

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Мигущенко Руслан Павлович

УДК 62-503.57

АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ БАГАТОЗОННИМИ  
ПРОХІДНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ АГРЕГАТАМИ

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”,  
Міністерство освіти і науки України, м.Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Овчаренко Олександр Іванович,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний  
інститут”,  
професор кафедри вимірювально-інформаційної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Богаєнко Іван Миколайович,  
Науково-виробнича корпорація “Київський інститут автоматички”  
Держкомітета промислової політики України, м.Київ,  
заступник генерального директора з наукової роботи

кандидат технічних наук, доцент  
Качанов Петро Олексійович,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний  
інститут”,  
завідувач кафедри автоматички і управління в технічних системах.

Провідна установа: Одеський державний політехнічний університет,  
кафедра “Електронні та комп’ютеризовані системи”,  
Міністерство освіти і науки України, м.Одеса

Захист відбудеться “ 26 ” червня 2001 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д64.050.07 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний  
інститут” за адресою: 61002, м.Харків, вул.Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету  
“Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “ 24 ” червня 2001 р.

В.о. вченого секретаря

спеціалізованої вченої ради

**Актуальність теми.** Дисертаційна робота присвячена вивченню, дослідженню та удосконаленню характеристик об'єктів класу багатозонних прохідних технологічних агрегатів (БПТА). Подібні об'єкти широко розповсюджені у промисловості та побуту. Спектр їх застосування величезний - від металургії до харчової промисловості. Вони реалізують технологічні процеси спекання, обпіку, агломерації, ректифікації, травлення, нанесення покриття, прокатки, сушки, безперервної розливки і т.д. Представниками БПТА являються печі для розігріву слябів перед прокаткою, печі для термообробки металу перед механічною обробкою, конвейерні печі та сушила, екструдери для виробництва полімерних плівок, преса для віджиму олій, пристрої для виробництва різноманітних видів макаронних виробів та інші.

На теперішній час БПТА представляють собою достатньо широкий клас об'єктів, однак, поява нових технологій постійно розширює цей клас. Так одними з таких нових, найбільш складних і мало досліджених об'єктів з розглядаємого класу являються прес-екструдери, реалізуючі технологію віджиму рослинних олій. Відмінною особливістю вказаних БПТА являється те, що сировина, поступаючи на вхід та проходячи вздовж об'єкту, під дією фізико-хімічних перетворювань, розділяється, в першому приближенні, на дві складових, одна з яких, у вигляді олії, потреби якої для України та СНД в цілому високі, виводиться в спеціальних зонах. Такі об'єкти називаємо БПТА з розділенням фракцій продукту в ході ведення технологічного процесу. Вони представляють собою найбільш складний випадок, їх значення для вітчизняного господарства величезне.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась в рамках цільової комплексної програми М6104 "Дослідження проблем прикладної метрології при вирішенні задач управління якістю промислової продукції та самоконтролю технічних систем" кафедри вимірювально-інформаційної техніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", комплексним п'ятирічним планом НДР НВП "Екструдер" (м.Харків), комплексним п'ятирічним планом НДР та ДКР ТОВ "Сигма" (м.Харків), госпдоговорами з підприємствами-розробниками та підприємствами-виробниками різних типів БПТА (НВП "Екструдер" (м.Харків) - розробник та виробник прес-екструдерів для віджиму олій, "Інженерна група ТФК" (м.Харків) - розробник та виробник автоматизованих ліній для отримання макаронних виробів).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження полягає в розробці адаптивної системи управління (СУ) яка підвищує ефективність<sup>2</sup> роботи БПТА з розділенням у ході ведення технологічного процесу фракцій продукту за рахунок досягнення максимально можливого рівня коефіцієнта корисної дії (ККД), визначаємого як:

$$\eta = \frac{P_M}{P_C} 100\%, \quad (1)$$

де  $P_C$ -маса сировини,

$P_M$ -маса корисного продукту.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати ряд основних задач. Такими являються:

-аналіз та класифікація зовнішніх подразнень, впливаючих на БПТА під час ведення технологічного процесу,

-побудова моделей розглянутого БПТА та доведення їх адекватності,

-обґрунтування використання адаптивної СУ,

-синтез та дослідження моделі обчислювача цільової функції (1),

-розробка методики отримання ефективних оцінок ККД,

-розробка структури адаптивної СУ БПТА,

-синтез алгоритмів управління БПТА та моделювання їх на ЕОМ,

-розробка засобів управління, необхідних для нормального функціонування СУ.

*Об'єкт дослідження* – удосконалення об'єктів класу БПТА шляхом автоматизації технологічного процесу отримання корисного продукту.

*Предмет дослідження* – СУ БПТА з розділенням фракцій продукту.

*Методи дослідження* базуються на використанні теорії автоматичного управління при дослідженні локальних регуляторів температури, побудови структури адаптивної СУ, розробці алгоритмів функціонування координатора, теорії ймовірності при дослідженні моделі обчислювача БПТА, теорії ідентифікації при розробці моделей БПТА, теорії статистичної обробки інформації при доведенні адекватності моделей реальному об'єкту.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

-для об'єктів, в яких зони виходу продуктів, з геометричного боку, можуть бути зведені до крапки, запропонована структура апроксимації розподіленого об'єкту зосередженням,

-для об'єктів, які апроксимуються двома інерційностями та запізненням, аналітично знайдена амплітуда і частота автоколивань від параметрів об'єкту та регулятора з релейним елементом, а також оцінена похибка апроксимації цих залежностей гармонічною функцією,

-запропонований та досліджений оригінальний алгоритм роботи координатора, оснований на оцінюванні математичного сподівання і середнього квадратичного відхилення (СКВ) процесу зміни ККД в часі.

**Практичне значення одержаних результатів** дисертаційної роботи полягає у використанні її результатів:

-на науково-виробничому підприємстві “Екструдер” (м.Харків), провідному вітчизняному виробнику прес-екструдерів маслянистих культур,

-підприємством “Інженерна група ТФК” (м.Харків), розробником та виробником автоматизованих ліній для виробництва макаронних виробів.

**Особистий внесок здобувача** у виконану роботу і публікації полягає в розробці математичних, теплофізичних та інших моделей, проведенні та аналізі розрахунків і експериментальних досліджень, формулюванні висновків і рекомендацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались на Міжнародних науково-технічних конференціях microCAD "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье" (Харків 1996р., 1997р., 1999р., 2000р.), науково-технічних конференціях "Автоматика", (Севастополь 1996р., Харків 1999р.), Міжнародних школах-семінарах "Перспективные системы управления на железнодорожном, промышленном и городском транспорте" (Алушта 1995р., 1996р., 1997р.). Окремі фрагменти та вся робота в цілому доповідались на семінарах кафедри вимірювально-інформаційної техніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 18 робіт, в тому числі 9 статей, 8 тез доповідей на конференціях та отримано один патент.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, п'яти розділів, семи додатків. Повний обсяг роботи складає 187 сторінок, які включають 15 ілюстрацій по тексту, 26 ілюстрацій не по тексту на 17 сторінках, 10 таблиць по тексту та 4 таблиці не по тексту на 3 сторінках, 7 додатків на 42 сторінках, 84 використаних літературних джерел на 8 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**В першому розділі** вибраний базовий об'єкт для досліджень, проаналізовані його характеристики, поставлені основні задачі дисертаційної роботи.

Принципово базовий п'ятизонний ПТА (рис.1) складається з зон нагріву (ЗН), зерних зон (ЗЗ), приймального бункера, шнеків подачі, матриці формування стороннього продукту. Підготовлена сировина (насіння маслянистих культур) вводиться в приймальний бункер і завдяки шнекам подачі просувається вздовж об'єкту. Під час руху воно проходить ряд стадій переробки, кінцевим результатом котрих являється корисний продукт (олія) та сторонній продукт (жмих).

Об'єкт, що досліджується, є достатньо типовим і для сучасних млинів, і для макаронних пресів, і для багатьох інших. Досягнення максимально можливого рівня ККД (1) має важливе господарське значення і фактично зумовлює економічну ефективність застосування технологічних агрегатів. Для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно:

- вибрати критерій управління,
- проаналізувати апріорні дані про об'єкт, отримані в ході експлуатації БПТА,
- виявити вихідні дані для синтезу структури, алгоритмів та засобів управління,
- визначити задачі дисертаційної роботи.

Рис.1. Спрощена технологічна схема БПТА

В процесі ведення технологічного процесу на досліджуваній об'єкт впливає велика кількість зовнішніх подразнень, які можуть суттєво змінювати (в тому числі і погіршувати) його режим роботи. Класифікація цих подразнень з вказівкою спостерігаємості та управляємості дозволяють виділити домінуючі з них. До таких відносяться температури зон, маслянистість та вологість сировини.

У ході експлуатації БПТА, експериментальним шляхом, був визначений вихідний набір температур для кожної конкретної маслянистої культури. Але, враховуючи індивідуальні особливості БПТА, цей набір повинен коректуватися для збільшення ККД у ході ведення технологічного процесу. Цю задачу і повинна вирішити адаптивна система управління.

Підвищення температур зон приводить до збільшення цільової функції. Однак після досягнення температури корисного продукту

$$T_M \approx 120 \text{ } ^\circ\text{C},$$

подальше збільшення температури зон приводить до суттєвого погіршення якості цього продукту. Маслянистість являється опорним параметром при визначенні максимально можливого ККД, його значення завжди у середньому на 8-10% нижче маслянистості сировини. Тому знання вихідної маслянистості дозволяє оцінити максимальний рівень цільової функції. Суттєвий вплив на цільову функцію здійснює і вологість сировини  $W_C$ . Підтримання вологості сировини на рівні 7-9%, як виявили дослідження, сприяє максимальному виходу корисного продукту.

Велика кількість зовнішніх подразнень, впливаючих на БПТА, передбачає безальтернативне використання адаптивної СУ. Реалізацію адаптивного управління доцільно виконати, використовуючи двохрівневу САУ з координатором на верхньому рівні та локальними регуляторами на нижньому. В задачу координатора входить сприймання інформації про поточне значення ККД, визначення і виставлення уставок на локальні регулятори. Задачею локальних регуляторів являється стабілізація управляємих факторів на нових рівнях, у відповідності з уставками координатора.

Розглядаємих БПТА являється тепловим об'єктом. Тому процес управління доцільно здійснити шляхом зміни температур зон. Знаходження оптимального набору температур зон

дозволяє зменшити вплив зовнішніх подразнень. Що стосується вологості сировини, то практичний досвід показав - для підтримання значення оптимальної вологості достатньо використовувати вимірювальний пристрій вологості. При цьому контур управління вологості замкнений через оператора.

Викладений вище матеріал отриманий у ході експериментального дослідження БПТА і являється вихідним. Для задоволення мети дисертаційної роботи необхідно поставити та вирішити ряд задач (задачі представлені у розділі “Загальна характеристика роботи”). Вирішення всіх задач повинно бути підпорядковане критеріям простоти, дешевизни, надійності тощо, які узгоджуються з сучасними вимогами у промисловості.

У **другому розділі** синтезовані статична теплофізична модель БПТА та модель обчислювача цільової функції (1), отримана динамічна модель БПТА.

Вихідними положеннями для синтезу статичної теплофізичної моделі БПТА являються:

1. Механічне переміщення сировини в БПТА у вертикальній площині таке, що її можна вважати однорідною в цій площині. Це свідчить про можливість використання одномірної теплофізичної моделі.

2. В процесі руху сировини вздовж БПТА відбувається виділення тепла завдяки фізико-хімічним реакціям. По апіорним даним це тепло складає фіксовану частину загального тепла. Припускається, що внутрішні джерела тепла рівномірно розповсюджені по довжині БПТА.

3. В силу малого теплового опору оболонок зон тепло від нагрівачів, в зонах нагріву, проходить через оболонку до сировини без втрат. Тепловий потік в зеєрних зонах направлений від сировини в навколишню середу. При цьому втрати тепла в зеєрних зонах пропорційні кількості корисного продукту, що виводиться з БПТА.

При синтезі теплофізичної моделі використовується розрахункова схема БПТА, яка представлена на рис.2.

Рис.2. Розрахункова схема БПТА

В якості вихідних рівнянь для синтезу використані рівняння теплопровідності:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 c_1 u \frac{dT}{dx} &= \frac{qP}{V_1} + \frac{qQ}{V} - \lambda_1 \frac{d^2T}{dx^2}, & 0 \leq x < x_1, \\ \rho_2 c_2 u \frac{dT}{dx} &= \frac{qP}{V_1} + \frac{qQ}{V} - \lambda_2 \frac{d^2T}{dx^2}, & x_1 \leq x < x_2, \\ \beta_1 \rho_3 c_3 u &= \frac{\beta_1 qQ}{V} - \frac{\alpha T S q}{V_2} - \lambda_3 \frac{d^2T}{dx^2}, & x_2 \leq x < x_3, \\ \beta_1 \rho_4 c_4 u \frac{dT}{dx} &= \frac{qP}{V_1} + \frac{qQ \beta_1}{V} - \lambda_4 \frac{d^2T}{dx^2}, & x_3 \leq x < x_4, \\ \beta_2 \rho_5 c_5 u &= \frac{\beta_2 qQ}{V} - \frac{\alpha T S q}{V_2} - \lambda_5 \frac{d^2T}{dx^2}, & x_4 \leq x < x_5 \end{aligned} \right\}$$

де  $\rho_1, \dots, \rho_5$ —густина сировини в відповідних зонах,  $c_1, \dots, c_5$ —теплоємність сировини в відповідних зонах,  $u$ —швидкість руху сировини,  $P$ —потужність нагрівачів,  $Q$ —потужність внутрішнього тепловиділення,  $s_1, \dots, s_5$ —теплопровідність в зонах,  $T$ —температура сировини,  $S$ —площа зон, крізь які відбувається виведення корисного продукту,  $V_1, V_2$ —об'єм зон,  $V$ —об'єм об'єкту,  $q$ —коефіцієнт Джоуля-Ленца,  $\beta_1, \beta_2$ —коефіцієнти, які враховують кількість сировини, що переходить в наступну зону.

Сама теплофізична модель БПТА (результат синтезу) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{qP}{Mc_1} + \frac{qQ\delta_1}{Mc_1}, \\ T_2 &= T_1 + \frac{qP}{Mc_2} + \frac{qQ\delta_1}{Mc_2}, \\ T_3 &= T_2 \exp\left(-\frac{\alpha qS}{\beta_1 Mc_3}\right) + \frac{qQ\delta_2}{Mc_3}, \\ T_4 &= T_3 + \frac{qP}{\beta_1 Mc_4} + \frac{qQ\delta_1}{Mc_4}, \\ T_5 &= T_4 \exp\left(-\frac{\alpha qS}{\beta_2 Mc_5}\right) + \frac{qQ\delta_2}{Mc_5} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$ —температури об'єкту в точках  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  (див. рис.2) відповідно,  $\delta_1 = \frac{1}{1}$ ,

$$\delta_2 = \frac{l_2}{1}.$$

7

Синтезована теплофізична модель (2) може бути представлена у вигляді:



$$\begin{cases} T_1 = A_1 + B_1, \\ T_2 = T_1 + A_2 + B_2, \\ T_3 = T_2 \exp\left(-\frac{A_3}{\beta_1}\right) + B_3, \\ T_4 = T_3 + A_4 + B_4, \\ T_5 = T_4 \exp\left(-\frac{A_5}{\beta_2}\right). \end{cases} \quad (3)$$

Коефіцієнти  $A_1, A_2, \dots, A_5, B_1, B_2, \dots, B_5$  в (3) інтегрально відображають властивості сировини (маслянистість, вологість, засмітченність, дисперсність, тип (насіння соняшника, соя, рапс, бавовна тощо)), індивідуальні особливості обладнання, умови експлуатації. Зміна названих вище параметрів приводить до зміни коефіцієнтів  $A_i, B_i$ .

Адекватність моделі (3) реальному об'єкту була перевірена експериментально при застосуванні двохстороннього t-критерію для простої гіпотези.

Безперечним надбанням моделі (3) являється можливість виразу цільової функції в явному вигляді:

$$\eta = 1 - \frac{A_5}{\ln\left(\frac{T_3 + \frac{A_4 + B_4}{\beta_1}}{T_5 - B_5}\right)}, \quad (4)$$

$$\text{де } \beta_1 = \frac{A_3}{\ln\left(\frac{T_2}{T_3 - B_3}\right)}$$

Вираз (4) відображає функціональну залежність:

$$\eta = f(T_2, T_3, T_5, A_i, B_i),$$

і являється обчислювачем ККД БПТА. Знання коефіцієнтів  $A_i, B_i$  та вимір температур  $T_2, T_3, T_5$  зон дозволяє обчислити значення цільової функції. Крім того, модель обчислювача дозволяє змоделювати та дослідити теоретично процес ККД у часі -  $\eta(t)$ .

Статична модель (2) не відображає динаміку поведінки температур зон, а також не враховує розподілений характер БПТА. Враховуючи сказане, було прийняте рішення доповнити цю модель динамічною моделлю, з метою виявлення динамічних властивостей об'єкту. В даному випадку розподілена температурна система апроксимована зосередженою, з виявленням функцій взаємного впливу (рис.3). Функції  $W_{11}, W_{22}, W_{44}$  визначають передачу діянь з боку локальних регуляторів температури на БПТА з фіксацією температур  $T_1, T_2, T_4$ , функції  $W_{21}, W_{41}, W_{42}, W_{12}, W_{24}, W_{14}$  відображають перехресний вплив.

Шляхом динамічної ідентифікації визначались структура та кількісні значення параметрів основних передаточних функцій, а також функцій їх взаємного впливу. Виходячи з прийнятого класу моделей, а також з аналізу фізичної природи об'єкту було прийнято рішення про використання метода ідентифікації по перехідним характеристикам.

Рис.3. Динамічна модель БПТА

Виявлені особливості динамічної моделі головним чином полягають в наступному:

-зосереджені канали моделі в частині об'єкту описуються передаточними функціями вигляду:

$$W(p) = \frac{k_{\Pi} \exp(-\tau p)}{(T_{B1}p + 1)(T_{B2}p + 1)}, \quad (5)$$

в яких і запізнення  $\tau$ , і обидві постійні часу  $T_{B1}$ ,  $T_{B2}$  не можуть рахуватись зневажливо малими, тобто являються величинами одного порядку,  $k_{\Pi}$ -коефіцієнт передачі.

-взаємні зв'язки в моделі з достатньою для інженерних задач точністю, також описуються передаточними функціями з структурою (5), однак отримана в роботі матриця Бристоля показала, що в середньому цими зв'язками можна знехтувати.

**В третьому розділі** досліджені властивості моделі обчислювача.

Модель обчислювача, по-перше, дозволяє змоделювати та вивчити поведінку БПТА, а по друге - можлива безпосередня участь в управлінні. Для дослідження моделі обчислювача БПТА вивчена поведінка температур зон, для чого проведений параметричний синтез локальних регуляторів температури, змодельований процес зміни ККД в часі і вивчені його ймовірнісні характеристики, розроблена класифікація стану БПТА в просторі інформаційних ознак.

З концептуальних позицій даної роботи задача вибору регулятора може бути зформульована, як альтернатива: самий простий, дешевий і надійний регулятор з великими власними подразненнями (по типу релейного) або достатньо складний, дорогий і потенційно ненадійний регулятор з малими власними подразненнями.

В даній роботі вибраний перший шлях, виходячи з наступних міркувань:

-загальна концепція дисертаційної роботи орієнтована на мінімальну складність і вартість апаратури та її максимальну надійність,

-проблеми оцінювання та фільтрації подразнень, породжених локальними регуляторами, можуть бути і повинні бути вирішені на рівні координатора, де все одно простими технічними засобами обійтись неможливо, і мова йде про додаткові функції координатора. Таким чином, в структурному відношенні простий та потенційно самий надійний релейний регулятор вибраний за основу для подальших досліджень.

Результати параметричного синтезу дали наступні співвідношення для амплітуди  $A_M$  та періоду автоколивань  $Q_{BP}$ , які представлені в відносному вигляді:

$$\frac{Q_{BP}}{\tau} = 2 \left[ 1 + \sqrt{2 \frac{T_{B1} T_{B2}}{\tau^2} \left( \frac{2\Delta_{\Pi}}{k_{\Pi} U_1} + \frac{T_{B1} \exp(-\tau/T_{B1}) - T_{B2} \exp(-\tau/T_{B2})}{T_{B2} - T_{B1}} + 1 \right)} \right],$$

$$\frac{A_M}{U_1} = \frac{\Delta_{\Pi}}{U_1} + k_{\Pi} \left( 1 + \frac{T_{B1} \exp(-\tau/T_{B1}) - T_{B2} \exp(-\tau/T_{B2})}{T_{B2} - T_{B1}} \right),$$

де  $\Delta_{\Pi}$ -поріг зони нечутливості регулятора,  $U_1$ -амплітуда вхідного сигналу.

Апроксимація автоколивань, породжуваних релейним характером регулювання, першою гармонікою довела, що для інженерних задач така заміна можлива. Т.ч. в відповідності з динамічною моделлю принята наступна структура сигналів в температурних каналах (наявність перехресних впливів зумовлена вибором регулятора):

$$\begin{cases} T_1 = T_{11} + \Delta T_{\text{ш1}} + \Delta T_{11} \sin\left(\frac{2\pi}{Q_{BP11}} t + \varphi_1\right) + \Delta T_{12} \sin\left(\frac{2\pi}{Q_{BP12}} t + \varphi_2\right), \\ T_2 = T_{22} + \Delta T_{\text{ш2}} + \Delta T_{22} \sin\left(\frac{2\pi}{Q_{BP22}} t + \varphi_2\right) + \Delta T_{21} \sin\left(\frac{2\pi}{Q_{BP21}} t + \varphi_1\right) + T_{24} \sin\left(\frac{2\pi}{Q_{BP24}} t + \varphi_4\right), \\ T_4 = T_{44} + \Delta T_{\text{ш4}} + \Delta T_{44} \sin\left(\frac{2\pi}{Q_{BP44}} t + \varphi_4\right) + \Delta T_{41} \sin\left(\frac{2\pi}{Q_{BP41}} t + \varphi_1\right) + T_{42} \sin\left(\frac{2\pi}{Q_{BP42}} t + \varphi_2\right). \end{cases} \quad (6)$$

де  $T_{11}, T_{22}, T_{44}$ -постійна складова температур зон,

$\Delta T_{\text{ш1}}, \Delta T_{\text{ш2}}, \Delta T_{\text{ш4}}$ -нормально розподілена перешкода,

$\Delta T_{11}, \Delta T_{22}, \Delta T_{44}, Q_{BP11}, Q_{BP22}, Q_{BP44}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_4$ -амплітуда, період і фаза моногармонічної компоненти,

$\Delta Q_{BP12}, Q_{BP24}, Q_{BP21}, Q_{BP41}, Q_{BP42}, \Delta T_{12}, \Delta T_{24}, \Delta T_{21}, \Delta T_{41}, \Delta T_{42}$ -параметри гармонічної компоненти, викликані перехресними зв'язками в моделі.

Результати моделювання процесу  $\eta(t)$  на основі (6), як і результати експериментальних даних на виборці з 32 БПТА показали функціональну залежність між оцінкою середнього значення ККД та відносною оцінкою його СКВ  $\sigma_{\eta} \left( \frac{\sigma}{\bar{\eta}} \right)$  у вигляді:

$$\sigma_{\eta} = \frac{\bar{X}}{\bar{\eta}}, \quad (7)$$

де  $\bar{X}$  оцінка середнього значення добутку  $\sigma_{\eta}$  и  $\bar{X} = \text{const}$ .

Співвідношення (7) дало змогу прокласифікувати, в статистичному сенсі, стан БПТА:

- $A_C$ —область оптимального функціонування, ширина якої визначається похибкою оцінки значення СКВ. ККД може бути змінений в сторону його збільшення, якщо при цьому значення  $\sigma_{\eta}$  залишиться в області  $A_C$ ,

- $B_C$ —область функціонування з ККД меншим, ніж максимально можливий. ККД може бути змінений в сторону збільшення, доки  $\sigma_{\eta}$  не попаде в область  $A_C$ ,

- $C_C$ —область ненормального функціонування. Модель обчислювача необхідно корегувати.

**Четвертий розділ** присвячений структурно-алгоритмічним аспектам координації верхнього рівня ієрархії СУ БПТА.

Експериментальне дослідження поведінки цільової функції і подальша обробка отриманих даних в програмній середі EXCEL показала:

-процес  $\eta(t)$  являється нестационарним (квазіперіодичним), що не дає можливості швидкої оцінки рівня цільової функції за допомогою витратоміра по вихідному фізичному сигналу ККД. Середньостатистичний проміжок часу отримання ефективних значень цільової функції витратоміром оцінюється в 12-15 хвилин,

-швидкість оцінки цільової функції за допомогою моделі обчислювача, при зміні реального ККД, в 2-3 рази перевищує швидкість отримання ефективних значень за допомогою витратоміра,

-часові співвідношення з впливу температур активних зон на цільову функцію розподілені наступним чином:

$$t_1 > t_2 > t_4,$$

де  $t_1$ - час, протягом якого, зміна температури  $T_1$  приводить до зміни значення цільової функції,

$t_2$ - час, протягом якого, зміна температури  $T_2$  приводить до зміни значення цільової функції,

$t_4$ - час, протягом якого, зміна температури  $T_4$  приводить до зміни значення цільової функції,

-залежність максимально можливого рівня ККД від величини маслянистості сировини  $M_C$  описується співвідношенням:

$$\bar{\eta}_{\max} \approx 0.8M_C + 0.3,$$

-залежність максимально можливого рівня ККД від величини вологості сировини  $W_C$  описується співвідношенням:

$$\bar{n}_{\max} \approx \begin{cases} 0.6W_c + 34.5, & \text{при } W_c \leq 8\%, \\ -2.0W_c + 53.6, & \text{при } W_c > 8\%. \end{cases}$$

Перші три висновки допомогли синтезувати структуру СУ БПТА (рис.4), два наступні – розробити алгоритмічне забезпечення.

Блок задачі, отримавши інформацію про тип сировини, маслянистості та вологості оцінює максимально можливе значення ККД, що поступає на регулятори внутрішнього  $R_1$  і проміжного  $R_2$  контурів управління СУ БПТА. Регулятор  $R_1$  працює від модельних оцінок ККД і управляє температурами ЗН2 та ЗН3, регулятор  $R_2$  працює від фізичних оцінок ККД і управляє температурою ЗН1. В динамічному відношенні, зміна реального значення цільової функції приводить до швидкого, але грубого управління ККД регулятором  $R_1$ , а потім повільного, але точного управління регулятором  $R_2$ . Швидкість управління БПТА являється визначаючим параметром, через специфіку ведення технологічного процесу розглядаємим агрегатом. Кінцевим результатом управління являється виведення реального значення ККД на розрахований теоретичний рівень та підтримання його на цьому рівні.

Ідентифікація параметрів моделі здійснюється шляхом переходу в малому з точки 1 температурного простору в точку 2 по температурам  $T_2$  та  $T_4$  з фіксацією температур  $T_2, T_3, T_4, T_5$ , та коефіцієнтів  $\beta_1, \beta_2$ . Теоретично, крок по вказаним температурам повинен бути на стільки малим, щоб значення коефіцієнтів  $A_i, B_i$  лишались незмінними. При цьому невідомі коефіцієнти моделі (4) визначаються так:

$$A_3 = \frac{T_{31} - T_{32} - T_{21} + T_{22}}{\frac{T_{22} - T_{21}}{\beta_{12} - \beta_{11}}}, \quad B_3 = T_{32} - T_{22} + T_{22} \frac{A_3}{\beta_{12}}, \quad (8)$$

$$A_4 = \frac{T_{41} - T_{42} - T_{31} + T_{32}}{\frac{1}{\beta_{11}} - \frac{1}{\beta_{12}}}, \quad B_4 = T_{41} - T_{31} - \frac{A_4}{\beta_{11}}, \quad (9)$$

$$A_5 = \frac{T_{51} - T_{52} - T_{41} + T_{42}}{\frac{T_{42} - T_{41}}{\beta_{22} - \beta_{21}}}, \quad B_5 = T_{52} - T_{42} + T_{42} \frac{A_5}{\beta_{22}}, \quad (10)$$

Рис. 4. Струк<sup>13</sup> даптивної СУ БПТА

де другі індекси при коефіцієнтах визначають належність до певної точки температурного простору (1 або 2).

Відповідно зі структурою адаптивної СУ (рис.4) процес ідентифікації проходить на кожному кроці прийому поточного значення фізичного ККД. В якості кроку в малому використовується автоколивання температур ЗН.

Алгоритм роботи  $R_1$  являється найбільш цікавим, його зображення, у вигляді блок-схеми, представлений на рис.5. Прикордонні значення  $\sigma_B$ ,  $\sigma_H$  визначаються по формулам:

$$\sigma_B = \frac{\bar{X}}{\bar{\eta}^*} + S_{\eta} \sqrt{\frac{N_{\text{опт}} - 1}{\chi_{\gamma}^2}}, \quad \sigma_H = \frac{\bar{X}}{\bar{\eta}^*} - S_{\eta} \sqrt{\frac{N_{\text{опт}} - 1}{\chi_{1-\gamma}^2}},$$

$$S_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{опт}} - 1} \sum_{i=1}^{N_{\text{опт}}} (\eta_i - \bar{\eta}^*)^2}.$$

Вибір напрямку зміни температурних показників активних зон ( $T_2$ ,  $T_4$ ) визначається знаком перших похідних від моделі (4) по відповідному аргументу. Величина приросту визначається експериментально.

**П'ятий розділ** присвячений синтезу та реалізації засобів управління, необхідних для нормального функціонування розробленої СУ, а також відображенню використання результатів дисертаційної роботи в промисловості.

Як наслідок з попередніх розділів, для реалізації розробленої СУ БПТА необхідні достатньо добре вивчені та широко використовуємі засоби:

- локальні релейні регулятори, реалізуючі нижній рівень ієрархічної системи,
- цифрові температурні канали, необхідні для індикації температурних режимів окремих зон і для вводу цифрових еквівалентів температур в координатор верхнього рівня ієрархії,
- мікроконтролер, необхідний для виконання основних функцій управління на верхньому рівні ієрархії (розрахунки по алгоритмам обчислення, прийняття рішень про адаптацію, організація руху до потрібного рівня цільової функції, виконання блокуючих, захисних, діагностичних і т.д. функцій),
- пускова апаратура,
- вторинні джерела живлення.

В зв'язку з цим автором на протязі 1995-2000 років виконаний ряд робіт, які можна розділити на слідуєчі напрямки:

1. Розробка каналів вимірювання температури в прес-екструдерах ЕК-75/1200, методик регулювання цих каналів, а також використанн<sub>14</sub> цих методик для серійного виробництва БПТА вказаного типу.

Робота по цьому напрямку була покликана вирішити наступні задачі:

- експериментальна перевірка методики оптимального синтезу вимірювальних перетворювачів температури,
- створення на основі розробленої методики серійних аналогових та цифрових вимірювальних каналів для БПТА,
- доведення методики до рівня технологічних інструкцій і їх використання при серійному виробництві прес-екструдерів ЕК-75/1200.

Рис.5. Алл<sup>15</sup> роботи R<sub>1</sub>

2. Розробка, визначення технічного рівня, метрологічна атестація вологометричних пристроїв та запровадження цих пристроїв в олієдобувній, макаронній та борошномлинній галузях промисловості.

Робота по цьому напрямку була покликана вирішити наступні задачі:

- експериментальна перевірка модельних функцій з ціллю визначення реальних функцій чутливості, похибки за рахунок нелінійності, впливу дестабілізуючих факторів,
- створення серійних вологомірів сиплячих матеріалів - аналогового ВАП-1 і цифрового мікропроцесорного ВЦЛ-11 та патентування основних технічних рішень,
- розробка та запровадження методик використання вологомірів ВАП-1 і ВЦЛ-11 для управління БПТА в олієдобувній, макаронній і борошномлинній промисловостях.



### 3. Розробка і випробування експериментального зразка двохрівневої адаптивної СУ БПТА.

Робота по цьому напрямку була покликана вирішити наступні задачі:

- перевірка принципової працездатності двохрівневої структури БПТА і її алгоритмів (обчислення, прийняття рішень про адаптацію, обробки вимірювальної інформації тощо),
- ідентифікація власних подразнень двохрівневої СУ і верифікація на цій основі оцінок і розроблених моделей,
- оцінювання ефективності запропонованих алгоритмів та засобів.

Результати дисертаційної роботи запроваджені в серійне виробництво на НВП “Екструдер” (м.Харків), ТОВ “Сигма” (м.Харків), “Інженерна група ТФК” (м.Харків).

## ВИСНОВКИ

Аналіз стану наукової задачі синтезу адаптивної СУ показав, що існуючі підходи і методи ще не вичерпали всіх своїх можливостей, але їх подальший розвиток та удосконалення пов’язане з пошуком і дослідженням принципово нових шляхів.

1. В дисертації представлено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі синтезу адаптивної СУ з метою підвищення ефективності роботи БПТА з розділенням фракцій продукту.

2. Найбільш важливими науковими і практичними результатами, які отримані в дисертаційній роботі, являються:

- синтезовані статична теплофізична а також лінійна динамічна моделі об’єкту, доведена їх адекватність,
- аналітично вирішена задача визначення і апроксимації власних подразнень, зумовлених наявністю релейного елемента в контурі регулювання,<sup>16</sup>
- синтезована структура обчислювача цільової функції СУ БПТА,
- запропонований і досліджений оригінальний алгоритм роботи координатора адаптивної СУ, оснований на оцінюванні математичного сподівання та СКВ процесу зміни ККД в часі,
- запропонований метод підвищення точності адаптивної СУ БПТА на основі аналізу і компенсації власних аддитивних похибок внутрішніх контурів,
- розроблена і запроваджена в серійне виробництво методика багатопараметричної оптимізації вимірювальних перетворювачів температури,
- розроблені, запатентовані і запроваджені в серійне виробництво електромагнітні вимірювальні перетворювачі вологості сиплячих матеріалів, проведена їх метрологічна атестація,

-створений експериментальний зразок адаптивної СУ, випробування якого у виробничих умовах довели правильність теоретичних результатів і ефективність рішень, прийнятих у дисертаційній роботі.

3. Значення вирішеної в дисертації задачі для науки і практики заключається в подальшому розвитку теоретичних і прикладних основ теорії автоматичного управління, а саме – в розробці структурного і алгоритмічного забезпечення адаптивної СУ БПТА.

4. Методи досліджень базуються на використанні теорії автоматичного управління, теорії ймовірності, теорії ідентифікації, теорії вимірювань, теорії статистичної обробки інформації.

5. Достовірність отриманих результатів підтверджується практичними випробуваннями у виробничих умовах розробленої адаптивної СУ.

6. Наукові та прикладні результати, які отримані в дисертації, доцільно використовувати в різноманітних галузях вітчизняного господарства при вирішенні задач автоматизації технологічних процесів.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мигущенко Р.П. Оценка характеристик полупроводниковых датчиков температуры с линеаризующими двухполюсниками // Вісник ХДПУ. - Вип.12. - 1998. - С.136-139.

2. Овчаренко О.І., Мигущенко Р.П. Методика идентификации тепловых процессов в пресс-экструдерах масличных культур // Вісник ХДПУ. - Вип.18. - 1998. - С.87-91.

3. Мигущенко Р.П., Овчаренко О.І. Исследование модели электромагнитного преобразователя влажности сыпучих материалов // Український метрологічний журнал. - 1999. – Вип.2, - С. 27-31.

4. Щапов П.Ф., Овчаренко О.І., Мигущенко Р.П. Оценка метрологических характеристик электромагнитного преобразователя влажности // Український метрологічний журнал. - 1999. – Вип.3, - С. 31-34.

5. Мигущенко Р.П. Алгоритм координации в адаптивных системах управления многозонными проходными технологическими агрегатами // Вісник ХДПУ. - Вип.106. - 2000. - С.26-29.

#### АНОТАЦІЇ

Мигущенко Р.П. Адаптивна система управління багатозонними прохідними технологічними агрегатами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2001р.

Дисертація присвячена розробці адаптивної системи управління БПТА з розділенням фракцій продукту в ході ведення технологічного процесу, яка забезпечує досягнення і підтримання максимально можливого рівня цільової функції. В роботі синтезована статична теплофізична модель БПТА, отримані динамічна модель та модель обчислювача ККД, представлена класифікація стану БПТА у просторі двох інформаційних ознак: середнього значення ККД та СКВ процесу зміни ККД в часі, розроблена структура системи управління, розроблений алгоритм функціонування координатора, розроблені вимірювальні перетворювачі температури та вологості, необхідні засоби для ефективної роботи БПТА.

Ключові слова: багатозонний прохідний технологічний агрегат, модель, цільова функція, система управління, температура, вологість, алгоритм управління.

Мигущенко Р.П. Адаптивная система управления многозонными проходными технологическими агрегатами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2001г.

Диссертация посвящена разработке адаптивной СУ МПТА с разделением фракций продукта в ходе ведения технологического процесса, повышающей эффективность работы указанного МПТА. В качестве целевой функции выбран КПД, определяемый как отношение массы полезного продукта в единицу времени к массе загруженного сырья за то же время. Критерий управления – максимизация КПД.

При разработке СУ были экспериментально исследованы технические характеристики рассматриваемого МПТА, определены информационная, разработаны статическая теплофизическая и линейная динамическая модели агрегата, доказана их адекватность реальному объекту, синтезирована модель вычислителя.

Классификация внешних возмущений позволила определить доминирующие возмущения во время ведения технологического процесса МПТА. Доминирующими являются температуры зон агрегата, маслячность и влажность сырья. Увеличение температур зон МПТА способствует увеличению целевой функции, однако, увеличение температуры свыше 120°C приводит к резкому ухудшению качества полезного продукта. Маслячность сырья является опорным параметром при оценке максимально возможного уровня КПД. Максимально возможное значение КПД всегда на 8-10% ниже маслячности. Максимальный уровень КПД достигается при значении влажности сырья 7-9%.

В качестве исходных уравнений при разработке статической теплофизической модели объекта использованы уравнения теплопроводности. Этими уравнениями описывается состояние температур в каждой зоне МПТА. Решение уравнений теплопроводности позволило получить теплофизическую модель. Модель вычислителя МПТА определена из теплофизической модели путем выражения целевой функции в явном виде. Линейная динамическая модель получена путем идентификации по переходным характеристикам. При этом сам объект являющийся распределенным был заменен объектом с сосредоточенными параметрами с учетом перекрестных влияний. На основе динамической модели была разработана модель информационных температурных сигналов МПТА.

Наличие модели вычислителя и модели температурных сигналов МПТА позволили провести имитационное моделирование и определить характер изменения целевой функции во времени. Полученная реализация изменения КПД во времени дала возможность определить вероятностные свойства процесса  $\eta(t)$ . Наиболее важными среди них является регрессионная зависимость среднего значения КПД на СКО процесса и вид автокорреляционной функции. Регрессионная зависимость позволила проклассифицировать состояние МПТА в пространстве двух информационных признаков: КПД и СКО процесса. Были выделены три области состояния МПТА.  $A_C$  – область нормального функционирования (КПД максимально возможный, его изменение не требуется),  $B_C$  – область заниженного значения КПД (необходимо принять меры к увеличению целевой функции),  $C_C$  – область ненормального функционирования (полезный продукт неудовлетворительного качества, КПД необходимо уменьшить). Автокорреляционная функция позволила минимизировать число отсчетов модельных оценок КПД.

Экспериментальные исследования процесса изменения целевой функции подтвердили результаты имитационного моделирования.  $B_{C19}$  вопрос о возможности введения вычислителя непосредственно в контур управления. Однако, при практическом использовании адаптивной СУ ведение процесса управления МПТА лишь по модельным оценкам может привести к аварийным ситуациям. Было принято использовать комбинированный метод управления.

В качестве адаптивной СУ использована двухуровневая трехконтурная СУ с координатором на верхнем уровне и локальными регуляторами на нижнем. Внутренний контур – контур локальных регуляторов температуры с релейным исполнительным элементом, промежуточный контур замкнут через вычислитель и управляет температурами второй и третьей зон нагрева, внешний контур замкнут через измерительное устройство и управляет температурой первой зоны нагрева.

Входными параметрами СУ являются такие параметры сырья как тип, масличность и влажность, выходным – текущее значение КПД, управления – температуры зон нагрева МПТА,

возмущения – внешние дестабилизирующие факторы обусловленные параметрами сырья, условиями эксплуатации МПТА, конкретными особенностями МПТА.

При уменьшении значения КПД регулятор промежуточного контура (работа по модельным оценкам), определяет это более быстро в сравнении с регулятором внешнего контура, путем управления температурами второй и третьей зон нагрева по разработанному алгоритму находит вектор температур соответствующий максимально возможному значению КПД. Регулятор внешнего контура медленно подбирает значение температуры первой зоны нагрева и корректирует значение реального КПД. Использован принцип подчиненного регулирования. В динамическом отношении регулятор промежуточного контура более быстродействующий но грубый, регулятор внешнего контура медленнодействующий но точный.

В диссертации разработано алгоритмическое обеспечение функционирования блока идентификации, регуляторов промежуточного и внешнего контуров. Работоспособность алгоритмов проверено моделированием на ЭВМ. Моделирование алгоритма управления МПТА производилось с использованием пакета прикладных программ Mathematic 3.0.

Работа над созданием адаптивной СУ была доведена до экспериментального макетного образца, испытания которого в производственных условиях подтвердили эффективность СУ и правильность решений принятых в диссертационной работе. Практическое создание СУ потребовало создания многих технических средств: локальных регуляторов температуры, измерительных преобразователей температуры, влажности, вторичных источников питания и др.

Ключевые слова: многозонный проходной технологический агрегат, модель, целевая функция, система управления, температура, влажность, алгоритм управления.

Miguschenko R.P. Adaptive control system of multizone passing technological units. – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree by speciality 05.13.07 – automation of technological process. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2001.

The subject of the thesis is the development of adaptive control system of multizone passing technological units with product fraction division during the technological process management which ensures achievement and maintaining of target-oriented function maximum possible level. Static thermal model of multizone passing technological units is synthesized, dynamic model and calculator model are obtained, classification of multizone passing technological units state in the space of two informational criteria: mean efficiency and mean square deviation of efficiency time-variation is presented, control system structure is developed, coordinator functioning algorithm is worked out, temperature and humidity

instrument transducers necessary for effective multizone passing technological units operation are designed.

Key words:multizone passing technological unit, model, target-oriented function, control system, temperature, humidity, control algoritm.