

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІВАЩУК ВЯЧЕСЛАВ ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 681.5.013:664

**АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ
КОМПЛЕКСАМИ З ВИРОБНИЦТВА БАГАТОАСОРТИМЕНТНОЇ
ПРОДУКЦІЇ**

05.13.07 «Автоматизація процесів керування»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Ладанюк Анатолій Петрович,
Національний університет харчових технологій,
професор кафедри інтегрованих
автоматизованих систем управління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
завідувач кафедри автоматизації
виробничих процесів

доктор технічних наук, професор
Шворов Сергій Андрійович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
професор кафедри автоматики
та робототехнічних систем
імені академіка І. І. Мартиненка

доктор технічних наук, доцент
Цимбал Олександр Михайлович,
Харківський національний
університет радіоелектроніки,
професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих
технологій, автоматизації та мехатроніки

Захист відбудеться «18» жовтня 2018 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано « » вересня 2018 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток переробної промисловості тісно пов'язаний з попитом на кінцеву продукцію, характеристики якої залежать від вподобань споживачів та мають тенденцію до зміни протягом продуктового циклу. Методи змінювання характеристик продукту, що реалізуються шляхом варіювання рецептів, характеристик сировини та параметрів процесу обробки, формують поняття виробничого асортименту. Таким чином, під багатоасортиментним будемо вважати виробництво, що забезпечує різницю у складі, характеристиках щодо вимог початкової сировини, технологічних рецептурах переробки, масі одиничних виробів для двох або більшої кількості різних продуктів. Кожний крок зі збільшення асортименту продукції молочної, овочепереробної, хлібопекарної галузі передбачає складну довиробничу підготовку технології, а процес його реалізації – технічного переоснащення виробництва, будівництва окремої технологічної лінії. Останнє вимагає значних матеріальних затрат, частка яких стосується розбудови технологічного приміщення, збільшення виробничих площ, що визначає умови розташування такого виробництва та, як наслідок, обмежує доступний виробничий асортимент. Переналаштування технологічних агрегатів на промислових об'єктах призводить до ускладнень систем керування, що не забезпечують виконання необхідних умов стійкості, які відповідають за непередбачене зниження якості продукту та зростання споживаної енергії. Оцінка ідентичності параметрів процесу переробки за зміни режимів обладнання є ускладненою, оскільки за даних обставин об'єкт керування за структурою та режимами роботи часто виявляється нелінійним, із залученими неоднозначними оберненими реакціями. Низька якість керування, за використання лінеаризованих моделей, призводить до додаткових втрат у характеристиках продукції. Для багатоасортиментних технологій виникає потреба у створенні нових методів керування, що базуються на процесах, які властиві характеру їх мінливості, у поєднанні із сучасними підходами до розв'язання оптимізаційних задач, що передбачають підвищення ресурсо- та енергоефективності виробництва в цілому.

Аналіз якості функціонування систем керування виробництвами, що пристосовані до асортиментних продуктів, вказує на відсутність будь-якої комплексної методології, яка здатна забезпечити передбачувану якість технологічних виробництв при змінюваних режимах роботи та характеристиках обробки сировини, на брак методики ефективного використання ресурсів, зокрема енергетичних, у разі зміни асортименту виробництва. При цьому слід відзначити, що класичні методи та технічні засоби підвищення ефективності функціонування, для систем керування гнучкими технологічними виробництвами, потребують подальшого розвитку як у теоретичному, так і практичному плані. Вказані задачі вимагають системного підходу до розв'язання комплексорганізованої діяльності процесів підприємства. Зараз широко застосовуються системи керування, в яких гнучкість виконуваних задач забезпечується шляхом спрощення використовуваних підсистем, застосуванням

паралельних систем. При цьому, додатковим чинником, що ускладнює реалізації багатоасортиментного виробництва, є також зміна функцій оперативного персоналу під час зміни виробничих режимів, задача, розкриття якої потребує подальшого дослідження.

Таким чином, розроблення та практичне застосування методів і моделей управління складними технологічними об'єктами в умовах зміни режимів роботи, характеристик сировини та функцій оперативного персоналу для забезпечення регламентованих характеристик продуктів та підвищення ефективності багатоасортиментного виробництва є актуальною науково-прикладною проблемою, що визначає напрям дослідження дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені у роботі, виконувалися відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України у рамках фундаментальної держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України за темою «Теоретичні основи розробки робастно-оптимальних систем керування складними технологічними об'єктами та комплексами в умовах невизначеності» (номер державної реєстрації 0115U000379) та за планом кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій за темами «Наукові основи створення інтелектуальних систем автоматизації технологічних об'єктів із використанням робастно-оптимальних та енергозбережливих методів» (номер державної реєстрації 0116U001531) та «Наукові основи створення автоматизованих систем управління для комп'ютерно-інтегрованих виробництв харчової промисловості» (номер державної реєстрації 0112U001496), де здобувач був виконавцем.

Мета та завдання дослідження. Мета дисертації – підвищення ефективності багатоасортиментного виробництва харчових продуктів із формалізацією та практичним застосуванням методів та моделей керування складними технологічними об'єктами в умовах зміни режимів роботи, характеристик сировини та функцій оперативного персоналу для забезпечення регламентованих характеристик продуктів.

Для досягнення визначеної мети необхідно було розв'язати наступні завдання дослідження:

– виконати системотехнічний аналіз особливостей конструкції, режимів роботи типових технологічних виробництв харчової галузі, а також розповсюджених у практиці проектування методів створення систем керування багатоасортиментними виробництвами;

– здійснити аналіз оцінювання ефективної для функціонально-орієнтованих форм гнучкості виробничого комплексу, для задачі розширення асортименту та розміру інвестицій на її забезпечення в умовах технологічного виробництва, що існує;

– здійснити аналіз та забезпечити довизначення траєкторії керування для розв'язання задачі супроводження об'єктів із частковою невизначеністю, забезпечення динамічної точності відтворення процесів технологічного комплексу;

– розробити математичні моделі типових технологічних процесів для комплексів, які передбачають можливість багатоасортиментного виробництва, що відтворюють статичні та динамічні характеристики об'єкта, визначити умови, що забезпечують адекватну форму гнучкості для технологічного комплексу;

– здійснити аналіз та вдосконалити метод керування із забезпеченням задачі виконання крайових умов для показників мінімізації динамічної похибки та швидкодії керування в системах автоматизації з обмеженими ресурсами, з вимогою підвищення ефективності технологічних процесів;

– обґрунтувати критерій оптимізації керування щодо енергозбереження, обмеження на його реалізацію та фазові координати; здійснити аналіз залежності величини енергетичних втрат для типової технологічної системи з оцінкою його ефективності, для визначення множини напрямів щодо енергоефективних дій із керування;

– розробити структури керування, що реалізують розширення меж зміни характеристик, дозволяють зменшити час перехідного процесу та втрати продуктів для типових технологічних агрегатів, під час зміни режиму керування багатоасортиментним виробництвом;

– розв'язати задачу постачання ресурсів для зміни плану виробництва, зменшення втрат складського забезпечення та витрат за планом постачання;

– здійснити довизначення функцій оперативного персоналу під час зміни режимів роботи технологічних комплексів, що призначені для багатоасортиментного виробництва та розробити систему підтримки прийняття рішень, для локалізації задачі операторів багатоасортиментних виробництв та зменшення кількості помилкових виробничих рішень;

– здійснити аналіз та забезпечити дослідження стійкості гібридних систем керування для багатопараметричних режимів динамічних об'єктів із диференційованими характеристиками динаміки каналів керування.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси та виробництва харчової галузі, що пристосовані до виготовлення асортименту продуктів, показники їх функціонування.

Предмет дослідження – математичні моделі, структури, характеристики керування технологічними процесами та виробничими комплексами; умови, характеристики забезпечення оптимізації ресурсо- та енергоефективності під час реалізації багатоасортиментної задачі.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань використовувались: методи сучасної теорії автоматичного керування, елементи теорії оптимального керування – для обґрунтування методики енергоефективного керування та умов забезпечення стійкості; матричний аналіз, функціональний аналіз – для розроблення математичних моделей; теорія сингулярних розкладань та імітаційне моделювання – для отримання ефективної рекурсії моделей; методи багатокритеріального аналізу, теорія ігор – для забезпечення задач оптимізації технологічних процесів; методи ситуаційного керування, когнітивного моделювання – для розроблення системи супроводження задач оперативного керування; системний аналіз – для

довизначення функцій оперативного персоналу; методи прикладного програмування – для розроблення алгоритмів.

Наукова новизна одержаних результатів. Винесені на захист наукові результати є теоретичною основою для розв'язання важливої науково-прикладної проблеми розроблення та практичного застосування методів і моделей управління складними технологічними об'єктами в умовах зміни режимів роботи, характеристик сировини та функцій оперативного персоналу для забезпечення регламентованих характеристик продуктів та підвищення ефективності багатоасортиментного виробництва. Основний науковий результат роботи полягає у розробленні та практичному застосуванні методів і моделей керування складними технологічними об'єктами.

Основні наукові положення, що визначають наукову новизну роботи, полягають у наступному:

вперше розроблено:

– метод визначення ефективної для функціонально-орієнтованих форм гнучкості виробничого комплексу з оцінкою ефективності за прибутком, що дозволяє встановити відповідність між асортиментом як прибуток, який отримано від його розширення за виключенням витрат для налаштування необхідних змін в умовах єдиної технологічної лінії;

– математичні моделі типових технологічних процесів з гібридною будовою розривного типу для комплексів, які передбачають можливість багатоасортиментного виробництва та не порушують умов адекватності статичних та динамічних характеристик для оцінки ефективного керування в умовах багатоасортиментного виробництва;

– метод динамічно обмеженої реалізації керування на основі обернених задач динаміки зі стратегією диференціальної гри для мінімізації ризику за Севіджем, що поєднує задачі виконання крайових умов для показників мінімізації динамічної похибки та швидкодії керування в системах автоматизації з обмеженими ресурсами;

– модель оновлення ресурсів для багатоасортиментного виробництва, що враховує сталі часу на їх залучення, динамікою споживання та оцінкою кількості запитів на постачання;

– метод підтримки прийняття рішень людини-оператора із врахуванням ситуаційного підходу та динаміки когнітивного сприйняття, де видалення із множини оцінюваних альтернативних ситуацій зменшує кількість помилкових рішень, дозволяє виключити наявність ситуацій глухого кута під час багатоасортиментного виробництва;

вдосконалено:

– метод довизначення траєкторії керування для моделей із горизонтом прогнозу, що відступає, який відрізняється, від практично застосовуваних, здатністю до непрямих оцінок стану, адаптацією за приростом помилки та керувальної дії на черговому кроці та забезпечує підвищення їх точності для процесів технологічного комплексу під час перехідного режиму;

– метод оптимізації гібридних моделей із залученням концепції визначення масштабів неперервної поведінки та значень інваріантів, який, на

відміну від використовуваних, відрізняється інформаційною надлишковістю через відтворення паралельних потоків подій та умовами зміни їх стану, що зменшує жорсткість та розв'язує задачу «блукання» системи автоматизації під час зміни режиму керування багатоасортиментним виробництвом;

– метод оцінки стійкості для гібридних систем керування, який, на відміну від відомих, враховує фазу дискретного довизначення використанням полігональних карт та спрощує умови аналізу динамічної поведінки частковими оцінками функцій Ляпунова, що дозволяє ефективно визначити стійкість для поєднання диференціальних та дискретних частин моделі в єдиній системі керування.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено математичні моделі типових технологічних процесів для комплексів з гібридною будовою розривного типу, що забезпечують підвищення динамічної точності на 12,3 % та стійкість керування в умовах багатоасортиментного виробництва і можуть поширюватися на інші галузі промислового виробництва, які мають аналогічне функціональне призначення для динамічних об'єктів із диференційованими характеристиками динаміки каналів керування.

Вдосконалено метод довизначення траєкторії керування для моделей із горизонтом прогнозу, що відступає, який забезпечує підвищення точності системи автоматизації для процесів технологічного комплексу на 4 % під час зміни асортименту виробництва.

Обґрунтовано критерій оптимізації керування щодо енергозбереження, що дозволяє поєднувати оцінки питомих витрат за різними статтями затрат для технологічного комплексу та отримувати економію енергетичних витрат на 2,7 %.

Визначено екстремальний характер залежності величини енергетичних витрат для типової технологічної системи, що із зменшенням розмірності простору координації керованих координат стану об'єкта дозволяє визначити множину напрямів щодо енергоефективних дій із керування.

Для класу частково керованих технологічних процесів із напіввизначеним обмеженням керування встановлено еквівалентність розв'язків задачі оптимальної швидкодії та задачі мінімізації енергетичних витрат, що дозволила знизити порядок задачі оптимізації, де використання методу динамічно обмеженої реалізації керування на основі обернених задач динаміки зі стратегією диференціальної гри для мінімізації ризику за Севіджем, забезпечує збільшення ефективності технологічного процесу до 3,9 % (8 °C під час процесу сушіння).

Вдосконалено метод оптимізації гібридних моделей із залученням концепції визначення масштабів неперервної поведінки та значень інваріантів, який дозволяє на 51 % зменшити час перехідного процесу та зменшити втрати продукту на 3,2 % від об'єму партії.

Розроблено модель оновлення ресурсів для багатоасортиментного виробництва, що дозволяє збільшити ефективність мінімізації логістичних витрат використання складу та постачання до 10,7 %.

Розроблено метод для підтримки прийняття рішень людини-оператора, який дозволяє: локалізувати задачі операторів асортиментних виробництв, підвищити ефективність їх взаємодії у просторі виробництва для виконання цільових задач за продуктами, зменшити кількість помилкових рішень на 18,2 % від загальної кількості.

Вдосконалено метод оцінки стійкості гібридних систем керування для задачі зміни багатопараметричних режимів динамічних об'єктів із диференційованими динамічними характеристиками каналів керування, що скорочує час для налаштування системи автоматизації та дозволяє врахувати запас стійкості за фазою керування до 7,4 %.

Достовірність наукових результатів обґрунтовано точною постановкою завдань, що доведено експериментальними результатами, отриманими як у лабораторних, так і у виробничих умовах.

Результати роботи впроваджено на ПАТ «Калинівський машинобудівний завод» (м. Калинівка Вінницької області), Полтавському обласному комунальному виробничому підприємстві теплового господарства «Полтава-теплоенерго» (м. Полтава), ТзДВ «Миргородський хлібозавод» (м. Миргород), ТОВ «Унітехнології ЮЕЙ» (м. Київ), ПрАТ «Карлсберг-Україна» (м. Київ), отримано рекомендації до впровадження від об'єднання підприємств хлібопекарської промисловості «Укрхлібпром». Результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій.

Особистий внесок здобувача. До дисертації увійшли наукові результати, отримані здобувачем особисто. Здобувачу належить постановка завдань і вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення експериментальних результатів досліджень. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті ідеї та положення, які є результатом особистої роботи здобувача. У докторській дисертації здобувача матеріали і висновки кандидатської дисертації відсутні.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації та її результати доповідалися та обговорювалися на: X Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Иновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции» (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 2011 р.); XVIII Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2011» (м. Львів, 2011 р.); XIX Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2012» (м. Київ, 2012 р.); VIII Центральному науковому конгресі з харчування «SEFood – 2016» (м. Київ, 2016 р.); XXI Міжнародній конференції з автоматичного управління, присвяченій 100-річчю з дня народження академіка НАН України О. І. Кухтенка «Автоматика – 2014» (м. Київ, 2014 р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2014 р.); Міжнародній науковій конференції, присвяченій 130-річчю

Національного університету харчових технологій «Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості» (м. Київ, 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (м. Київ, 2014 р.); IV Міжнародній спеціалізованій науково-практичній конференції «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності» (м. Київ, 2015 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2015 р.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (м. Київ, 2015 р.); науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика» (м. Суми, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Systems, Control and Information Technology – 2016» (м. Варшава, Республіка Польща, 2016 р.); XXIII Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2016» (м. Суми, 2016 р.); XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2017» (м. Київ, 2017 р.).

Публікації. Основні наукові положення за матеріалами дисертації опубліковано у 46 наукових працях, з яких монографія, 9 статей у наукових фахових виданнях України, 6 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 5 статей у наукових виданнях інших держав, стаття у науковому виданні, включеному до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті в інших наукових виданнях, 3 патенти України на корисні моделі, 18 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 425 сторінок. Робота містить 64 рисунки та 16 таблиць. Список використаних джерел налічує 269 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, наведено зміст роботи, методи досліджень, показано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, подано інформацію щодо апробації результатів досліджень та опублікованих наукових праць.

У першому розділі «**Актуальні задачі створення ефективних систем автоматизованого керування технологічними комплексами багатоасортиментної переробки сировини**» виконано аналіз типових технологічних об'єктів харчової галузі виробництва, що використовуються для виробництва різних за характеристиками продуктів. Виокремлено технологічні об'єкти, що залишаються під особливим наглядом людини-оператора та впливають на розв'язок задач переробного комплексу. Виявлено кінцеві та проміжні продукти виробництва, встановлено їх особливості з точки зору

якості продукту та витрат енергії. Проведено аналіз концепції побудови багаторівневих систем. Виокремлено клас об'єктів технологічних виробництв, що допускають розширення характеристик цільового продукту. Обґрунтовано вимоги до технологій, що можуть бути використані для багатоасортиментного виробництва. Проведено класифікацію технологічних комплексів за часткою реалізованих виробничих функцій. Розкрито поняття багатоасортиментних виробництв відносно їх умов та задач.

Для прикладу реалізації багатоасортиментного виробництва обрано такі, що диференційовані за характером виробничого потоку та наповненням процесів, зокрема молочне, хлібопекарське виробництво та комплекс з переробки фруктових сировини. Визначено недоліки, що виникають внаслідок невідповідності параметрів режиму переробки. Виконано аналіз систем керування, що отримала практичну реалізацію. Виокремлено коло задач, які потребують особливої уваги під час зміни режиму процесів технологічного комплексу.

Проведено аналітичне дослідження розвитку та застосування систем, що спрямовані на реалізацію асортиментних виробництв. Розділ містить аналіз особливостей сучасних систем автоматизації та постановку загальної мети дисертації. Проведено аналіз щодо забезпечення виробництв від прийняття організаційних заходів до впровадження автоматизованого виробництва для розв'язання задач зі збільшення асортименту продуктів. Визначено чинники, що заважають розвитку асортиментного виробництва. Обґрунтовано задачі, що уособлюють застосування багатоасортиментних технологій із динамічними процесами. Визначено роль організаційних систем для реалізації асортиментних виробництв. Вагомий внесок у розвиток методів керування багатоасортиментними технологічними виробництвами, щодо дискретних виробництв зробили: А. Е. Кононюк, Ф. М. Куликов, Л. С. Ямпольський, Н. П. Меткин, М. С. Лапин, С. А. Клейменов, Е. Г. Гудушаурі, О. П. Чуб, І. Ю. Черепанська, В. М. Лисогор, Ф. Кімура, Я. Корен, Т. Толію, Д. Г. Болінджер; щодо динамічних систем: І. А. Луценко, А. П. Ладанюк, Т. В. Лошак, В. Г. Доля. Однак, вказані вище питання, за обраним напрямом дослідження, не отримали свого системного розвитку в експериментальному чи теоретичному обґрунтуванні. Подальший розвиток складних алгоритмів керування призвів до появи логіко-динамічних систем (Жук К. Д., Браницький М. С.), де було виконано спробу визначення вихідного стану та опису функцій перебігу кінцевого автомата, що допускала встановлення часу завершення технологічної фази за відсутності обернених перетворень. Таким чином, визначено необхідність виділення класу систем керування, що здатні забезпечувати розширення характеристик продуктів переробки.

Визначено особливості розроблення математичних моделей, які формалізують представлення процесів переробки природної сировини. Розглянуто основні етапи формування структури щодо підвищення ефективності керування проєктованим багатоасортиментним об'єктом та його інформаційної моделі. Розглянуто основні підходи до побудови математичних моделей, залежно від галузей їх використання. Визначено задачі підтримання

адекватності моделі у необхідних межах варіювання технологічних змінних. Проведено огляд математичних моделей, що застосовуються для різних цілей у межах обраних технологічних об'єктів. Обґрунтовано необхідність їх локалізації та мінімізації розмірності для практичних цілей контролю та керування.

Розглядаються шляхи розвитку систем автоматизованого керування для відповідного класу об'єктів, обумовленість їх забезпечення функціями прогнозування, у комплексі з іншими системними функціями. Обумовлене залучення методик, що передбачають розвиток багатоасортиментного виробництва. Визначено задачі, що опосередковано супроводжуватимуть розвиток теорії керування багатоасортиментними комплексами. Обґрунтовано природу зміни технологічних потоків, характеристик середовищ, які потребують розвитку обраного напрямку дослідження. Вказано на методи, що мають бути долучені для аналізу задач у практичних додатках із визначення планів інтеграції та автоматизації об'єкта. Вказано коло переваг, як наслідок розвитку обраного напрямку автоматизованого виробництва. Сформовано коло задач та методів для дослідження вказаних особливостей технологічних об'єктів та систем автоматизації, що їх обслуговують.

На підставі виконаного аналізу обґрунтовано доцільність проведення досліджень, які спрямовано на розв'язання науково-прикладної проблеми та визначеної мети роботи.

У другому розділі **«Математична постановка та аналіз задачі створення систем керування багатоасортиментним виробництвом»** представлено розв'язок задачі із забезпечення необхідної глибини гнучкості змін для технологічної системи, що необхідна для реалізації цільових характеристик продукції. Виконано огляд сучасних форм гнучкості та вимог до їх забезпечення системою керування виділеного класу. Визначення глибини проектної гнучкості доступне для планування за наступною множиною етапів: оцінка перспективної програми виробництва; оцінка можливих цілей функціонування; побудова структури корекції мети; розроблення структури технологічних маршрутів.

Ефективна глибина гнучкості виробничого комплексу визначається кількістю функцій, які характеризують продукти, що за своїм складом і характеристиками замінюють передбачений до створення. Так, глибина гнучкості характеризує кількість перетворень і складових, якими різняться продукти.

Критерій ефективної глибини гнучкості виробничого комплексу оцінюємо як прибуток, який отримано від розширення асортименту для обраних форм гнучкості, за втрат для налаштування необхідних змін:

$$dP = \int_{\tau_p}^{\tau_E} \frac{S_{np}}{I_B + I_{np}} d\tau, \quad (1)$$

де dP – зміна прибутку; S_{np} – приріст від замовлень, які були реалізовані; I_{np} – зміна інвестицій; I_B – базові інвестиції на створення основних видів продукції.

Прибуток від інвестицій ефективно оцінюється за кількістю замовлень, які розраховуються на «життєвий цикл» продукту, що визначається:

$$d\tau = \tau_E - \tau_P, \quad (2)$$

де τ_P, τ_E – розрахунковий час введення та час завершення виробництва продукту, відповідно. Так, оптимальний розв'язок, з точки зору продуктивності за виразом (1), обмежуємо необхідною величиною $S_{np}/d\tau$.

У якості об'єктів реалізації гнучкості, асортиментні виробництва варто розглядати у наступних функціонально-орієнтованих формах гнучкості: експлуатаційна гнучкість, гнучкість за термінами, аварійна гнучкість, сировинно-орієнтована гнучкість. Так, оцінка необхідної гнучкості дозволяє збільшити ефективний асортимент в умовах єдиної технологічної лінії.

В силу практичного застосування частково обумовлених моделей для ізолюваних об'єктів, з метою керування, необхідними заходами є спрощення та довизначення моделі. Залучення ієрархії моделей розглядається як довизначення моделей суміжних рівнів.

Однією з основних задач для притягнення характеристик додаткової варіативності моделі є оцінка її жорсткості або недостатньої визначеності. Характеристику жорсткості стану можна визначити за значеннями сталих часу процесу або через власні значення характеристичних рівнянь моделі. Так, жорсткі системи характеризуються сталими часу зв'язків в об'єкті, які значно відрізняються, що визначаємо за обумовленої різниці у значеннях сталої Ліпшиця:

$$L = \sup \lim_{x_1 \rightarrow x_2} \left| \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right|, \quad (3)$$

для $\forall x_1, x_2 \in [x_{\min}, x_{\max}]$: $\exists f \neq 0$, де x_i – відповідні координати стану.

Необхідність довизначення ковзного режиму для зменшення жорсткості зміни стану, обумовлюємо неоднозначністю поведінки технологічної системи від напрямку руху, навколо визначеної оптимальної межі, що пов'язана з різною фізичною природою явищ в об'єкті.

Унаслідок відхилення параметрів технологічного середовища не завжди існує можливість повернутися до їх початкового стану, оскільки кожна їх зміна, з причини неідеальності середовища за хімічним і біологічним складом, призводить до виникнення похідних продуктів. Таким чином, супроводження критеріальної задачі є необхідним. Важливість критеріїв обирається стратегією поставленої задачі керування: максимальної швидкодії, економії витрат, кількісною мірою супутніх субпродуктів. Таким чином, задача оптимізації за обраним критерієм статичної точності є актуальною у межах визначених крайових умов, лінійність форми яких залежить від характеру поведінки зв'язаних параметрів технологічного об'єкта. Зв'язок вектора стану з

параметрами траєкторії руху динамічної системи обумовлює актуальність задач упереджувального керування для багатоасортиментних виробництв.

Оцінка якобіана для матриці стану об'єкта дозволяє визначити спостережуваність:

$$J(\Phi) = \left| \frac{d\Phi}{dx} \right|, \Phi^T = (\varphi^T, \varphi_1^T, \dots, \varphi_k^T),$$

де Φ – матриця, що є множиною лінійних вектор-функцій φ , які визначають поведінку відносно аргументів вектора координат стану, що є множиною елементів спостереження динаміки руху вздовж цільової траєкторії. Якщо відомо, що оцінки відгуку об'єкта $y(t)$ контролювані безперервно на інтервалі $[t_0, t_1]$, то і похідні вектора спостереження доступні для оцінювання. Довизначення вектора стану отримаємо з векторно-матричного виразу:

$$dy(t) = \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)^{-1} (dx, d\dot{x}, \dots, dx^{(k)})^T.$$

Для моделі об'єкта, що отримана у вигляді лінійної нестационарної системи, вектор стану та вектор спостереження отримуємо відповідно до:

$$\dot{x}(t) = Ax(t),$$

$$y(t) = Cx(t),$$

де y – вектор цільових змінних; A – матриця станів (розмірністю $n \times n$); C – матриця, що визначає відгук об'єкта ($m \times n$), причому $m \leq n$. Для будь-якого часткового розв'язку $\hat{x}(t_0)$, спостереження, що відповідають моментів $\tau \in [t_0, t_1]$, визначаємо:

$$y(\tau) = CH^T(\tau, t_0)\hat{x}(t_0),$$

де $H(t, t_0)$ – перехідна матриця Коші, а «нев'язка» у спостереженнях

$$dy(\tau) = y(\tau) - CH^T(\tau, t_0)\hat{x}(t_0).$$

Так, задача спостереження $\hat{x}(t_0)$ забезпечується процедурою мінімізації значення функціоналу I

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \left| \left[y - CH^T(\tau, t_0)\hat{x}(t_0) \right] \left[y - CH^T(\tau, t_0)\hat{x}(t_0) \right]^T \right| d\tau.$$

Для визначення $\hat{x}(t_0)$ маємо рівняння:

$$\hat{x}(t_0) = (W^H(t_1, t_0))^{-1} \int_{t_0}^{t_1} CH^T(\tau, t_0) y d\tau,$$

що обумовлює спостережуваність необхідних і достатніх умов задачі оцінкою граміана спостережності у вигляді неусобленої матриці $\det W^H(t_1, t_0) \neq 0$.

Для наближення в якості моделі прогнозу будемо функцію відступаючого горизонту, де кожне нове значення оцінюємо як:

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1),$$

де $\Delta u(k)$ – приріст керування за обраним каналом. Визначаємо вектор станів:

$$x^*(k) = \begin{pmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{pmatrix},$$

приймаємо модель об'єкта у просторі станів у вигляді:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k),$$

$$y(k) = Cx(k).$$

Вираз із $x^*(k)$ отримуємо у вигляді:

$$x^*(k+1) = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & I_{nb} \end{pmatrix} x^*(k) + \begin{pmatrix} B \\ I_{nb} \end{pmatrix} \Delta u(k) = A^* x^*(k) + B^* \Delta u(k),$$

$$y(k) = (C \ 0) x^*(k) = C^* x^*(k),$$

де, на відміну від класичних методів, I_{nb} – функція вартості, що передбачає упереджувальне керування, містить квадратичні члени із приростом помилки керування та контролю на скінченному горизонті для чергового кроку:

$$I_{nb} = \sum_{i=N_1}^{N_2} [P\hat{y}(k+i) - y(k+i)]^2 + \lambda \sum_{i=1}^{N_{u1}} [\Delta u(k+i-1)]^2, \quad (4)$$

де $\hat{y}(k+i)$ – оцінка виходу на i -тому кроці; P – функція поліноміального фільтру; $y(k+i)$ – значення спостережної траєкторії зміни виходу на i -тому кроці; $\Delta u(k+i-1)$ – приріст керування, що має відповідати обмеженням $\Delta u(k+i-1) = 0$, де розмірності вектора стану та вектора керувань обумовлені як $N_2 < i \leq N_u$.

Предиктор стану приймає вигляд

$$x^*(k+2) = A^* x^*(k+1) + B^* \Delta u(k+1) =$$

$$A^{*2} \bar{x}(k) + A^* B^* \Delta u(k) + B^* \Delta u(k+1)$$

$$\vdots$$

$$x^*(k+N_2) = A^{*N_2} x^*(k) + A^{*N_2-1} B^* \Delta u(k) + \dots + B^* \Delta u(k+N_2-1).$$

Передбачувана поведінка вихідного сигналу (рис. 1) використовується для забезпечення $\forall |u_i - u_{i+1}| \leq \delta_u, \delta_u : \text{sign}(\dot{y}) \neq \text{const}$.

Обмеження для задачі зменшення порядку визначають розмірність алгоритму керування, яка відповідає кількості поверхонь розриву. Розбиття загального руху на множину траєкторій меншої розмірності, передбачає використання режиму робастного керування у скінченному інтервалі цільової змінної, коли інша частина керованих каналів залишається зі статичними параметрами. Оскільки модель процесу, що відновлена, не забезпечує заданої стійкості та точності керування, то необхідність у розділенні керувального впливу та корекції траєкторії керування за координатою стану є обґрунтованою. При цьому матриця керування B буде представлено у вигляді:

$$B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де $B_1 \in R, \dim B_1 = [(m-l) \times m]$ та $B_2 \in R, \dim B_2 = [m \times m]$, за умови $\det B_1 \neq 0, \det B_2 \neq 0$, l – розмірність елементів, які представляють частину реалізації керування, що відповідає за сходження керувальних змінних та обирається як:

$$l : \dim B \xrightarrow{\|\bar{y}\| \geq \delta_y} m, \quad (6)$$

де \bar{y} – вектор регламентованих для продукту спостережних змінних; δ_y – максимальна помилка керування для окремої змінної.

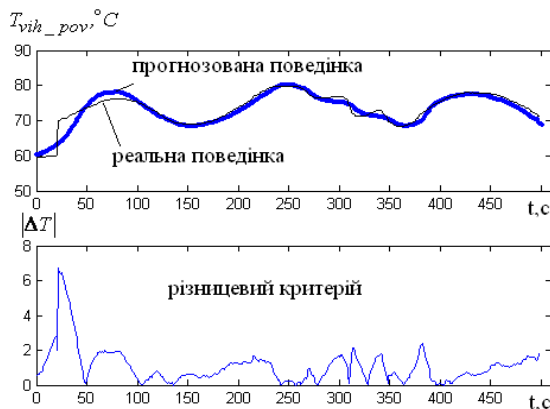


Рис. 1 Результати прогнозу температури вихідного повітря сушильної колони

Отримана модель спостереження вхідів у матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot x. \quad (7)$$

Імпульсний відгук матриці системи керування визначаємо як:

$$G(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ C e^{At} B_2 B_1^T, & t \geq 0 \end{cases}. \quad (8)$$

Модель керованого об'єкта із спостерігачем набуває вигляду:

$$\begin{cases} \dot{x} = (sI - A)^{-1} x + B_2 B_1^T u \\ y = C((sI - A)^{-1} x + B_2 B_1^T u) \end{cases}, \quad (9)$$

а G – матриця коефіцієнтів передатної функції

$$G = C(sI - A)^{-1} B_2 B_1^T. \quad (10)$$

Реалізація багатовимірного керування для динамічних систем обумовлює величину динамічної помилки, що порушує технологічний регламент, тому передбачаємо лише сходження процесу керування за визначений час в окіл цільової змінної зі статичною точністю δ_{y_i} . Для реалізації вказаного керування здійснюємо перебіг в області поверхні, що визначається як $S : B_2 u = B_1 u + Ax$.

Керування для ковзного режиму (рис. 2) обираємо у вигляді $u = -k_g \cdot \text{sign}(S(y))$, де $S(y)$ є оцінкою відгуку об'єкта.

Отримане керування можна представити у вигляді:

$$u = -\text{diag}(k_{g_{B1}} \ k_{g_{B2}})_m \text{sign}[S(y)], \text{ де } k_{g_{B2}} = [A_{22} + CA_{12}] [C \ (sI - CB_2^{-1}) B_1^T]^T, \\ k_{g_{B1}} = [A_{21} - A_{22}C + CA_{11} - CA_{12}C] [sI \ -B_1^T B_2]^T,$$

$$S(y) = (C \quad sI) \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}, \text{sign}(y) = \begin{cases} -1, y < +\frac{\delta}{2} \\ 1, y > -\frac{\delta}{2} \end{cases}. \quad (11)$$

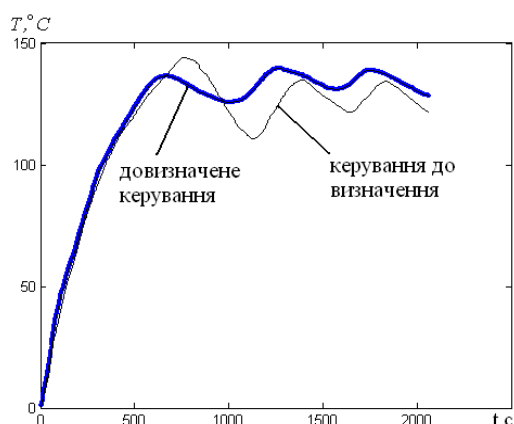


Рис. 2 Розривне керування з довизначенням упереджувальною моделлю

Якщо розглядати змінну x_2 як довизначення стану x_1 для пониження порядку системи, то пошук матриці C гібридної моделі має призводити до виразу $A_{11} - A_{12}C$, що для забезпечення стійкості зводиться до оцінки у вигляді лінійного зворотного зв'язку $x_2 = -Cx_1$ для $\dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2$.

Підтримання адекватності керування зводиться до перепризначення матриці станів A , що забезпечує необхідну точність для δ_{y_i} . Оскільки лінійність

опису передбачена для діапазону варіювання координат стану $(x_{j \min}; x_{j \max})$, то матриця A втрачає адекватність за наявності відхилення $y_i - \hat{y}_i > \delta_{y_i}$. Втрата адекватності опису свідчить про неспроможність варіюванням групи суміжних координат $\langle x_1, \dots, x_n \rangle$ забезпечити повернення спостережної змінної $\text{var}\langle x_1, \dots, x_n \rangle \xrightarrow{dy/dt, y/x} \lim dy_i$, де y/x – оцінки ваги координат. Обрана вхідна координата $x_{t \arg} \in \bar{x}$, де $\forall x_{t \arg} \exists M_l : x_{t \arg} \xrightarrow{\lim x} x_{t \arg \text{opt}}$, де \bar{x} – вектор координат стану процесу, $\{x_1, \dots, x_n\} \in \bar{x}$; $x_{t \arg \text{opt}}$ – цільове значення $x_{t \arg}$, що прийнято стратегією керування для моделі системи $M_l \langle A_l, B_l \rangle$. Визначаємо обмеження динаміки $\forall A_l \exists a_{k,j} \xrightarrow{A_l \rightarrow A_{l+1}} \lim \|A\|$.

Для матриці стану A має виконуватися обмеження зв'язків керування:

$$a_{k,j} < \sup \left\{ m^{-1} \sum_{k=1}^m b_{k,j}^{-1} \hat{y}_i - \sup \frac{\xi(t)}{t_0 - t_{ch_grad}} \right\}, t \in [t_0, t_{ch_grad}], \quad (12)$$

де t_0, t_{ch_grad} – час початку використання матриці A_l та зміни матриці стану, відповідно. Відгук технологічних змінних об'єкта відносно \bar{u} є величиною зваженою

$$\forall \{A_l \rightarrow A_{l+1}\} \exists B_l, b_{k,j} \leq \sup b_{k,j} \|B_l\|^{-1}. \quad (13)$$

Необхідна величина керувального впливу обумовлює розмірність моделі A для $\{y_1, \dots, y_m\} \in \bar{y}$, що за $\text{var} M \xrightarrow{\lim \|B\|} y_{Mi} \{y_{i \min}, y_{i \max}\}$, де $B_l \xrightarrow{\lim \|B\|} B_{l+1}$ та для матриці спостережності

$$\dim A_{l+1} = \begin{cases} \Delta_{XU} < 0, n = n+1 \\ \Delta_{XU} \pm \delta_A = 0, n = const, \\ \Delta_{XU} > 0, n = n-1 \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta_{XU} = \|\bar{x}\|^{-1} \|\bar{u}\|_l - \|\bar{x}\|^{-1} \|\bar{u}\|_{l+1}, \quad (15)$$

де δ_A визначаємо як компроміс між точністю статичної моделі та розміром інтервалу адекватності для (15), що викликає необхідність заміни елементів матриці A .

В результаті використання методу довизначення траєкторії керування в умовах багатоасортиментного виробництва визначено підвищення статичної точності реалізації процесу на 4%. Таким чином, редуковане керування забезпечує відповідну статичну точність багатопараметричної системи.

Для визначеної множини об'єктів, що допускають багатоасортиментне виробництво розроблено математичні моделі, що відповідають за опис динамічної поведінки під час реалізації частково спостережних процесів технологічного комплексу. Зокрема представлено математичні моделі процесу випарювання сокомістких розчинів, що визначають втрату вологи dm_v від зміни температури розчину T_p через T_{nag} .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_v}{dt} = m_{v_nas} + k_v m_{v_p} \left[2 \frac{h_p^2}{h_{p_0}} \left(\frac{4}{3} \pi (k_\sigma \sigma_p)^3 \rho_{p_0} g - 6 \pi \rho_{p_0} k_\sigma \sigma_p \nu \right)^{-1} \right]^{0.5} \\ \nu = \frac{2 k_{pp} (p_{pov} g h_p^2) (k_\sigma \sigma_p)^2}{9 h_{p_0} \rho_{p_0}} \\ k_{\sigma_p} = f_\sigma(\sigma_p) \\ m_{v_p} = f_m(T_p) \\ Q_{kun} = m_v E \\ \frac{dT_p}{dt} = T_{p_0} + \frac{h_p}{V_p h_{p_0} \rho_{p_0} c_v} \left[k_p (T_{nag} - T_{kond}) K_{st} S_{st} - Q_{kun} \right] \\ K_{st} = f_K(P_{nag}) \\ T_{nag} = f_T(P_{nag}) \\ k_p = \sum_{i=1}^n R_{Tp_i} \end{array} \right. \quad (16)$$

де P_{nag} – тиск у камері теплообмінника; T_{nag} – температура поверхні нагріву; K_{st} – коефіцієнт теплопередачі через стінку; m_{v_p} – кількість водяної пари; h_p – рівень у апараті; Q_{kun} – кількість тепла на кипіння; m_v – маса випарюваної води; ν – швидкість підняття бульбашок; p_{pov} – парціальний тиск пари на поверхні дзеркала середовища, що кипить.

Залежність для стану поверхневого натягу σ_p та густини суміші ρ_p , що зростає як $\rho_{p-0} \frac{h_p}{h_{p-0}}$ та викликає збільшення кількості центрів кипіння n_{bulb}

для температурного опору шарів суміші R_{Tp_i} викликає необхідність кускової лінеаризації розв'язків, а для випадку багатоасортиментного виробництва з неоднозначними зворотними перетвореннями робочого середовища – гібридної будови розривного типу.

Модель, що відповідає за встановлення температури паликових газів сушильної колони:

$$\dot{T}_{нов_г} = f_{Tw}(W_{нал_0} + (1 - e^{-\beta_{гг}\tau})W_{нал}), \quad (17)$$

Модель динаміки температури сушіння молочної суміші, яка визначає динаміку теплопередачі до розпиленої молочної суміші:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{МС} = & F_{нов_г} \mu_{нов_г} c_{нов_г} (T_{нов_г} - T_{нас}) + \\ & + F_{M_зрід} \rho_B k_{зрід} c_B \left(T_{M_зрід} (1 - e^{-\beta_{M_зрід}\tau}) - T_{нас} \right), \end{aligned} \quad (18)$$

де $K_{випар}$, f_{Tw} – емпіричні коефіцієнти випарювання та теплоутворення потужностей паликового пристрою; ρ_B , $\rho_{зрід}$, $\rho_{сух}$ – густина води, зрідженої молочної суміші та насипна густина сухого продукту; c_B – теплоємність води; $F_{M_зрід}$ – витрата зрідженого молока; $W_{нал}$ – потужність паликового пристрою; $T_{нас}$, $T_{M_зрід}$ – температура насичення за сталого тиску $P_{нас}$ у сушильній камері; $\beta_{гг}$, $\beta_{M_зрід}$ – сталі транспортного запізнення для живлення каналу паликових газів та молока зрідженого.

Задача мінімізації динамічної похибки для підтримання режиму сушіння приймає вигляд:

$$\dot{Q}_{МС} \equiv \dot{W}_{нал}. \quad (19)$$

Модель підтримання тепло-парового режиму випікання хлібних продуктів, що забезпечує обумовлене розривне керування:

$$\dot{T}_{cham} = \alpha_i F_{bg} t_{pp} T_{zap_muf} V_{cham}^{-1} + (V_{cham} - \alpha_i F_{bg} t_{pp}) V_{cham}^{-1} T_{cham_0}, \quad (20)$$

$$\begin{cases} \dot{T}_{cham} > 0, Q_{arm} = Q_{arm_0} + Q_{bg} - Q_{loss} \\ \dot{T}_{cham} < 0, Q_{arm} = Q_{arm_zvor_0} - Q_{loss} \end{cases}, \quad (21)$$

де Q_{bg} , Q_{loss} – кількість тепла паликових газів та режимних втрат; T_{zap_muf} – температура паликових газів за муфелем печі; T_{cham} – температура пічної камери; F_{bg} – витрата паликових газів; t_{pp} – час роботи паликового пристрою; V_{cham} – об'єм пічної камери.

Кількість тепла, що повертається арматурою камери випікання становить:

$$Q_{arm_zvor} = Q_{arm} - 0,5 \cdot c_{fut} m_{fut} (l_T T_{cham} + n_T T_{zov_st} - 2T_{zov_st}), \quad (22)$$

де n_T , l_T – коефіцієнти, що визначають розподіл температурного поля в ізоляційному матеріалі; m_{fut} – маса футеровки; T_{zov_st} – температура зовнішньої стінки; c_{fut} – теплоємність футеровки.

Для окремої зони печі Q_{tg} визначається зміною температури паливних газів T_{zap_muf} , що залежить від тривалості роботи паливника на ділянках визначених за (21) як:

$$t_{2_3} = \frac{tg \left(\arccos \left(\frac{t_{M3} - t_{M2}}{T_{M3} - T_{M2}} \right) \right)}{T_{cham_zad} - T_{3_4}},$$

$$\dot{T}_{1_2} = a_{1_2} e^{\beta_{gr} t} T_{zap_muf}, \quad (23)$$

де

$$a_{1_2} = \frac{dT_{cham1_2}}{T_{zap_muf_max} - T_{cham1}}, \quad \beta_{1_2} = \alpha_i F_{tg} V_{cham}^{-1}.$$

Для звільнення камери після роботи паливкового пристрою динаміку температури визначаємо за виразом:

$$\dot{T}_{3_4} = a_{3_4} \left(1 - e^{-\beta_{gr3_4} t} \right) T_{cham}, \quad (24)$$

$$a_{3_4} = (T_{zap_muf_max} - T_{cham4})^{-1} dT_{cham3_4}, \quad \beta_{3_4} = \varphi_i F_{tg} V_{cham}^{-1},$$

де φ_i – коефіцієнт, що залежить від розрідження, яке утворюється витяжним коробом зони; F_{bg} – витрата паливних газів, що керована кутом повороту заслінки α_i . Отримані характеристики об'єктів (рис. 3), відповідно до оцінюваного порівняння відгуків моделі та об'єкта за критерієм Фішера, підкреслюють адекватність застосування розривних методів, для підвищення точності та стійкості оцінок для задач керування.

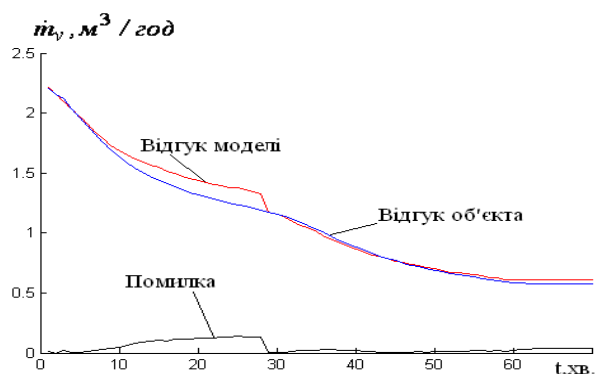


Рис. 3. Динаміка випарювання для повидла (абрикос) в апараті МЗС-320

У результаті дослідження математичних моделей типових технологічних об'єктів харчових виробництв з гібридною будовою розривного типу визначено підвищення динамічної точності на 12,3 %, в умовах розширення меж зміни координат стану об'єкта для багатоасортиментних виробництв.

У третьому розділі «Оптимізація систем керування багатоасортиментним виробництвом» представлено розв'язок задачі параметричної ідентифікації. Наведено вимоги до вибірки даних для сильнозв'язаних технологічних систем. Визначено умови задач ідентифікації для застосування нововведеного режиму технологічного об'єкта. Для відокремлення впливу змінної керування обумовлено використання частотно-фазової характеристики. Визначено умови втрати стійкості розв'язків за ідентифікації багатомірних об'єктів.

Представлено задачі оптимізації асортиментних технологічних комплексів, що забезпечують мінімізацію витрат на багатоасортиментні виробництва. Для задач економії витрат технологічного комплексу пропонується розрахунок їх вартісних оцінок як питомих, за статтями затрат:

$$S_{B,m}(k) = \min \left\{ B_{vit,m} \sum_{i=1}^n \tilde{B}_{B,i}(k) + S_{base}(k) \right\}, \quad (25)$$

де $S_{base}(k)$ – базова вартість супровідних витрат на k -тому кроці процесу; $\tilde{B}_{B,i}(k)$ – середня вартість статті витрат на k -тому кроці; $B_{vit,m}$ – карта витрат для m -того виду продукції; n – кількість кроків, що займає виробничий цикл m -того продукту.

Визначено особливості реалізації багатозв'язної оптимізації технологічної системи. Запропоновано порядок зменшення розмірності критерія оптимізації керування, шляхом усунення найменш впливових на цільові змінні елементів моделі, для визначеної розмірності простору координації залучених координат стану об'єкта. Обумовлено характеристики інтерпретації цільового функціоналу для задач оптимізації у визначеному просторі станів. Визначено, що задача мінімізації втрат технологічного комплексу, за зміни режимів, може приймати наступні напрями: адекватності задіяних ресурсів; оптимізації використання ресурсів в обладнанні; мінімального терміну використання ресурсу на виконання задачі. Так, динамічна оптимізація за витратами технологічних теплових агентів, основного виду енергоресурсів оцінюється за критерієм виду:

$$J(u, \delta_T) = \prod_{i=1}^n \eta_{iF}^{-1} \int_{t=0}^{\tau} \left[q \delta_T^2(t) + u^2(t) \right] dt, \quad (26)$$

де q – коефіцієнт штрафу за виникнення похибки для температури δ_T ; η_{iF} – коефіцієнт корисної дії i -того агрегату на продуктивності F_{prod} ; δ_T та u – приведені до максимального значення відповідного діапазону, безрозмірні величини; τ – час, що визначається періодичністю оцінювання керувальних дій для (9). Вигляд (26) обумовлює екстремальний характер залежності величини енергетичних втрат, що вимагає зменшення розмірності простору координації у разі застосування множини незалежних джерел керування. В результаті аналізу ефективності критерію оптимізації керування щодо енергетичних витрат від розмірності залучених координат стану об'єкта

визначено множину напрямів енергоефективних дій із керування та отримано збільшення ефективності процесів поряд із застосуванням режимом на 2,7 %.

Для області допустимих відхилень, за завданням визначаємо обмеження ресурсу керування:

$$S_x = \left\{ x_0 : x = \langle x_0, x(\cdot) \rangle, (F_0 x_0, x_0) + \int_0^T (F(t)x(t), x(t)) dt \leq 1 \right\}, \quad (27)$$

де $F_0 = F_0^T > 0$, $F(t) = F^T(t) > 0$ – вагові матриці, що представляють структуру початкового стану координат системи та її координатних відхилень, з інтегральним квадратичним критерієм оптимізації

$$I(u, x) = \prod_{i=1}^n \eta_{iF(x)}^{-1} \int_0^T ((G(t)x(t), x(t)) - (N(t)x(t), x(t)) + (D(t)u(t), u(t))) dt, \quad (28)$$

де $N(t) = N^T(t) \geq 0$, $q : G(t) = G^T(t) \geq 0$, $D(t) = D^T(t) > 0$ – задані вагові матриці, що вказують на вагу початкового стану координат, координатних зрушень і встановлюють важливість втрат ресурсів для задачі керування.

Задача пошуку оптимального керування зводиться до виразу:

$$J(u^*) = \inf_{u \in U} \left\{ \sup_{x \in S} I(u, x) \right\}, \quad (29)$$

де $I(u, x)$ – функціонал виду (26) набирає значення $I(u, x) \leq \delta$.

Субоптимальний розв'язок для керування v визначається з умови:

$$\inf_{v \in L_2^n(0, T)} \sup_{w \in \Psi_{n, m}} [\|R_v(w)\|_{\Psi_{n, m+n}}^2 - \gamma^2 \|w\|_{\Psi_{n, m}}^2] \leq 0 \quad (30)$$

Реалізація покоординатного сходження будується як диференціальна гра між двома гравцями з вибору стратегії для v . Гарантована якість динамічної гри забезпечується розв'язком задачі мінімізації ризику Севіджа, верхньою межею функціоналу (30). Остаточо отримуємо оптимальні значення для функцій $v(t)$ і $w(t)$ у вигляді:

$$v^*(t) = -B_v^T(t)P(t)x(t), w^*(t) = \gamma^{-2}P(t)x(t). \quad (31)$$

Значення цільового функціоналу приймає кінцевий вигляд

$$\sup_{w_0 \in \Psi_{n, m}} (w_0^T (L_w^T P(0) L_w - \gamma^2 E) w_0) \leq 0. \quad (32)$$

Таблиця

Характеристики ефективності процесу оптимізації

Процес	Δv_η	$\Delta w, \%$	τ_{opt}, c	Δy	$\tau_{рег}, c$	ΔU_{ust}
Сушіння	9,2	91,2	57	2,1	9	12,4
Випікання	23,9	28,9	203	9,7	58	25,2

Розрахунок здійснюємо до забезпечення за (30) супроводження мінімальної похибки керування δ_y , для регулювальної дії Δv_η , втрати вологи Δw , часу регулювання $\tau_{рег}$, оцінки за усталений приростом керування ΔU_{ust} .

Програмну реалізацію виконано для мінімізації витрат тепла на сушіння молочної сировини (рис. 4). В результаті оцінки застосування методу динамічно обмеженої реалізації керування визначено можливість зниження порядку задачі оптимізації, забезпечення стійкості за встановлених обмежень щодо статичної похибки до 3,9 % (8 °С під час процесу сушіння).

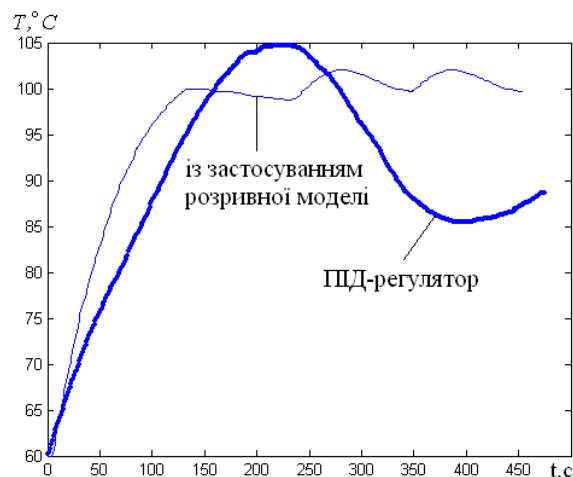


Рис. 4. Порівняння динамічної похибки класичного та розробленого методу керування

вибору гібридних моделей для неперервних та неперервно-дискретних технологій. Проведено аналіз існуючих гібридних структур Браницького, Брокетта, Артштейна, Таверніні. Обґрунтовано побудову дискретної частини гібридної мережі G_A на основі Петрі з урахуванням часових відносин.

Для моделі гібридного автомата визначено множину аргументів, що дозволяє формалізувати зміну режиму динамічних процесів. Для виділеного класу об'єктів гібридна модель приймає опис у вигляді кортежу:

$$\arg_{full} G = \langle P, Y, V_{con}, M, W, inv, act \rangle, \quad (33)$$

де V_{con} – дискретне керування; P – скінченна множина дискретних станів або місць, що є вершинами графа; Y – простір неперервних станів гібридного автомата, де визначаються неперервні змінні стану y_i ; W – дискретний простір зв'язку, де змінні з w_i приймають значення після переходу m_i ; M – скінченна множина ребер, що відповідає переходам за w_i визначеними за подіями з E_{cp} .

Обґрунтовано, що місця P можуть вміщати звичайні диференціальні рівняння, що є частинним випадком алгебраїчних диференціальних рівнянь та диференціальні рівняння із аргументом, що запізнюється. Визначено події, що ініціюють дискретні переходи у системі та визначають необхідність застосування обраних інваріантів. Для ефективного застосування гібридна модель, що побудована на кортежі (33) потребує оптимізації. Класичні методи оптимізації розраховані на зменшення варіативності простору цільових змінних через локалізацію моделі. Так, для збільшення інформативності моделі запропоновано концепцію визначення масштабів неперервної поведінки та

У четвертому розділі «Забезпечення асортиментної задачі виробництва для простору інтегрованих технологічних додатків» показано особливості застосування видів мереж Петрі для забезпечення систем пакетних (Batch) процесів. Обумовлено застосування кольорових мереж Петрі з часовими відносинами. Визначено коло задач для застосування ієрархічного Петрі-підходу. Розглядається порядок побудови мережі для практичних додатків. Приведено обґрунтування

значень інваріантів для адекватної роботи автоматного переходу, де інваріанти часових відносин визначаються як

$$T_j = \tau_w(k) - \tau_w(k-1), \exists (\overline{\phi_{w_k} \& e_{k+1}}), \quad (34)$$

де стан для виконання переходу визначається інваріантою e_k . Під час виконання умови, для будь-якого з переходів за інваріантою e_k , автомат обраховує правило для ребер $M_j : p_i \rightarrow p_{i+1}$ мережі, за якими здійснюється перехід. Запропоновані умови безконфліктного переходу:

$$\forall \tau_{y_i}^{k\#} \cap \tau_{y_{i+1}}^{k\#} \rightarrow \min \sum_{k=1}^m \tau^{k\#}. \quad (35)$$

Так, перехід для t_i з $v_i = V(t_i) \in$ включенням ступеня k на рівні пріоритетів w_i у маркуванні M , тоді і тільки тоді k дозволяє $\forall p_j \in \tau_i^{\#0}, m(p_j) \geq kw_i(p_j, t_i)$ у $M(\tau_i^{\#0}) = \{p_j | (p_j, t_i) \in F\}$ та $\tau_i^{\#0} = \{p_j | (t_i, p_j) \in F\}$.

Час таймера для асинхронного переривання оцінюється як:

$$t_{m_j}^+ = \lim t_{m_{j+1}}^-, \text{ якщо } \forall m_{j+1}^k \& m_{j+1}^{k+1} = 0, \quad (36)$$

при цьому зменшення кількості досяжних альтернативних маркувань мережі з M та витрат τ_k на оцінку досяжності простору станів Ω_l обумовлені вимогами статичної точності інваріантів для зміни стану мережі відносно δ_y .

Часові відносини подій встановлюємо, в тому числі, для непослідовних причинно незв'язаних подій, що одночасно виконуються частинами процесу

$$t_{m_j}^+ \rightarrow m_j^k \cap m_{j+1}^k, \forall m_j^k \& m_{j+1}^k \neq 0. \quad (37)$$

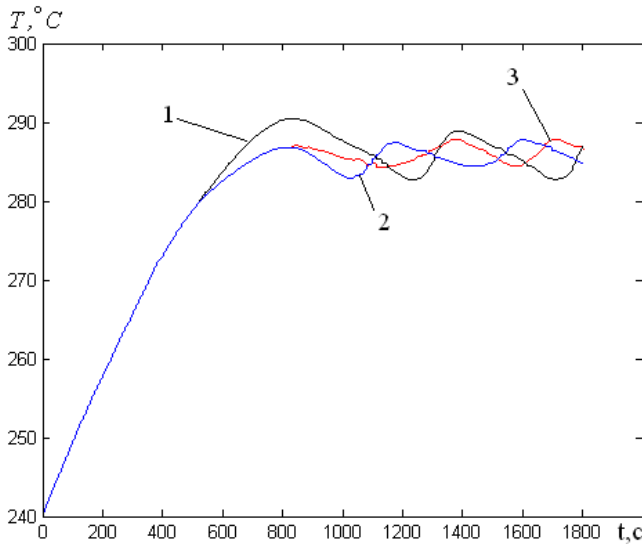


Рис. 5. Порівняльний аналіз динамічної похибки під час оптимізації гібридної моделі: 1 – початкова; 2 – з довизначенням інваріанти часу; 3 – зі зменшеним значенням інваріанти стану

Тут будемо поділяти зміни стану на два типи: що розраховані на активність протягом часу $t_{m_i}^k$; що активують перехід для відповідного часу $t_{m_i}^-$, тобто змінюють значення для маркера активності m_i .

Визначена модель для відтворення паралельних потоків у процесах гарантує оптимальну, з точки зору компактності представлення за кількістю вершин p_i та зв'язків m_i , структуру, чим, поряд з надлишковою інформативністю, виключається можливість «блукання» автомата (рис. 5). Запропонована методика

довизначення станів диференціального автомата, де довизначення дискретної динаміки з оцінки безперервної динаміки здійснюємо за умов сумісності:

$$x(t^+) = x(t^{\#m(t)}) \quad x(t^-) = x(t^{\#0}), \quad (38)$$

де траєкторія гібридного автомата визначатиметься за часом встановлення події τ_k , з відповідною зміною часу для t_i^-, t_i^+ .

Для ієрархічних рівнів ir адаптації мережі, що мають сталу часу T_{y_i-U-ir} на $\delta_{y_i-ir} \delta_{y_i-(ir-1)}^{-1}$ вищу за попередній, виконується умова:

$$\delta_{y_i-ir} n^{-1} \sum_{i=1}^n T_{y_i-U-(ir-1)} \leq \delta_{y_i-(ir-1)} n^{-1} \sum_{i=1}^n T_{y_i-U-ir}, \quad (39)$$

завдяки чому їх терміни адаптації τ_{id} та присутності подій $\langle t_k^-, t_k^+ \rangle$ збільшені відповідно допустимих значень помилок $\delta_{y_i-ir} \delta_{y_i-(ir-1)}^{-1}$, де верхні рівні залучаються, якщо нижні $ir-1$ не відстежують зміну стану. Так, за рахунок оптимізації зменшується жорсткість керування під час зміни режиму (рис. 6). Визначено порядок переходу за траєкторією та зміною стану аргументів у мережі G_A , за побудованої моделі із забезпеченням досяжності станів.

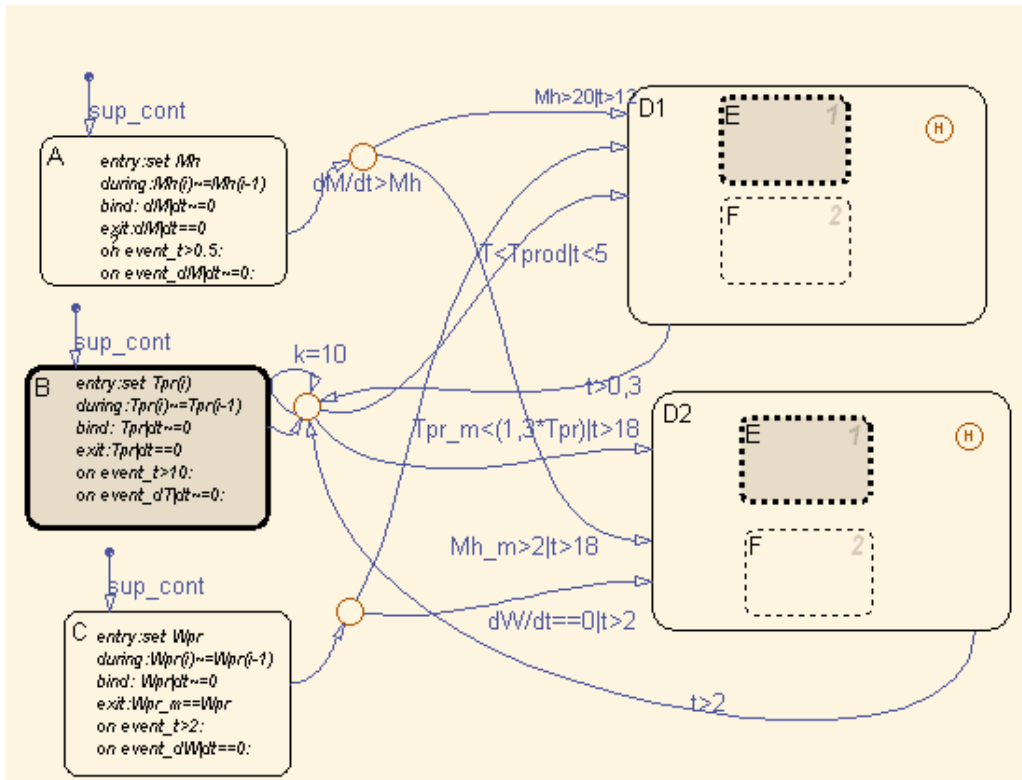


Рис. 6 Гібридна модель для технологічного комплексу хлібо-булочного виробництва

Запропоновано метод забезпечення статичної точності керування, через врахування «вкладу» малих сталих часу в оптимальний закон керування,

завдяки апроксимації системи високого порядку системою низького порядку із запізнюванням.

Оскільки сталі часу в системі за різної природи $T_1 \ll T_2$, то базова система характеризується значно більшою «інерційністю», ніж додаткова ланка, тобто базова система практично не реагує на форму швидких змін координати $y_1(t)$, а «відстежує» їх за інтегрованою оцінкою, що замінюємо функцією додаткової ланки запізнювання за τ .

Відзначимо, що нерівності з M як умови існування розриву повинні виконуватися в кожній точці поверхні перемикання для множини Y .

У п'ятому розділі «Техніко-економічні чинники забезпечення управління технологічного комплексу багатоасортиментного виробництва» визначено техніко-економічні чинники, що обумовлюють залучення гібридного керування для асортиментного виробництва. Запропоновано оптимізацію моделі оновлення ресурсів (див. рис. 5).

Визначено порядок оновлення ресурсів з урахуванням сталих часу $T_{up_res_j}$ на їх залучення, через оцінку за періодом $\tau_{F_{res_j}} : \sum_{i=1}^3 k_e t_{eJi}$ контролю стану ресурсів F_{res_j} , які забезпечують процес та викликають множину запитів із постачання, розмірністю k_e . Для економічного прогнозу оцінок ресурсів V_{res} комплексу обумовлено спрощення моделі. Інтегральну оцінку витрат за моделлю, що передбачає організація постачання, отримуємо за:

$$dI_{prod_i} = 0,5V_{prod_i}^{-1} dI_{prod_i_alt} F_{up_res_j} n_{up_res_j} + R_{prod_i} F_{up_res_j} I_{v_{up_res_j}} V_{res_j}^{-1}, \quad (40)$$

де $I_{v_{up_res_j}}$ – втрати на разове поповнення складу; R_{prod_i} – кількість запитів по продуктах для $F_{up_res_j}$, за сталого попиту на продукти $\dot{F}_{prod_i}^* = const$; $dI_{prod_i_alt}$ – зменшення вартості на альтернативну переробку цільового продукту $prod_i$; V_{prod_i} – обсяг продукту $prod_i$, що закуповується. Кількість оновлень ресурсу визначаємо за:

$$n_{up_res_j} = \tau_{ag_prod_j}^* T_{up_res_j}^{-1} = F_{prod_i} k_{res_j} V_{res_j}^{-1}. \quad (41)$$

Обмеження $\inf T_{up_j}$ визначаємо технологічно за $V_{res_j_sklad}$. Але якщо $V_{res_j} = f(T_{up_res_j})$, то оцінку $F_{res_j_j_j}^*$ для динамічного споживання множиною споживачів єдиного ресурсу, диференційованого за динамікою споживання для процесів, визначаємо як

$$F_{res_j_j_j}^{-1} = \sum_{i=1}^{n_{prod_j}} F_{res_j_prod_i}^{-1}, \quad (42)$$

що забезпечує для j -го ресурсу $F_{res_j_j_j} T_{up_res_j} = \lim V_{res_j}$ мінімальний об'єм оновлення.

Так, мінімальний розмір партії оновлення ресурсів визначається (рис. 7) витратами на постачання

$$I_{v_{up_res_j}} \rightarrow \inf \Delta V_{res_up}, \quad (43)$$

а максимальний – вартістю на розширення складу

$$dI(V_{res_R_{sklad}}) \rightarrow \sup \Delta V_{res_up}. \quad (44)$$

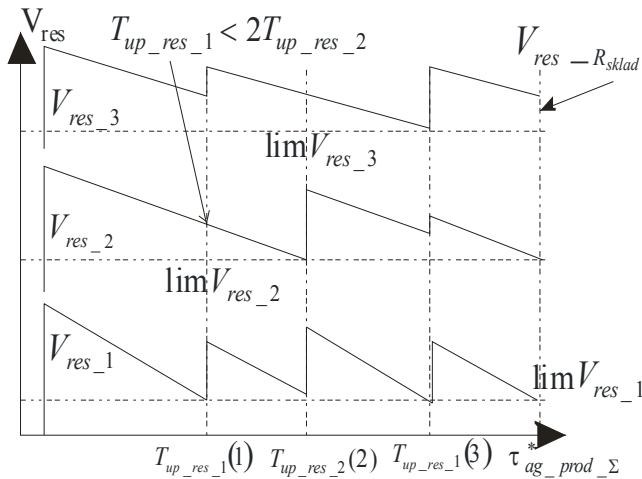


Рис. 7 Виконання задачі постачання ресурсів продукту

Для паралельно залучених споживачів єдиного ресурсу динаміку споживання визначаємо як:

$$F_{\Sigma res_j} = (F_{prod_i}^{-1} + \dots + F_{prod_n}^{-1})^{-1}, \quad (45)$$

де $V_{res_j_sklad}$ є загальним для всіх долучених до споживання визначеного ресурсу процесів. Через необхідність у забезпеченні залишкового ресурсу на помилку $e_{res_m} \equiv \Delta V_{res_j}$ та затрати $F_{res_m} \equiv \Delta C_j$ за видами ресурсів $i = 1..m$ еквівалентну задачу про мінімізацію витрат отримаємо у вигляді:

$$\sum_{j=1}^m k_{Fres_j} \Delta V_{res_j} \leq F_{res_j}^*. \quad (46)$$

З урахуванням (40) оцінка інвестицій, що визначає загальну динаміку витрат

$$dI = dI_R \dot{F}_{prod_ch_max} V_{res_Sigma}^{-1} + 0,5 dI_{sklad} V_{res_Sigma} + I_{sklad} (V_{res_j}^* - F_{res}(x)) + dI_{outsour} F_{res_j}^* \dot{F}_{prod_ch_max} V_{res_Sigma}^{-1},$$

мінімізує обсяг поповнення ресурсу як:

$$dI dV_{res_Sigma} = dI_R \dot{F}_{prod_ch_max} V_{res_Sigma}^{-2} + 0,5 dI_{sklad} V_{res_Sigma} + dI_{outsour} F_{res_j}^* \dot{F}_{prod_ch_max} V_{res_Sigma}^{-2}$$

Критичне значення витрат для створення заявки на поповнення:

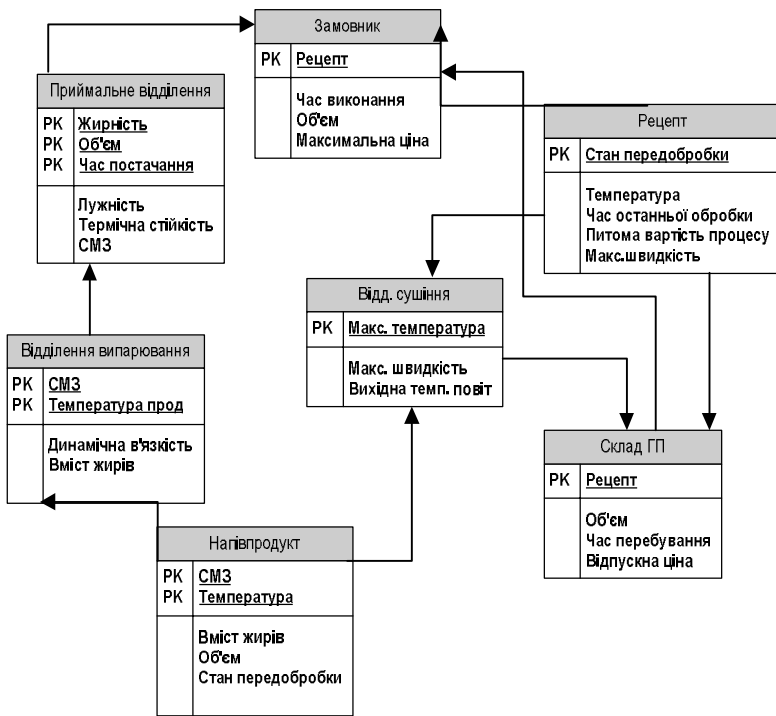
$$dI_R = dI_{sklad} - F_{res_j}^* \dot{F}_{prod_ch_max} V_{res_Sigma}^{-1} \int_{V_{res_j}^*}^{F_{prod_i} k_{Fres} \tau_{ag_prod_i} + V_{res_j}^*} f(x) dx. \quad (47)$$

Умову, що попереджає невиконання замовлень визначаємо як:

$$F_{prod_i}^k F_{res} \tau_{ag_prod_i} + V_{res_j}^* \int_{V_{res_j}^*} (x - V_{res_j}^*) f(x) dx > 0, \\ \exists V_{res_j} \geq (2dI_R \dot{F}_{prod_ch_max} dI_{sklad}^{-1})^{0.5}. \quad (48)$$

У розділі наведено приклад розрахунку оптимальної партії молока та критичного рівня ресурсу з умовами альтернативних маршрутів переробки, де визначено розмір на його замовлення, за мінімізації кількості звернень.

Розроблений метод прийняття рішень людиною-оператором дозволяє передбачати ситуації для асортиментного виробництва у випадку зміни інформаційної моделі технологічного комплексу (рис. 8). За час робочої зміни оператора, через динаміку когнітивного сприйняття особи, що приймає рішення, накопичення помилок відбувається за рахунок додаткового збільшення промахів у довизначенні меж та параметрів алгоритму оцінки стану (розділ 4), на час керування режимом τ_{prod_i} .



У відповідності до термінів T_{e_i} отримання висновку та оцінки належності $Y_r = \mu_{S_{st}}$ для визначених станів $S_{st}, st \in M$ його функції, за відношенням до оцінюваного задачею стану об'єкта, прийнято стратегію з мінімальною складністю перебудови відносно песимізму $Y_r = L(Y_r, S_{st}) - \min_S L(Y_r, S_{st})$, (49)

як найбільш диференційовану за різницею між отриманим значенням критерію

Рис. 8 Модель інформаційних зв'язків операторського місця молочного виробництва

$L(Y_r, S_{st})$ та найбільш спостережною за обраною метрикою. Наступне видалення із множини не прийнятих альтернатив призводить до обрання підтверженого рішення у вигляді:

$$Y_r = \min_Y \min_S (L(Y_r, S_{st}) - \min_S L(Y_r, S_{st})). \quad (50)$$

Відносно статичної точності, передбаченої технологічно, інтервал перевизначення стану S^H пов'язаний із необхідністю заміни параметра, через альтернативу e_i у структурі графу G_{prod_i} :

$$\forall \text{var} \Delta g_{e_i}(t) \neq 0, g_e \notin G_{\text{prod}_i} : e_i \neq \phi(\Delta g_{e_i}). \quad (51)$$

Якщо оператор виправляє помилку у визначений спосіб $u_k \notin U$ n -ту кількість разів протягом $\tau_{S_{st}}$, то спосіб приймаємо як необхідний для довизначення параметрів за суміжними процесами технологічного комплексу.

Для виявлення тренду змінних процесів технологічного комплексу використаємо рекурсивний метод кумулятивних сум, де

$$\Delta y_{S(ca)} = \sum_{i=1}^n \left(\int_{\tau_{S_{st}i}}^{\tau_{S_{st}(e_i)}} y d\tau - y^*_0(e_i) \right) \quad (52)$$

слідкує за дотриманням

$$\Delta y_{S(ca)} < \lim \Delta y^*_S, \forall ca, \quad (53)$$

що відповідає за ідентифікацію тренда, відмінного від статичного режиму S_{st} .

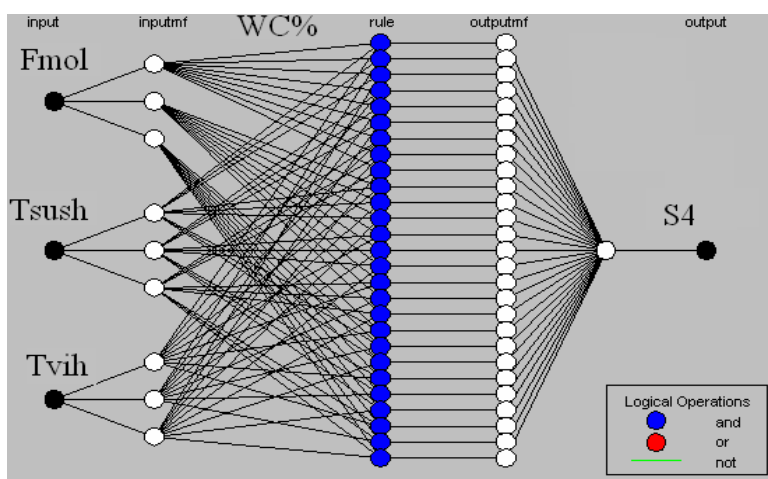


Рис. 9 Багатоаспектна структура мережі прийняття рішень технологічного комплексу молочного виробництва

Багатоаспектна структура мережі прийняття рішень (рис. 9) є актуальною через природу математичної моделі, що визначає розв'язки для нижчих рівнів керування та дозволяє виключити наявність ситуацій глухого кута у множині альтернативних висновків, подібно до представленої моделі на основі мережі Петрі.

Так, використання соціальної стохастичності поведінки оператора розв'язує задачу невизначеності та багатозадачності для обрання безальтернативних висновків.

У шостому розділі «**Результати експериментальних досліджень та промислової експлуатації**» визначено характеристики програмних засобів, що задовольняють вимоги реалізації задач, представлених у роботі. Зокрема, необхідність у залученні математичних бібліотек для інтеграції у середовище Matlab, умови для перевантаження функцій під час виконання алгоритмів, вимоги до спряження інтерфейсів програмного середовища, точність для типів використовуваних змінних, налаштування режимів роботи із пам'яттю комп'ютера, режими використання ОРС-сервісів для інтеграції інформаційних зв'язків. Обґрунтовано ідеологію залучення програмних додатків для аналізу ситуацій в об'єкті та спостереження за станом виконання процесів.

Досліджено застосування методу оптимізації інваріантів гібридної мережі для зменшення допустимої похибки δ_{yi} до втрати стійкості та збільшення її до

спрацювання за пріоритетом для інваріанти часу T_{e_j} . Апріорне дослідження характеристики функціоналу мети дозволило визначити умови оптимізації для мінімальної кількості звернень до оцінки похідних цільової функції; умови для забезпечення адекватної збіжності та статичної точності розв'язку для цільової функції. Визначено, що кількість обчислювальних кроків розв'язання задачі є функцією від її розмірності, що відповідає за її алгоритмічну складність та часткову інваріантність до методу розв'язання.

В результаті дослідження алгоритмів оптимізації ТЗДВ «Миргородський хлібозавод» для режиму печі ФТЛ-2-66 з горілкою ELCO 450 кВт встановлено можливість зниження потужності теплового потоку в процесі випікання хлібної продукції шляхом керування положенням шибєрних заслінок та часом роботи пальника топкової камери, що зменшує вихід браку продукції на стадії завантаження та вивільнення печі на 3,2 % від об'єму партії хліба.

Для системи керування групою водогрійних котлів Полтавського обласного комунального виробничого підприємства теплового господарства «Полтаватеплоенерго», що забезпечує задачі опалення та гарячого водопостачання, було застосовано алгоритм оптимального керування режимними параметрами для процесів виробництва теплоносія; метод параметричної оптимізації процесу керування для зниження енергетичних витрат та реалізації обмежень по завданню; алгоритм реалізації багатовимірної керування – для зменшення часу перехідних процесів, що дозволили забезпечити статичну помилку встановлення температури теплоносія – 4 %, зменшений час регулювання – 51 %, під час керування за зміною завдання; економію витрат до 2,8 % по задачі, від затрати на перехідний процес. В результаті активного експерименту на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» забезпечено умови для зменшення температури основного потоку сушильного агента на 8 °С. Підтверджується ефективність алгоритму багатопараметричного керування для сушіння молока знежиреного, незбираного та вершків сухих, відповідно до складу сировини за ДСТУ4273:2003. Підтверджується ПрАТ «Карлсберг-Україна» економічний ефект від впровадження моделі оновлення ресурсів для багатоасортиментних виробництв, через мінімізацію логістичних витрат використання складу та постачання на 10,7 %, що у кошторисі 2016–2017 рр. склало 460 тис. грн, а також зменшення помилкових рішень на 18,2 % від загальної їх кількості, за рахунок впровадження системи підтримки прийняття рішень. Підтверджено ТОВ «Унітехнології ЮЕЙ» ефективність методу оцінки стійкості для гібридних систем керування, що дозволяє врахувати запас стійкості за фазою керування на 7,4 %, а також системи із залученням критерію оптимізації щодо енергозбереження, де ефективність процесів теплоенергетичного устаткування, поряд із застосуванням режимом, була збільшена на 2,7 % та за підсумком 2016 року склало 120 тис. грн. Підтверджується адекватність методів і моделей та отримано рекомендацію від Об'єднання хлібопекарських підприємств України «Укрхлібпром» до впровадження на підприємствах хлібопекарської промисловості України, для підвищення ресурсо- та енергоефективності хлібопекарських комплексів.

Для оцінки стійкості керування гібридної системи нелінійних динамічних складових типом досліджується досяжність відносно стійких станів або залучення класичних методів оцінки стійкості як для динамічних систем, де простір оцінювання обмежений відсутністю розривних моментів для визначення стану керованої системи. Так, процес довизначення режимів зміни стану системно не досліджувався, а оцінка стійкості за поєднання диференціальних та дискретних частин моделі в єдиній системі керування залишається неефективною.

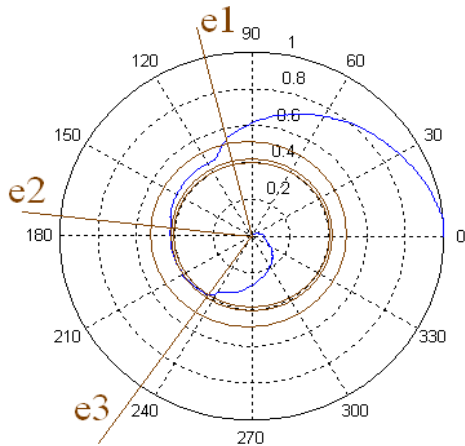


Рис. 10 Оцінка стійкості однієї проекцій руху фазової траєкторії гібридної системи

Для врахування фази дискретного довизначення використовуємо поєднання оцінок за функціями Ляпунова та проєкцій Пуанкаре (рис. 10). Функціями Ляпунова визначимо стійкість як інваріантну відносно множини суміжних функцій простору станів уздовж траєкторій відгуку вихідних змінних системи. Для чого забезпечимо контроль подій дискретного часу e'_i шляхом аналізу похідних для неперервного простору (періодичні орбіти) як проєкції Пуанкаре у визначені моменти часу.

Так, стійкість послідовності подій ставимо у відповідність стійкості неперервної системи, що має сходитись пізніше за гібридну послідовність подій на T_{e_n} , де для гладких динамічних оцінок здійснюємо згортання проєкцій фазової траєкторії до вигляду полігональних карт для окремих координатних рухів.

ВИСНОВКИ

У дисертації здійснено теоретичне узагальнення та комплексне розв'язання науково-прикладної проблеми розроблення та практичного застосування методів і моделей управління складними технологічними об'єктами в умовах зміни режимів роботи, характеристик сировини та функцій оперативного персоналу для забезпечення регламентованих характеристик продуктів та підвищення ефективності багатоасортиментного виробництва, що має важливе значення в галузі технічних наук.

1. Головними причинами зменшення ефективності систем керування багатоасортиментним виробництвом типових технологічних комплексів визначено неадекватність математичних моделей об'єктів керування, невиконання динамічних обмежень на зміну параметрів зазначених моделей, часткова спостереженість об'єктів керування.

2. Системотехнічний аналіз особливостей конструкції та режимів роботи типових технологічних комплексів харчової промисловості доводить

необхідність та доцільність застосування гібридних систем керування для розширення характеристик продуктів переробки.

3. У результаті аналізу оцінювання ефективної гнучкості виробничого комплексу визначено відповідність між асортиментом та прибутком за розміром інвестицій на його забезпечення, в умовах виробництва, що існує.

4. Застосування розроблених математичних моделей з гібридною будовою розривного типу для оцінювання цільової змінної процесу багатоасортиментного виробництва, забезпечує зменшення помилки. Для процесу випарювання фруктових концентратів зменшення помилки оцінювання втрати розчинника при керуванні виробництвом склало 12,3 % по відношенню до раніше використовуваної.

5. У результаті оцінювання режимів функціонування теплоенергетичної системи сушіння молочних продуктів щодо енергозбереження, визначено переваги використання критерію оптимізації для керування координатами стану об'єкта та виконання технологічних обмежень. З аналізу застосування критерію, за змінюваної розмірності залучених координат стану об'єкта в системі керування визначено збільшення ефективності щодо енергетичних витрат на 2,7 % по відношенню до використовуваного режиму керування.

6. Для класу частково керованих технологічних процесів, із напіввизначеними обмеженнями керування, встановлено еквівалентність розв'язків задачі максимальної швидкодії та задачі мінімізації енергетичних витрат. Застосування розробленого методу динамічно обмеженої реалізації керування, на основі обернених задач динаміки, дозволяє поєднати задачі виконання крайових умов для показників мінімізації динамічної помилки та швидкодії для систем автоматизації з обмеженими ресурсами. За оцінкою результатів впровадження, за встановлених обмежень визначено забезпечення стійкості та помилки керування тепловим режимом на 3,9 % (8 °C під час процесу сушіння).

7. Розроблена гібридна структура керування процесом випікання хлібобулочної продукції дозволяє реалізувати розширення меж зміни характеристик продуктів. На відміну від використовуваних, вдосконалений метод оптимізації гібридних моделей, за рахунок інформаційної надлишковості, дозволяє зменшити жорсткість та розв'язати задачу «блукання» під час зміни режиму керування. Зменшенням жорсткості під час зміни режиму забезпечується зменшення часу перехідного процесу на 51 % та втрати готового продукту на 3,2 % від об'єму партії.

8. Застосування розробленого методу підтримки прийняття рішень людини-оператора із врахуванням ситуаційного підходу та динаміки когнітивного сприйняття дозволяє довизначити функції оперативного персоналу, зменшити кількість помилкових рішень та виключити ситуації глухого кута. Аналіз використання розробленого методу підтримки прийняття рішень на прикладі системи підтримки прийняття рішень оператором технологічного відділення пивзаводу дозволяє зменшити кількість помилок на 18,2 % від загальної їх кількості.

9. Забезпечення ресурсів виробництва із врахуванням змін виробничого плану вимагає використання моделі оновлення ресурсів, яка враховує сталі часу на їх залучення, динаміку споживання та кількість запитів на постачання. Так використання розробленої моделі зазначеного класу для керування забезпеченням виробництва асортименту пиво-безалкогольних напоїв дозволяє збільшити ефективність мінімізації логістичних витрат використання складу та постачання на 10,7 %.

10. Для непрямой оцінки стану під час розв'язання задачі супроводження об'єкта із частковою невизначеністю доведено необхідність вдосконалення методу довизначення траєкторії керування. Відмінність методу довизначення із горизонтом прогнозу, що відступає, через адаптацію за приростом помилки та керувальної дії на черговому кроці дозволяє зменшити помилку керування для процесу водопостачання та опалення на 4 ° С.

11. Для спрощення умов аналізу динамічної поведінки у задачах оцінки стійкості системи керування використанням функцій Ляпунова встановлено необхідність вдосконалення методу врахуванням фази дискретного довизначення. Використання вдосконаленого методу оцінки стійкості гібридних систем керування дозволяє врахувати запас стійкості для визначеного класу систем за фазою керування із розрахунком зменшення тривалості перехідного процесу на 7,4 %.

12. Дослідні випробування підтвердили ефективність застосування розроблених методів та моделей через зниження енергетичних витрат на реалізацію завдання, зменшення часу перехідних процесів та втрат готового продукту, зменшення витрат на використання складу, що засвідчено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Ладанюк А. П., Ладанюк О. А., Бойко Р. О., Іващук В. В., Кроніковський Д. О., Шумигай Д. А. Сучасні методи автоматизації технологічних об'єктів: [монографія]. К., 2015. 408 с. *(Здобувачем запропоновано використання мережі Петрі для реалізації зміни режиму виробничої системи; алгоритм багатомірної керуючої системи для подолання браку ресурсів керування; прогнозуючого алгоритму з відступаючим фронтом для подолання проблем керування повільними процесами з транспортним запізнюванням).*

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Іващук В. В., Пономарьов Я. Ю., Ладанюк А. П. Досвід використання нечітких регуляторів в системах автоматизації випарної установки. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. 2006. № 2 (18). С. 150–153. *(Здобувачем досліджено ефективність реалізації непрямого позиційного керування об'єктом випарної установки при змінюванні режимів її роботи).*

3. **Іващук В. В.**, Васьків М. В. Моніторинг якості керування технологічним агрегованим виробництвом. Вісник Вінницького політехнічного університету. 2011. № 4. С. 23–27. *(Здобувачем запропоновано встановлення зв'язку у розв'язанні системної задачі дискретних операцій конвеєра та технологічного виробництва, шляхом організації подійно-орієнтованого керування через формалізацію умов та подій).*

4. **Іващук В. В.**, Беляєв Ю. Б., Васьків М. В. Новий підхід до розв'язання задачі моніторингу активності параметрів процесу виробництва ПЕТ-пляшок. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2011. № 4/4 (52). С. 11–13. *(Здобувачем запропоновано визначення частково спостережної системи для підвищення ефективності визначення стану технологічної системи).*

5. **Іващук В. В.**, Беляєв Ю. Б., Смітюх Я. В. Особливості практичної експлуатації багатоасортиментних комплексів харчових виробництв. Науково-технічна інформація. 2011. № 3 (49). С. 51–54. *(Здобувачем оцінено динаміку елементів автоматизації перехідних режимів при реалізації керування в механізованих системах).*

6. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Розробка алгоритму реалізації виробничого плану в задачах підтримки асортиментного продукту. Науково-технічна інформація. 2014. № 4. С. 35–40. *(Здобувачем розглянуто створення структурної моделі прийняття рішень із залученням всіх активних підрозділів процесу, що мають вплив на цільові характеристики продукту).*

7. **Іващук В. В.**, Беляєв Ю. Б. Структурування управляючих концептів прийняття рішень в умовах асортиментного виробничого плану. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2015. Вип. 28. С. 274–278. *(Здобувачем запропоновано використання моделей для узгодження мінімальних кроків при зміні технології продукту).*

8. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Методологічні концепції розвитку керування багатоасортиментними технологічними виробництвами. Харчова промисловість. 2015. № 18. С. 142–146. *(Здобувачем запропоновано концепцію керування багатоасортиментним виробництвом на прикладі процесу розігріву печі, з супроводженням відхилень за моделлю, що реалізована з урахуванням порядку часових відносин, для повільних динамічних процесів).*

9. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Адаптивна оптимізація для задачі мінімізації витрат багатоасортиментного виробництва. Харчова промисловість. 2016. № 19. С. 125–129. *(Здобувачем запропоновано методіку оптимізації витрат під час перехідного процесу до режиму встановлення параметрів технологічної системи; представлено аналіз складових системи оптимізації; обґрунтовано метод вибору реалізації вектору мети для керування).*

10. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Мінімізація витрат енергії під час реалізації змін продуктового асортименту. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2016. Вип. 29. С. 192–196. *(Здобувачем запропоновано використання спостережної покоординатної оцінки зміни стану об'єкта, що мінімізує динамічну похибку та в результаті керування тепловими агрегатами призводить до*

статистичного зменшення втрат енергії при змінюванні технологічних режимів).

**Статті у наукових фахових виданнях України,
включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

11. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Структурування керувальних концептів прийняття рішень в умовах асортиментного виробничого плану. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2014. Т. 20. № 6. С. 8–13. *(Здобувачем запропоновано використання вартісно-часової концепції внесення пропозицій із вдосконалення виробничого маршруту та виробничого плану, в залежності від завантаженості виробництва, заявлених характеристик продукту).*

12. **Ivashchuk V.**, Ladaniuk A. Definition of depth for flexibility of technological system. Ukrainian Journal of Food Science. 2015. Vol. 3. Issue 2. P. 233–242. *(Здобувачем представлено методику визначення ефективної глибини гнучкості для вирішення задач багатоасортиментного виробництва в межах існуючого технологічного комплексу, з метою коригування виробничого плану; вказано на методику створення проєкції характеристик замовлення в глибину варіацій технічних характеристик виробничої системи з використанням матричного аналізу та багаторазової послідовної класифікації діаграми Парето).*

13. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Розробка і дослідження моделі сушіння молочних продуктів для задачі гарантованого управління регламентом. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2015. Т. 21. № 5. С. 7–16. *(Здобувачем розроблено методику створення моделі сушіння молочних продуктів, що може використовуватися для задачі гарантованого керування; визначено порядок дій з розроблення математичної моделі, характеристики обмежень і прийнятний апарат математичного наближення).*

14. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Використання моделей для ковзного режиму керування в умовах асортиментного виробництва. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. Т. 22. № 2. С. 7–14. *(Здобувачем розроблено методику побудови алгоритму ковзного керування для об'єктів, які вимагають упередженого прогнозу за моделлю з використанням робастного підходу).*

15. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П., Бойко Р. О., Савчук О. В. Методи ситуаційного керування багатоасортиментним виробництвом. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. Т. 22. № 3. С. 25–30. *(Здобувачем обґрунтовано комплексний підхід для прототипів «ситуація-дія», окреслено вимоги до умов застосування ситуаційного керування для багатоасортиментних виробництв; визначено порядок формування ситуаційних агентів для формалізації поведінки системи; акцентовано увагу на умови дотримання обмежень на сировину, енергетичні ресурси, об'єми та якість продукції для ситуаційного керування).*

16. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Забезпечення стійких розв'язків у задачах керування інерційними багатопараметричними об'єктами. Наукові

праці Національного університету харчових технологій. 2016. Т. 22. № 5. С. 7–14. *(Здобувачем визначено порядок формування гарантованого керування для забезпечення оптимальної, відносно інтегральної оцінки, стратегії для багатопараметричних об'єктів; для змінюваної параметричної траєкторії здійснено переоцінку сукупності корельованих координат стану, що забезпечує незміщеність інтенсивності керування відносно статичної норми моделі об'єкта).*

Статті у наукових виданнях інших держав:

17. **Иващук В. В.**, Журавльова Л. В. Автоматизированное управление промышленным производством хлебо-булочного ассортимента. Научни трудове на русенския університет. 2012. Серия 9.2. Т. 51 С. 36–39. *(Здобувачем вказано на обмеженість необхідних ресурсів із прискорення перехідних процесів при зміні теплових режимів промислових печей; запропоновано здійснення зв'язаного регулювання зонами випічки, відповідно до апріорних даних про характеристики тістової заготовки та стану випікання).*

18. **Иващук В. В.**, Бойко Р. О., Ладанюк А. П. Нечёткая когнитивная карта для анализа функционирования технологического комплекса. Оралдың ғылым жаршысы. 2014. № 40 (119). С. 25–30. *(Здобувачем представлено методику підготовки системи прийняття рішень для реалізації оперативного втручання в процес багатоасортиментної переробки та змінювання режимів виробництва).*

19. **Ivashchuk V.**, Ladanyuk A., Yechkalov D. Features of temperature regulation as a task for assortment of bread baking. Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies. 2014. № 3. С. 102–105. *(Здобувачем запропоновано багатовимірний алгоритм керування з прогнозом для підвищення статичної точності керування процесом випікання хлібної продукції).*

20. **Иващук В. В.**, Ладанюк А. П., Ечкалов Д. В. Особенности управления разогревом хлебопекарной печи при подготовке ассортиментного производства. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2014. № 5–6. С. 73–76. *(Здобувачем представлено порядок реалізації керувальних дій в промисловій випічці, з врахуванням обмежень на параметри випікання продукту та нелінійний характер зміни тепло-парового режиму об'єкта).*

21. **Иващук В. В.**, Ладанюк А. П. Автоматизированное управление многоассортиментным производством сухих молочных продуктов. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2016. № 1. С. 85–88. *(Здобувачем запропоновано керування процесом сушіння молочних продуктів з використанням прогнозуючих моделей керування).*

Стаття у науковому виданні,

включеному до міжнародних наукометричних баз даних:

22. **Иващук В. В.**, Васьків М. В. Моніторинг та керування якості продукції агрегованих технологічних комплексів харчових виробництв. Складні системи і

процеси. 2010. № 1. С. 77–83. *(Здобувачем отримано структуру системного оцінювання характеристик продукту через діяльність системи керування на рівні конкретних координатних зрушень, що становлять першопричини відхилень у регламенті продукту).*

Статті в інших наукових виданнях:

23. **Іващук В. В.**, Пупена О. М., Луцька Н. М. Використання моделі та схеми інформаційних потоків при розробці автоматизованих систем управління технологічними процесами на прикладі мереж Modbus. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2008. № 5/3 (35). С. 16–23. *(Здобувачем представлено методика функціонально-орієнтованої розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування, що пов'язує задачі керування у суміжних підсистемах).*

24. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П., Луцька Н. М. Системи автоматизації технологічних об'єктів у структурі комп'ютерно-інтегрованого управління технологічними комплексами харчових виробництв. Енергетика і автоматика. 2009. № 1. Режим доступу до статті: http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/eia/2009_1/index.htm. *(Здобувачем запропоновано економічно-обґрунтований підхід до розроблення комп'ютерно-інтегрованого керування виробничими системами, що зв'язані за зовнішнім та внутрішнім продуктами, з оцінкою впливу втрати якості при змінювані режиму за обраними критеріями).*

25. **Іващук В. В.**, Швець В. В. Автоматизоване управління процесом випарювання асортиментних продуктів харчової промисловості. Науково-технічна інформація. 2016. № 2. С. 48–51. *(Здобувачем представлено систему керування за моделлю процесом попереднього вакуумного випарювання з використанням асимптотичного спостерігача, що дозволяє уточнювати відступаючий фронт прогнозу для теплового об'єкту з незадовільною динамікою в каналі керування).*

Патенти України на корисні моделі:

26. Власенко Л. О., Ладанюк А. П., **Іващук В. В.** Патент України на корисну модель 30556 Україна. МПК (2006) G05B 13/04. Підсистема підтримки прийняття рішень для керування технологічними комплексами. Національний університет харчових технологій. № 200713857; заявлено 10.12.07; опубліковано 25.02.08; Бюл. № 4. 2 с. *(Здобувачем запропоновано ситуаційне керування на підставі експертних оцінок для здійснення процесу зміни режиму технологічного комплексу).*

27. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Патент України на корисну модель 107723 Україна. МПК (2006.01) G05B 19/04. Система автоматичного управління піччю для виробництва хлібопекарських та кондитерських виробів. Національний університет харчових технологій. № 201511320; заявлено 17.11.15; опубліковано 24.06.16; Бюл. № 12. 5 с. *(Здобувачем запропоновано каскадну систему автоматичного керування за локалізованими моделями*

розігріву для хлібопекарської печі, що реалізується через забезпечення багатопараметричного впливу на теплові потоки печі).

28. Ладанюк А. П., **Іващук В. В.**, Швець В. В. Патент України на корисну модель 120597 Україна. МПК (2017.01) A23C 1/00, F26B 21/10, МПК (2006.01), F26B 25/00. Спосіб регулювання виробництва молочних продуктів. Національний університет харчових технологій. № 201705026; заявлено 24.05.17; опубліковано 10.11.17; Бюл. № 21. 5 с. *(Здобувачем запропоновано методику оптимізації втрат під час перехідного процесу до режиму встановлення параметрів технологічної системи; представлено аналіз складових системи оптимізації; обґрунтовано метод вибору реалізації вектору мети для керування).*

Тези наукових доповідей:

29. **Іващук В. В.**, Васьків М. В. Концептуальні основи управління якістю складними технологічними комплексами харчової галузі. Контроль і управління в складних системах «КУСС-2010»: X Міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 19–21 жовтня 2010 року: тези доповіді. Вінниця, 2010. С. 255–256. *(Здобувачем представлено концепцію підготовки подійно-орієнтованого керування характеристиками кінцевого продукту; вказано на необхідність забезпечення ритмічності виробничого потоку, динаміки перехідних режимів, зміни продуктивності та технологічної карти виробництва, як системної задачі виробництва).*

30. Іващук В. В. Повышение эффективности технологического комплекса многоассортиментного производства хлеба. Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: Международная научно-практическая конференция, г. Минск, Республика Беларусь, 14–15 апреля 2011 года: тезисы доклада. Минск, 2011. С. 62–64.

31. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Особливості автоматизованого керування режимами випікання хлібної продукції. Автоматика – 2011: XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Львів, 28–30 вересня 2011 року: тези доповіді. Львів 2011. С. 213. *(Здобувачем визначено структуру зв'язаних параметрів процесу випікання хлібної продукції, що допомагає встановити крайові умови при розв'язанні задачі мінімізації витрат енергії).*

32. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Ефективне керування технологічним процесом виготовлення асортименту хлібобулочної продукції. Автоматика – 2012: XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 26–28 вересня 2012 року: тези доповіді. К., 2012. С. 163. *(Здобувачем запропоновано методику керування температурно-паровим режимом печі при зміні її навантаження з метою мінімізації витрат енергії; встановлено, що динаміка режиму обмежена структурою продукту, а тому є необхідність у регулюванні розподілом енергії вздовж технологічної лінії).*

33. Іващук В. В. Особливості моделювання технологічних об'єктів багатоасортиментних виробництв. Автоматика – 2014: XXI Міжнародна конференція з автоматичного управління, присвячена 100-річчю з дня

народження академіка НАН України О. І. Кухтенка, м. Київ, 23–27 вересня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 258–259.

34. **Іващук В. В.**, Швець В. В. Моделювання багатоасортиментного виробництва сухих молочних продуктів. Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості: Міжнародна наукова конференція, присвячена 130-річчю Національного університету харчових технологій, м. Київ, 13–16 жовтня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 27. *(Здобувачем представлено розв'язання задачі стабілізації процесу розпилювальної сушильної установки за зміни характеристик сировини з використанням ситуаційного підходу).*

35. **Ivashchuk V.**, Ladaniuk A. Algorithm for Decision Support in the Task of Control System of Industries with Variable Assortment of Products. Контроль і управління в складних системах «КУСС-2014»: XII Міжнародна конференція, м. Вінниця, 14–16 жовтня 2014 року: тези доповіді. Вінниця, 2014. С. 29. *(Здобувачем запропоновано формалізацію логіки дій оперативного персоналу, пов'язаного з продуктом, для супроводження за технологічною картою поведінки оператора, з метою зменшення впливу людського фактору у випадку зміни режимів асортиментного виробництва).*

36. Іващук В. В. Спрощення математичних моделей для керування складними об'єктами з асортиментними продуктами. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 27 листопада 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 234.

37. Іващук В. В. Координація мети керування, як засіб економії енергії багатоасортиментного виробництва. Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності: IV Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція, м. Київ, 8 вересня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 189.

38. Ladaniuk A., **Ivashchuk V.**, Kisala P., Askarova N., Sagymbekova A. Algorithm for decision support as the tool for control system of industries with variable assortment of products. Optical Fibers and Their Applications. 2015. 5 p. *(Здобувачем запропоновано використання ситуаційного підходу до вивчення когнітивної поведінки людини-оператора під час здійснення диспетчерського керування технологічним комплексом).*

39. **Іващук В. В.**, Ладанюк А. П. Використання багатопараметричного керування для сушіння асортименту продуктів колонної сушарки. Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукраїнська науково-практична конференція до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу Харківського державного університету харчування та торгівлі, м. Харків, 29 жовтня 2015 року: тези доповіді. Х., 2015. С. 55–56. *(Здобувачем визначено характеристики об'єкта, що впливають на його динаміку та обмеження в реалізації керування, що виключають втрату якості продукту поряд з іншими, запланованими метою керування, задачами;*

запропоновано реалізацію гібридного автомата для зміни режимів виробництва).

40. Ivashchuk V. V. Development of control systems for multi-product technological plant. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами: II Міжнародна науково-технічна Internet-конференція, м. Київ, 25 листопада 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 107–108.

41. Іващук В. В. Системи керування технологічним асортиментом. Інформатика, математика, автоматика: науково-технічна конференція, м. Суми, 18–22 квітня 2016 року: тези доповіді. Суми, 2016. С. 205.

42. **Ivashchuk V.**, Ladaniuk A. Features of control for multi-assortment technological process. Systems, Control and Information Technology – 2016: Industrial Research Institute for Automation and Measurements PIAP, 20–21.05.2016: book of abstracts. Warsaw, Poland, 2016. P. 40. *(Здобувачем визначено особливості реалізації багатомірного керування в технологічних об'єктах керування).*

43. Ivashchuk V. V. Developing criteria for optimization of multiproduct processes for task of control of regimes. 8th Central European Congress on Food 2016, 23–26 May 2016: book of Abstracts. Kyiv, 2016. P. 57.

44. Іващук В. В. Оптимізація багатомірного керування зі зміною параметричної траєкторії. Автоматика – 2016: XXIII Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 22–24 вересня 2016 року: тези доповіді. Суми, 2016. С. 258–259.

45. Іващук В. В. Ідентифікація багатомірного об'єкта у задачах асортиментного виробництва. Автоматика – 2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 13–15 вересня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 36–37.

46. **Іващук В. В.**, Шевчук М. М. Інтелектуальне керування технологічним комплексом багатоасортиментного виробництва молочних продуктів. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами: IV Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція, м. Київ, 22 листопада 2017 року: тези доповіді. К., 2017 С. 134. *(Здобувачем запропоновано порівняльний аналіз результатів роботи алгоритмів прийняття рішень оперативного персоналу для супроводження багатоасортиментного виробництва).*

АНОТАЦІЯ

Іващук В. В. Автоматизоване управління технологічними комплексами з виробництва багатоасортиментної продукції. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2018.

У дисертації розв'язується науково-прикладна проблема підвищення ефективності багатоасортиментного виробництва харчових продуктів із формалізацією та практичним застосування методів та моделей керування складними технологічними об'єктами в умовах зміни режимів роботи, характеристик сировини та функцій оперативного персоналу для забезпечення регламентованих характеристик продуктів.

В роботі виокремлено причини неефективного застосування систем керування багатоасортиментними технологічними комплексами. Здійснено синтез гібридних структур та встановлено порядок їх інтеграції у системі керування. Запропоновано методику оптимізації рішень людини-оператора з урахуванням ситуаційного підходу та динаміки когнітивного сприйняття. За допомогою методів математичного програмування розв'язано задачу забезпечення ресурсів керування. Для розв'язання задачі супроводження об'єктів із частковою невизначеністю представлено умови застосування непрямой оцінки стану об'єкта та прогнозування з обмеженим горизонтом. Вдосконалено методику оцінки стійкості для гібридних систем керування з використанням полігональних карт та часткових оцінок функцій Ляпунова, що дозволяє ефективно оцінити стійкість для багатопараметричних режимів динамічних об'єктів із диференційованими характеристиками динаміки каналів керування.

Проведено дослідне випробування алгоритмів для процесів керування типовими технологічними комплексами, отримано результати зі зниженням енергетичних витрат та реалізації обмежень за завданням, зменшено час перехідних процесів. Результати роботи підтверджено актами, патентами.

Ключові слова: автоматизація, технологічні комплекси, багатоасортиментні виробництва, оптимізація, стійкість, максимальна швидкодія, гібридні структури, харчова промисловість.

АННОТАЦІЯ

Иващук В. В. Автоматизированное управление технологическими комплексами по производству многоассортиментной продукции. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 «Автоматизация процессов управления». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы повышения эффективности многоассортиментного производства пищевых продуктов, путем формализации и практического применения методов и моделей управления сложными технологическими объектами в условиях изменения режимов работы, характеристик сырья и функций оперативного персонала для обеспечения регламентированных характеристик продуктов.

Каждый шаг по увеличению ассортимента пищевой отрасли предусматривает сложную производственную подготовку технологии, а

процесс его реализации – технического переоснащения производства. Для многоассортиментных технологий возникает необходимость в создании новых методов управления, основанных на процессах, которым свойственен характер их изменчивости. Анализ качества функционирования систем управления производствами, приспособленных к ассортиментным продуктам, указывает на отсутствие какой-либо комплексной методологии, способной обеспечить предсказуемое качество технологических производств при изменяемых режимах работы и характеристиках обработки сырья, отсутствие методики эффективного использования ресурсов, в частности энергетических, в случае изменения ассортимента производства. Для многоассортиментных технологий возникает необходимость в создании новых методов управления, основанных на процессах с соответствующим характером их изменчивости, в сочетании с современными подходами к решению оптимизационных задач, которые предусматривают повышение ресурсо- и энергоэффективности производства в целом.

Таким образом, разработка и практическое применение методов и моделей управления сложными технологическими объектами в условиях изменения режимов работы, характеристик сырья и функций оперативного персонала для обеспечения регламентированных характеристик продуктов и повышения эффективности многоассортиментного производства является актуальной научно-прикладной проблемой, определяющей направление исследований диссертации. Источником проблемы определена эволюция методов управления от получения прибыли за эффективность по увеличению объемов, к доходам от увеличения ассортимента, поскольку существующие методы решения задачи потеряли адекватность относительно точности получаемых результатов, имеют неопределенность с их классической формализацией.

В работе выделены причины неэффективного применения систем управления многоассортиментными технологическими комплексами. Выделен класс систем управления, способных обеспечивать расширение характеристик продуктов переработки, определено их место среди традиционных систем. Обоснованы методы повышения качества продукции, снижения удельных затрат энергии и потерь сырья, обеспечивающих решение поставленных задач в условиях ограниченных затрат ресурсов, за счет уменьшения динамической погрешности управления во время переходных процессов. Обоснована методика построения критериев оптимизации управления по энергосбережению, с учетом ограничений на его реализацию и фазовые координаты, где установлен экстремальный характер зависимости величины энергетических затрат. Осуществлен синтез гибридных структур и установлен порядок их интеграции в системе управления. Предложенная методика оптимизации решений человека-оператора, с учетом ситуационного подхода и динамики когнитивного восприятия, уменьшает количество ошибочных решений в условиях многоассортиментного производства. С помощью методов математического программирования решена задача обеспечения ресурсов управления для изменения режима производства, которая позволяет

минимизировать потери складского обеспечения и логистики. Для решения задачи сопровождения объектов с частичной неопределенностью представлены условия применения косвенной оценки состояния объекта и прогнозирования с ограниченным горизонтом. Для класса частично управляемых технологических процессов, с полуопределенными ограничениями управления установлена эквивалентность решений задач максимального быстродействия и минимизации энергетических затрат. Усовершенствована методика оценки устойчивости для гибридных систем управления с использованием полигональных карт и частичных оценок функций Ляпунова, что позволяет эффективно оценить устойчивость для многопараметрических режимов динамических объектов с дифференцированными характеристиками динамики каналов управления. Проведено опытное испытание алгоритмов для процессов управления типичными технологическими комплексами, получены результаты со снижением энергетических затрат и реализацией ограничений по заданию, уменьшению времени переходных процессов. Результаты работы подтверждены актами, патентами.

Ключевые слова: автоматизация, технологические комплексы, многоассортиментные производства, оптимизация, устойчивость, максимальное быстродействие, гибридные структуры, пищевая промышленность.

ANNOTATION

Ivashchuk V. V. The automated control of technological complexes for produce of multi-assortment products. – The Manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.07 Automation of Control Processes. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2018.

The dissertation solves a scientific and applied problem of development and practical application of methods and models of complex technological objects control in conditions of changing modes of operation, characteristics of raw materials and functions of operational personnel for to produce the product characteristics that response to reglament and increase the efficiency of multi-assortment production. For multi-assortment technologies, there is a need to create new control methods by based on processes that appropriate of nature of their variability. The method of control optimization criteria constructing for energyefficiency which include the restrictions of its implementation and phase coordinates, which the extreme nature of dependence of energy value has been established, has been substantiated. The synthesis of hybrid structures has been done and the order of their integration in the control system has been established. The method for optimization of human-operator solutions that taking into account the situational approach and the dynamics of cognitive perception, which reduces the number of false solutions during multi-assortment production has been proposed. The task of providing control resources for changing the mode of production, which minimizes the losses of warehouse supply and logistics, has been solved by the mathematical programming methods. The conditions for indirect estimation of object state and forecastion that have limitation of

horizon are presented in order to solve the task of maintenance of objects with partial uncertainty. The method for hybrid control systems stability estimating has been improved, which allows to effectively evaluating the stability for multi-parametric modes of dynamic objects with differentiated characteristics of control channel dynamics.

The experimental test of algorithms for the control processes of typical technological complex, the results with a decrease in energy losses and the implementation of restrictions on the task, reducing the time of transient processes has been obtained. The results of work have been confirmed by acts, patents.

Key words: automation, technological complexes, multi-assortment of production, optimization, stability, maximum speed, hybrid structures, food industry.