.

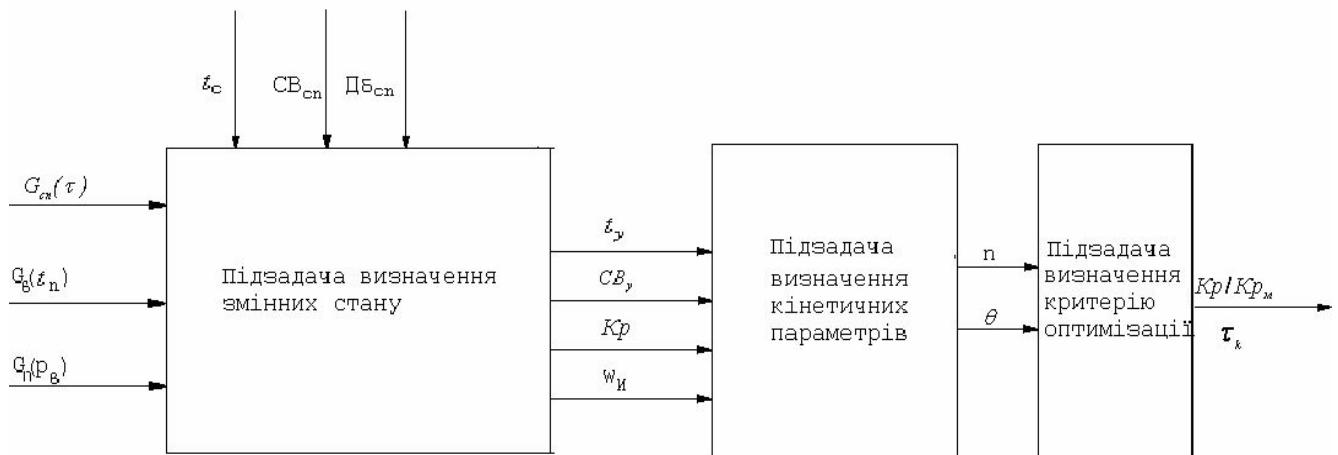


Рис. 1 Параметрична схема управління утфельним вакуум-апаратом за ситуаційним підходом

Отже, виходячи з параметричної схеми постановка задачі оптимального управління за ситуаційним підходом зводиться до наступного: в залежності від кількості сиропу, температури в гріючій камері та тиску вторинної пари можемо отримати або мінімальний час варіння утфелю або максимальний вихід готового продукту, враховуючи якісні та кількісні оцінки утфелю з додержанням та регулюванням кінетичних параметрів і визначених для кожної ситуації.

Проведений розрахунок числових значень кінетичних параметрів для кожної ситуації та знайдені оптимальні умови роботи утфельного вакуум-апарату. Запропоновані алгоритми знаходження оптимальних змінних управління.

1. Мінімізація тривалості процесу

Для розв'язання цієї задачі представимо рівняння у вигляді:

$$\tau = \theta \cdot (\ln Kp_m / (Kp_m - Kp_k))^{\frac{1}{n}}, \quad (6)$$

Отримали залежність:

$$\tau(\theta) \rightarrow \min \Rightarrow \theta^* = \inf \theta \quad (7)$$

$$\tau(n) \rightarrow \max \Rightarrow n^* = \begin{cases} \sup n, & \text{коли } Kp_k / Kp_m > 0,632, \\ \inf n, & \text{коли } Kp_k / Kp_m < 0,632, \end{cases} \quad (8)$$

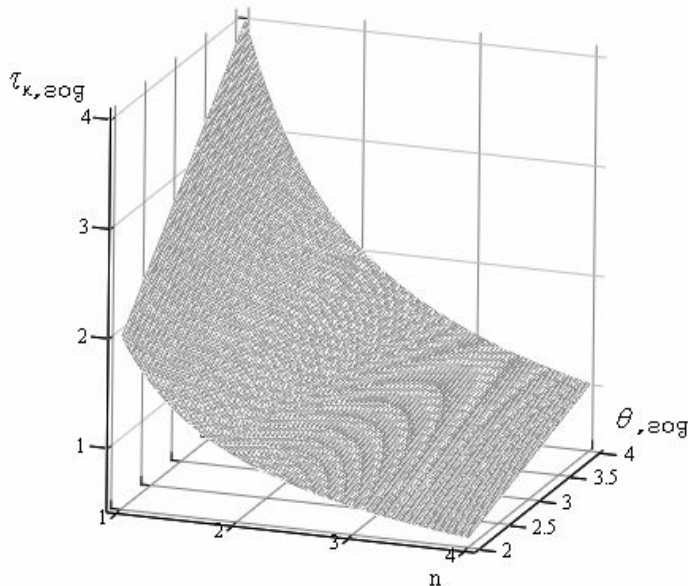
$$(9)$$

У випадку, коли $Kp_k / Kp_m = 0,632$, час τ інваріантний відносно n .

Вираз (9) через малий вихід кристалічного цукру практичного значення не має, тому розв'язання задачі (4) реалізовується з допомогою (7) і (8).

Щоб мінімізувати тривалість процесу варіння потрібно мінімізувати постійну часу та максимізувати коефіцієнт форми кінетичної кривої (форм-фактор) (рис.2).

Знаходження мінімуму часу призводить до зменшення виходу готового продукту, тому мінімізувати тривалість процесу можливо тільки враховуючи



обмеження, вихід готового продукту повинен бути не менше допустимого.

Розв'язання задачі звелась до знаходження таких значень змінних стану і керування та функцій їх зміни, які дали змогу мінімізувати постійну часу і максимізувати форм-фактор.

Мінімізація постійної часу зводиться до наступного:

$$\theta = f(p_v, t_n, G_{cn}(\tau)) \rightarrow \min \quad (10)$$

Тривалість стадії росту кристалів визначається CB_{yk}

Рис.2 Залежність часу кристалізації τ_k досягненням вмісту сухих речовин. від кінетичних параметрів. Вважаємо, що варка утфелю проходить при неперервній підкачці. Аналіз експериментальних даних показав, що в більшості випадків варки утфелю функція $G_{cn}(\tau)$ змінюється складним чином.

Для спрощення варіаційної задачі визначення $G_{cn}^*(\tau)$ попередньо параметризували цю функцію і звели варіаційну задачу до задачі знаходження параметра c^* або вектора параметрів $\{c_i^*\}$, при якому вектор управління $U^* = \{p_v^*, t_n^*, c_i^*\}$ забезпечить мінімум постійної часу.

При пошуку рішення задачі у відповідності до технологічного регламенту та умов фізичної реалізації процесу, на значення змінних управління і стану накладались наступні обмеження:

$$110 \leq t_n \leq 145^\circ\text{C}, 10 \leq p_v \leq 50 \text{ кПа}, 1 < \Pi \leq 1.2, Kp_k / Kp_m \geq 0.632$$

Припустили, що функція змінюється експоненціально:

$$g_{cn}(\tau / \theta) = g_n \exp[-c(\tau / \theta)],$$

де g_n - початкова відносна витрата продукту, який підкачується.

Досліджений вплив параметрів c та залежність від змінних управління приведено на рис.3. При виборі c потрібно враховувати, що при збільшенні c темп підкачки буде більший, але це може призвести до зменшення пересичення,

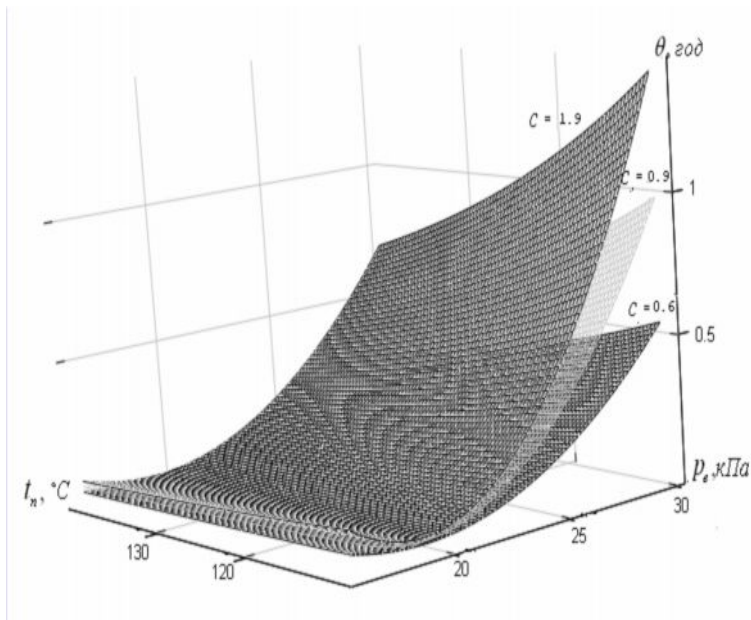


Рис 3. Графік залежності мінімальної θ від тиску вторинної пари і температури пари при різних значеннях c

змінні управління, а саме тиску гріючої вторинної пари та температури в гріючій камері потрібно тримати в межах тиск 20-30кПа, температуру в гріючій камері 120-135°C, c в межах 0,6-1,5.

Проаналізувавши вплив змінних управління на форм фактор, зробили висновок, що максимізація форм-фактора зводиться до вирішення такої задачі:

$$n = f(p_{v,n}, t_{n,n}) \rightarrow \max \quad (12)$$

Коефіцієнт форми кінетичної кривої береться на відрізок 0,1...10, так як цей відрізок повно описує всі можливі форми кінетичної кривої. Для випадку, коли $n > 1$, швидкість кристалоутворення зростає, досягає максимуму і починає спадати. Забезпечуючи таким чином збільшення Kp і зменшення тривалості процесу. Отже, вирішення цієї задачі задовольняє обидва варіанта розв'язання задачі оптимізації процесу кристалізації.

Було досліджено, що при температурі сиропу в межах 70-78°C та пересиченню в межах 1,05-1,15 відповідає форм-фактору в межах 2-6. Щоб n була в межах 2-6 потрібно $p_{v,n} = 20-35 \text{ кПа}$, $t_{n,n} = 115-135^\circ \text{C}$.

Алгоритм знаходження оптимальних значень кінетичних коефіцієнтів (рис.4) зводиться до визначення n , θ , p_v , t_n , Kp . До вхідних даних (блок 2), необхідних для розрахунку, входять: $CB_{y,k}$, m_n , CB_{cn} , S_{cm} , $t_{y,n}$, $Дб_{y,n}$.

Знаходження оптимального значення n_{opt} (блок 4) виконується зміною управління p_v , t_n за допомогою градієнтного методу. Розрахунок залежності змінних стану ведеться в блоці 5. В блоці 6 порівнюються досягненні значення тривалості процесу, кінцевий вміст сухих речовин з існуючими, вміст кристалів цукру та перевіряють обмеження. Якщо $CB_{y,k} \geq 92,5\%$, $h_y \geq h_{y,k}$, $Kp_k / Kp_m \geq 0.9$, тоді оптимальні значення змінних управління виводяться,

при цьому швидкість кристалізації зменшується, а значить тривалість збільшується. При зменшенні c коефіцієнт пересичення буде збільшуватись, що може призвести до переходу міжкристального розчину у лабільну зону, відповідно збільшується тривалість процесу і втрати цукру. Тому обрали таке значення c , при якому пересичення буде в межах 1,05-1,15.

При моделюванні для знаходження мінімальної

постійної часу було визначено, що

якщо ні то повертаємося до блоку 5 і продовжуємо розрахунок залежності змінних стану від часу.

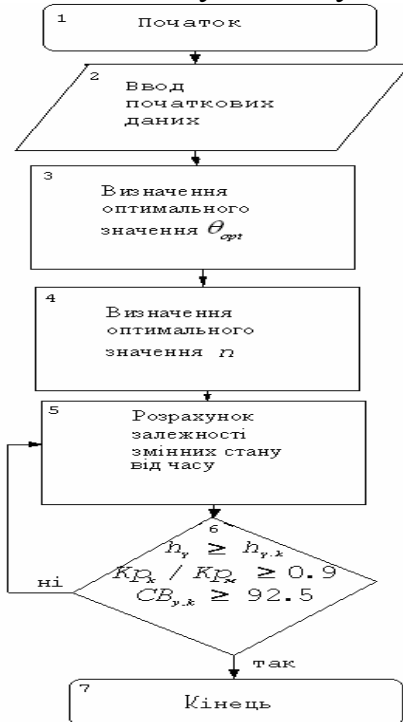


Рис.4 Алгоритм мінімізації тривалості процесу

Розв'язання задачі змінною n , показує що залежно від часу закінчення процесу максимум виходу готового продукту доставляє супремум n :

$$Kp_k(n) / Kp_m \rightarrow \max \Rightarrow n^* = \begin{cases} \sup n, & \text{КОЛИ } \tau_{\text{к.огр}} > \theta, \\ \inf n, & \text{КОЛИ } \tau_{\text{к.огр}} < \theta. \end{cases} \quad (15)$$

Умову супремуму n розглядали вище, при обмеженні $\tau_{\text{к.огр}} > \theta$ (15) всі рекомендації зберігаються, а при обмеженні $\tau_{\text{к.огр}} < \theta$, як видно із рівняння (16) Kp_k / Kp_m не перевищує 0,632, що відповідає доволі невеликому виходу готового продукту і практичного значення не має.

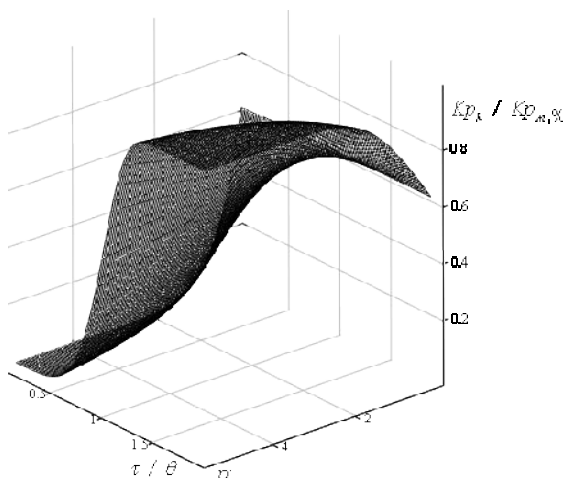


Рис. 5. Залежність Kp_k / Kp_m від відносного часу проходження кристалізації та форм-фактора

Було виявлено, щоб мінімізувати тривалість процесу кристалізації, враховуючи оптимальні значення постійної часу та форм фактора одночасно, потрібно змінні управління тримати в межах $p_{\text{с}} = [20-30] \text{ кПа}$, $t_n = [120-135] ^\circ \text{C}$, $c = 0,6-1,5$.

2.Максимізація виходу готового продукту

Для розв'язання цієї задачі представимо рівняння у вигляді:

$$Kp_k / Kp_m = [1 - \exp[-\tau / \theta]^n], \quad (13)$$

отримуємо таке рішення

$$Kp_k(\theta) / Kp_m \rightarrow \max \Rightarrow \theta^* = \sup \theta. \quad (14)$$

Отже, супремум постійної часу приводить до процесу максимізації виходу готового продукту.

Прослідкували залежність Kp_k / Kp_m від відносного часу проходження кристалізації та форм-фактора, що приведено на рис.5. Максимізація готового продукту звелась до наступного: знайти змінні управління, які максимізують постійну часу та початкові змінні управління, які максимізують форм-фактора:

$$\theta = f(p_{\text{с}}, t_n, G_{\text{сн}}(\tau)) \rightarrow \max.$$

$$n = f(p_{\text{с.н}}, t_{\text{н.н}}) \rightarrow \max$$

При пошуку рішення задачі у відповідності до технологічного регламенту та умов фізичної реалізації процесу, на значення змінних

Управління і стану накладались обмеження:

$$110 \leq t_n \leq 145^\circ\text{C}, 10 \leq p_s \leq 50 \text{кПа}, 1 < P \leq 1.2, \tau_{\text{ц.огр}} > \tau_k.$$

де $\tau_{\text{ц.огр}}$ - час циклу роботи вакуум-апарата обмежений продуктивністю утфелемішалки та центрифугами, год.

Дослідивши математичну модель, зробили висновок, що вести процес потрібно при рекомендаційних значеннях змінних керування, а саме враховуючи оптимальні значення постійної часу та форм-фактора одночасно, $p_s = [25-35] \text{кПа}$,

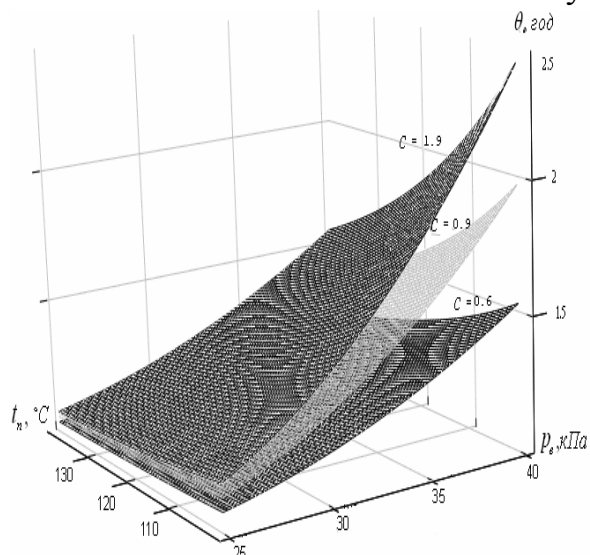


Рис 6. Графік залежності тиску вторинної пари, температури від максимального проміжку постійної часу при різних значеннях c розрахунок залежності змінних стану від часу.

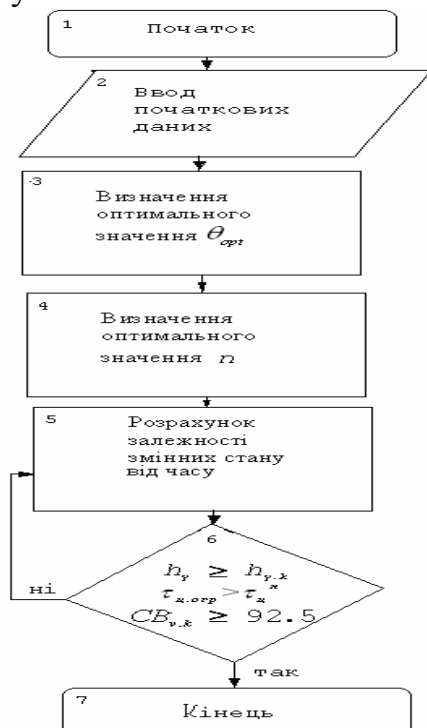


Рис.7. Алгоритм максимізації виходу готового продукту

$t_n = [115-125]^\circ\text{C}$, вони є оптимальними для даної задачі (рис.5).

Обрали межі зміни $c=0,9-1,9$, при яких пересичення буде триматись в межах 1-1,2. Розроблено алгоритм максимізації виходу готового продукту. Алгоритм працює так само, як і при мінімізації тривалості процесу, різниця в умові закінчення процесу (рис.7). В блоці 6 порівнюються нові досягненні значення тривалості процесу, кінцевий вміст сухих речовин з існуючими та перевіряють обмеження. Якщо $CB_{y,k} \geq 92,5\%$, $h_y \geq h_{y,k}$,

$\tau_{\text{ц.огр}} > \tau_k$ тоді оптимальні значення змінних управління виводяться, якщо ні то повертаємося до блоку 5 і

В четвертому розділі розроблено структуру автоматизованої системи управління утфельним вакуум-апаратом на основі ситуаційного управління, вказано технічні та програмні можливості реалізації систем.

Визначили ефективність функціонування системи у разі мінімізації тривалості процесу потрібно змодельовати весь процес варки утфеля в вакуум-апараті.

При мінімізації тривалості процесу, критерієм його закінчення було досягнення вмісту сухих речовин 92,5% і певного рівня утфеля. Крім того, вихід готового продукту не повинен бути менше допустимого.

За технологічним регламентом на Лохвицькому цукровому заводі варка утфелю ведеться приблизно 3,5 години.

при $p_e = 40 \text{ кПа}$, $t_n = 115^\circ \text{C}$, а власно процес кристалізації триває 2,6 години.

Враховуючи збурення та алгоритм мінімізації тривалості процесу спостерігаємо результат імітаційного моделювання, яке представлено у вигляді таблиці для 5-ти варок утфеля першого продукту для Лохвицького цукрового заводу.

Таблиця 2

Результати моделювання при застосуванні алгоритму мінімізації тривалості процесу

n / n	Збурення			Змінні управління			Ефективність оптимального управління		
	$Дб_{cn}$	$t_c, ^\circ \text{C}$	$СВ_{cn}, \%$	$p_e, \text{кПа}$	$t_n, ^\circ \text{C}$	c	Kp_k / Kp_m	$\tau, \text{год}$	$\frac{\tau_p - \tau_{opt}}{\tau_p} \cdot 100, \%$
1	90.1	75.3	63.5	22	128	0,8	0,941	2,25	13,5
2	92,8	76.8	65.1	25	131	0,7	0,932	2,18	16,1
3	91,5	72.4	66.2	24	125	0,65	0,952	2,05	21
4	93	73.6	64.2	23	127	0.6	0.943	2.1	19,2
5	90.8	74	63.8	24	130	0.8	0.938	2.17	16,5

Як видно з таблиці 2 тривалість всіх варок менша за час варки утфеля на Лохвицькому цукровому заводі у середньому на 12%.

Кінцем процесу варіння утфеля при максимізації виходу готового продукту буде досягнення вмісту сухих речовин 92,5 та певного рівня утфелю в вакуум-апараті, час не повинен перевищує 2,6 годин з врахуванням продуктивності шести центрифуг та утфелемішалки.

Отже, враховуючи збурення, як і в попередній задачі та алгоритм максимізації виходу готового продукту спостерігаємо результат імітаційного моделювання, яке представлено у вигляді таблиці для 5-ти варок утфеля першого продукту.

Таблиця 3

Результати моделювання при використанні алгоритму для знаходження максимуму виходу готового продукту

n / n	Збурення			Змінні управління			Ефективність оптимального управління		
	$Дб_{cn}$	$t_c, ^\circ \text{C}$	$СВ_{cn}, \%$	$p_e, \text{кПа}$	$t_n, ^\circ \text{C}$	c	Kp_k / Kp_m	$\tau, \text{год}$	$Kp_{opt}^*, \%$
1	91	72.3	64.5	29	121	1,3	0,991	2,52	10,1
2	92,8	74.8	63.7	34	119	1,1	0,968	2,42	7,6
3	90,1	72.4	66.1	31	123	0,95	0,983	2,48	9,2
4	91.7	74	65.2	30	120	1.15	0.98	2.41	8,8
5	92	73.9	64.8	32	122	1.24	0.95	2.4	5,5

$$\text{де } Kp_{opt}^* = \frac{(Kp_k / Kp_m)_e - (Kp_k / Kp_m)_{opt}}{(Kp_k / Kp_m)_e} \cdot 100,$$

звідки $(Kp_k / Kp_m)_e$ - це вихід готового продукту розрахований за експериментальними даними.

Як видно з таблиці 3 тривалість всіх варок не перевищує 2,6 години, а вихід готового продукту більший в середньому на 8%.

Апаратно-програмна реалізація системи оптимізації утфельного вакуум-апарату враховує ситуаційний підхід до вирішення цієї задачі. На рис.6 показана структурна схема системи оптимізації утфельного вакуум-апарата з елементами ситуаційного управління.

Критерій оптимізації повинен змінюватися в залежності від поточної ситуації, що виникла на виробництві, тобто автоматична система управління вибирає необхідний режим в залежності від ситуації, що визначається за вхідною поточною інформацією. Отже, в блоці критеріїв в даному випадку існує два критерія оптимізації: тривалість проходження процесу та вихід готового продукту.

Умовами переходу на інший режим для такої системи буде аналіз вхідної інформації, а саме інформація про кількість сиропу, який поступає з випарної станції.

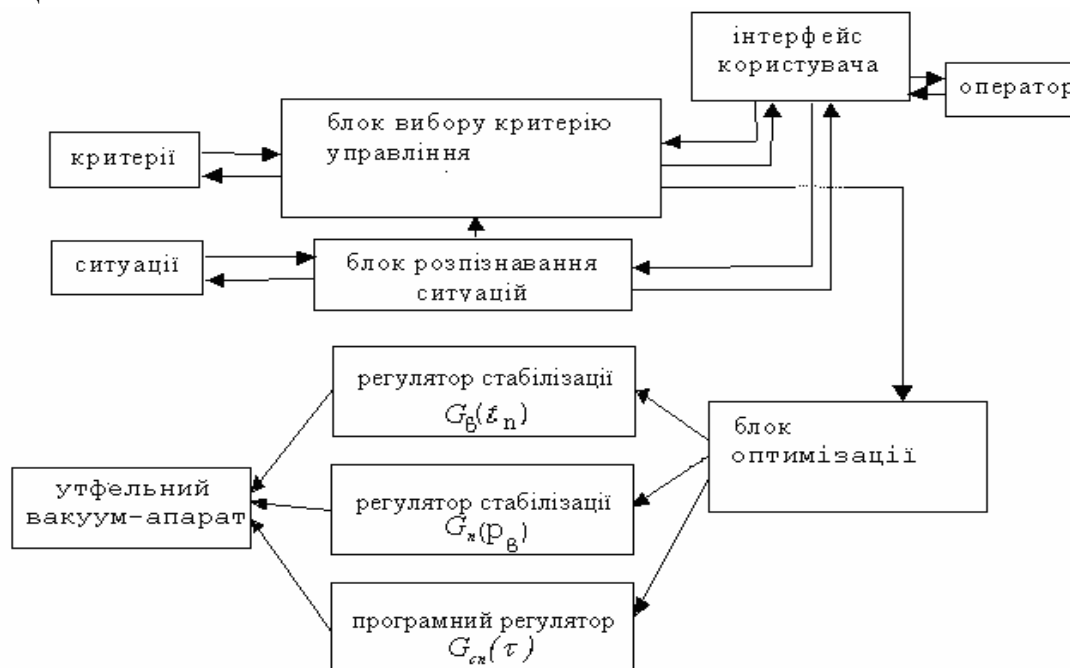


Рис. 6. Структура системи управління вакуум-апаратом

При розробці автоматизованої системи управління, виникає задача побудови верхнього рівня системи управління, враховуючі, що на нижньому рівні працюють локальні регулятори, що забезпечують стабілізацію та регулювання основних параметрів вакуум-апарата, а саме два регулятора стабілізації (температури пари в гріючій камері і тиску вторинної пари) та програмний регулятор, що змінює витрату продукту, який підкачується, за рівнем в вакуум-апараті.

Верхній рівень системи забезпечує оптимізацію основних показників на основі критеріїв управління, виконуючі такі функції: розпізнавання ситуацій на основі вхідних даних; вироблення управляючих рішень.

Розпізнавання ситуацій ведеться в режимі реального часу. Обирається ситуації, яка визначає вибір критерію управління та вибір оптимального управління.

В блоці розпізнавання ситуацій ідентифікується поточна ситуація з двох можливих. При ідентифікації конкретної ситуації блоком вибору критерію управління, шляхом логічного визначення існуючих рішень визначається критерій управління поточною варкою. Отже, в контролер надходить інформація з датчика рівня в збірнику, який знаходиться перед вакуум-апаратом. За значенням рівня в збірнику розпізнається ситуація.

Умовою перевірки поточної робочої ситуації, що не співпадає з часом збору даних (переходу на інший критерій) є: вказівка оператора або технолога, що керується власним досвідом та ситуацією, яка склалася на підприємстві; зміна режиму роботи технологічного процесу (поява передаварійної чи аварійної ситуації); поява нештатної ситуації, що не описана.

Схема автоматизації для реалізації ситуаційного управління утфельним вакуум-апаратом при мінімізації тривалості процесу та при максимізації виходу готового продукту повинна містити: регулювання температури пари в гріючій камері; регулювання тиску вторинної пари; датчик температури утфелю; регулювання витрати сиропу, який підкачується; датчик рівня; датчик контролю за граничним пересиченням з допомогою електропровідності чи в'язкості.

Для реалізації такої системи потрібен контролер, який саме і буде реалізовувати локальне регулювання вакуум-апарата. Контролер також реалізує функції логічного управління за розробленою моделлю в UML. За допомогою цієї моделі розроблена програма роботи для контролера Schneider Electric TSX. В цій програмі врахована структура, послідовність стадій під час кожної ситуації, станів, реакція на ці стани, тривалість проходження кожного процесу.

Знаходження та розрахунок оптимальних режимів є задачею комп'ютера. Програма працює за алгоритмами, які були розроблені для знаходження мінімальної тривалості процесу та максимізації виходу готового продукту. Для написання цієї програми використовувався пакет Matlab.

Реалізація розробленої системи можлива шляхом модифікації існуючих систем, пристосувавши їх до обраних алгоритмів. Різниця між існуючими системами автоматизації та розробленої полягає в оптимальному визначенні завдання регуляторів стабілізації та програмного регулятора.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано нове рішення науково-технічної задачі підвищення ефективності функціонування утфельного вакуум-апарата періодичної дії при зменшенні витрат енергоносіїв за рахунок розробки системи оптимального керування процесом кристалізації.

1. На основі виконаних теоретичних і прикладних досліджень запропоновано новий підхід до вирішення задач моделювання і оптимального керування технологічними процесами в утфельних апаратах періодичної дії з використанням ситуаційного управління.

2. Побудована логічна модель утфельного вакуум-апарата з використанням діаграм: класів, стану, діяльності, послідовності уніфікованої мови моделювання, яка є основою для розв'язання задачі логічного керування ВАПД та мінімізації тривалості циклу його роботи.

3. Для розв'язання задачі оптимального керування проаналізовані і скореговані нелінійні математичні моделі, що описують стадії згущення сиропу та заведення і нарощування кристалів, а також розроблені нелінійні моделі для опису стадії відварювання. Розроблені математичні моделі дали змогу прослідкувати динаміку зміни процесу в часі за стадіями.

4. З допомогою оцінки чутливості математичних моделей до збурень, встановлено, що тривалість процесу мало чутлива до зміни характеристик підкачуемого сиропу, що дає можливість у подальшому не корегувати знайдені оптимальні значення змінних керування у разі зміни у процесі варки характеристик підкачуваного сиропу.

5. Застосування алгоритму мінімізації тривалості процесу зменшує тривалість в середньому на 17% при несуттєвій зміні виходу готового продукту. Тривалість всього процесу варки при цьому зменшується в середньому на 12%.

6. Використання алгоритму максимізації виходу готового продукту збільшує вихід готового продукту в середньому на 8%, причому тривалість процесу варіння утфелю не перевищує нормативних значень.

7. Запропонована дворівнева апаратно-програмна реалізація системи оптимального управління вакуум-апаратом, верхній рівень якої забезпечує розпізнавання ситуацій і розрахунок оптимального режиму роботи вакуум-апарата, а нижній – реалізацію оптимальних значень змінних стану.

8. Документація розробленої системи оптимального керування утфельним вакуум-апаратом передана на Лохвицький цукровий завод для впровадження.

Основний зміст дисертації викладено в опублікованих роботах:

1. Глущенко М.С., Трегуб В.Г. Моделювання та оптимізація процесу згущення сиропу в утфельних вакуум-апаратах. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – № 54. – С. 9-13.
2. Глущенко М.С., Трегуб В.Г. Моделювання періодичних процесів в утфельних вакуум-апаратах. //Харчова промисловість. - Київ: НУХТ. - 2005, №4, - С.96-98
3. Трегуб В.Г., Глущенко М.С. Оптимальне керування технологічним комплексом апаратів періодичної дії// Наук. пр. НУХТ. - Київ. - 2006. - №18. – С. 74 – 76
4. Глущенко М.С., Трегуб В.Г. Оптимізація періодичних процесів в утфельних вакуум-апаратах // Програма і матеріали 72-ої наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Ч.ІІ- К.:НУХТ, 2006,-124с.
5. Глущенко М.С., Трегуб В.Г. Моделювання та оптимізація періодичних процесів в утфельних вакуум-апаратах // Матеріали ІХ міжнародної науково-

технічної конференції "Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення і перспективи", Ч.ІІ - К.:НУХТ, 2005. – С.42

6. Трегуб В.Г., Глущенко М.С. Деклараційний патент на корисну модель. Спосіб отримання утфелю першої кристалізації. №24279, від 25.06.2007.
7. Глущенко М.С., Трегуб В.Г. Оптимізація продуктового відділення цукрового заводу.// Матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління, Автоматика -2007, Ч. ІІ – Севастополь, 2007, - 41-42с.
8. Глущенко М.С., Трегуб В.Г., Сучасні методи побудови математичних моделей періодичних процесів в утфельних вакуум-апаратах.// Матеріали 11-й міжнародної конференції по автоматичному управлінню «Автоматика-2004», м.Київ, 2004, Т. 1. – 63с.
9. Глущенко М.С. Мінімізація тривалості періодичного процесу в утфельном вакуум-апараті.// Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2007, №5/4(29), с.55-57.
10. Глущенко М.С., Трегуб В.Г., Моделювання та оптимізація періодичних процесів в утфельних вакуум-апаратах // Матеріали 12-й міжнародної конференції з автоматичного управління "Автоматика-2005", м. Харків, 2005, Т.1 – 41 с.
11. Глущенко М.С., Трегуб В.Г. Максимізація виходу готового продукту // Програма і матеріали 73-ої наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Ч.ІІ- К.:НУХТ, 2007,-134с.
12. Глущенко М.С., Трегуб В.Г., Моделювання та оптимізація періодичних процесів в утфельних вакуум-апаратах // Матеріали 13-й міжнародної конференції з автоматичного управління "Автоматика-2005", м. Вінниця, 2006, Т.1 – 41 с.
13. Глущенко М.С., Трегуб В.Г. Деклараційний патент на корисну модель. Система автоматичного керування процесом варки утфелю в вакуум-апараті. Заявка №200713849, від 10.12.2007.
14. Глущенко М.С., Трегуб В.Г. Деклараційний патент на корисну модель. Спосіб управління процесом варіння утфеля в вакуум-апараті. Заявка №200713554, від 04.12.2007.

АНОТАЦІЯ

Глущенко М.С. Моделювання та оптимізація періодичних процесів в утфельних вакуум-апаратах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування – Національний університет харчових технологій, Київ, 2007.

Дисертацію присвячено питанням розробки оптимального управління роботи утфельного вакуум-апарату на основі ситуаційного управління. Розроблені математичні моделі для кожної стадії роботи утфельного вакуум-апарата. Проведено аналіз технологічних змінних та імітаційне моделювання процесів. Розроблені алгоритми оптимального управління. Розроблено функціональну

структуру для реалізації алгоритмів оптимальних управління. Розроблено систему автоматичного управління вакуум-апаратом.

Ключові слова: утфельний вакуум-апарат періодичної дії, технологічний комплекс, оптимальні умови, ситуаційний підхід, математичне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Глушенко М.С. Моделирование та оптимизация периодических процессов в утфельных вакуум-аппаратах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2007.

Диссертация посвящена вопросам разработки оптимального управления работы утфельного вакуум-аппарата на основе кинетической оптимизации и ситуационного управления, а также построению автоматизированной системы управления этим объектом. Разработаны математические модели и проведена их адекватность с помощью экспериментальных данных взятых с сахарных заводов. Проведен анализ технологических переменных, основные результаты проверены с помощью имитационного моделирования. Обоснована целесообразность использования ситуационного управления, как наиболее оптимального решения для работы вакуум-аппарата периодического действия.

Использована унифицированный язык моделирования UML (Unified Modeling Language) для построения логической модели периодических процессов в утфельном вакуум-аппарате.

При этом компьютерное моделирование проводилось в такой последовательности: 1) описание системы в терминах UML; 2) реализация модели системы с помощью подсистемы Simulink пакета Matlab или подобного пакета; 3) анализ результатов компьютерного моделирования.

Предложенные диаграммы дают представление такого сложного процесса, как варка утфеля, причем таким образом, чтобы видны все связи между аппаратом и контролером так и в середине самого аппарата. Разработана программа работы утфельного вакуум-аппарата для контролера на основе этих диаграмм.

Предложен ситуационный подход к управлению утфельного вакуум-аппарата, который основывается на логической схеме, которая предусматривает: диагноз ситуации и определения способов достижения цели; выявления факторов, что влияют на решения и оценку альтернатив; разработку тактики реализации решения.

Даны рекомендации по выбору критерия управления и формирования цели управления аппаратами периодического действия, который бы приводил до максимизации выхода готового продукта, в зависимости от временных ограничений, или выбор критерия, который минимизировал время процесса, в зависимости от ограничений на выход готового продукта. Разработаны алгоритмы оптимального управления для каждой ситуации отдельно за кинетическими параметрами.

Разработаны структура функционирования для реализации алгоритмов оптимального управления та систему автоматического управления вакуум-аппаратом.

Предложена двоуровневая аппаратно-програмная реализация системы оптимального управления вакуум-аппаратом, верхний уровень которой обеспечивает распознавание ситуации и расчет оптимального режима работы вакуум-аппарата, а нижний – реализацию оптимальных значений параметров состояния.

При использовании такого подхода выход готового продукта увеличился в среднем на 8%, а время варки уменьшилось в среднем на 12%.

Ключевые слова: утфельний вакуум-апарат періодического действия, технологический комплекс, оптимальные условия, математическое моделирование.

THE SUMMARY

Gluschenko M.S. Design ta optimal control of periodic processes in fillmass vacuum-devices. – Manuscript.

Dissertation for a candidate degree of technical science by speciality 05.13.07 is automation of management processes. National university of food technologies, Kyiv, 2008.

Dissertation is devoted the questions of development of optimum management works of fillmass vacuum-devices on the basis of kinetic optimization and situation management, and also to the construction of the automated control this object system. Mathematical models are developed and their adequacy is conducted by experiment information taken from sugar-houses. An analysis is conducted technological variables, basic results are tested by an imitation design. Expedience of the use of situation management is grounded, as the most optimum decision for fillmass vacuum-devices of periodic action work.

In this dissertation were given recommendations of the criterion's choice of management and forming of purpose of management the vehicles of periodic action, which would lead to maximization of output of the prepared product, depending on temporal limitations, or choice of criterion which minimized time of process, depending on limits on the output of the prepared product. The algorithms of optimum management are developed for every situation separately after kinetic parameters.

Developed structure of functioning for realization of algorithms of optimum management ta automatic control fillmass vacuum-device system.

At the use of such hike the output of the prepared product was multiplied on the average on 8%, and time of cooking went down to the average on 12%.

Keywords: fillmass vacuum-device of periodic action, technological complex, optimum terms, mathematical design.