

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ЛУЦЬКА НАТАЛІЯ МИКОЛАЇВНА



УДК 681.5.013:664

РОБАСТНО-ОПТИМАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
СКЛАДНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ
ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

05.13.07 «Автоматизація процесів керування»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна праця на правах рукопису
Роботу виконано в Національному університеті харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Ладанюк Анатолій Петрович,
Національний університет харчових технологій,
професор кафедри автоматизації
та комп'ютерних технологій систем управління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Жученко Анатолій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри технічних
та програмних засобів автоматизації

доктор технічних наук, професор
Тимченко Віктор Леонідович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова,
професор кафедри морського приладобудування

доктор технічних наук, професор
Хобін Віктор Андрійович,
Одеська національна академія
харчових технологій,
завідувач кафедри автоматизації
технологічних процесів і робототехнічних систем

Захист відбудеться «21» вересня 2021 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 України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «19» серпня 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ефективне управління технологічними об'єктами харчової промисловості обов'язково включає множину технологічних і тепло-енергетичних параметрів і змінних, які визначають якість функціонування об'єкта. Постійні часу об'єкта і параметри регуляторів безпосередньо визначаються технологічними змінними і параметрами, які залежать від коефіцієнта теплопередачі, витрат потоків та ін. Крім параметричних невизначеностей, існують також структурні невизначеності, обумовлені нелінійністю об'єкта, відхиленням від точки лінеаризації та неврахованою динамікою, що обґрунтовує використання робастно-оптимальних регуляторів. До таких об'єктів належать групи теплообмінників, дифузійні, випарні та ректифікаційні установки, пастеризатори та ін. Вагомі результати щодо дослідження робастних систем керування отримали вітчизняні та зарубіжні науковці, зокрема: Б. Т. Поляк, К. А. Пупков, В. Л. Харитонов, D. C. McFarlane, G. Zames, P. Arkarian, В. М. Кунцевич, В. Л. Тимченко та ін. Різноманітність робастних методів, невизначеність мети керування, обмеження на вектори координат стану і керування вимагають особливого підходу до проектування таких систем для технологічних об'єктів харчової промисловості, які сьогодні недостатньо вивчені.

Також розроблення системи керування технологічними об'єктами харчової промисловості нині продовжує залишатися творчою процедурою, яка повністю залежить від власних вподобань проєктанта системи керування. Насамперед, це пояснюється визначальною частиною початкових знань предметної області проєктанта та отриманих на їх основі емпіричних знань. Хоча етапи розроблення системи керування технологічними об'єктами харчової промисловості формалізовані досить давно, однак, враховуючи сучасне різноманіття методів та підходів, вони потребують переосмислення. Крім того, системи керування технологічними об'єктами, що функціонують в умовах невизначеності, потребують розгляду з точки зору життєвих циклів системи керування технологічним об'єктом, автоматизованої системи управління технологічним процесом та технічних засобів автоматизації. Керувальним пристроєм такої системи є робастний регулятор, структура та/або параметри якого розраховуються за H_2/H_∞ -критерієм, однак, змінні умови функціонування та еволюція самого технологічного об'єкта приводять до зміни області невизначеності, в межах якої конструювався робастний регулятор. Як наслідок, знижується ефективність системи в цілому й виникає необхідність переконструювання системи керування. Таким чином, використання даних та знань предметної області потребують формалізації для застосування в кінцевій системі, що може бути реалізовано системою підтримки прийняття рішень.

На основі проведеного аналізу сучасного стану наукових результатів щодо методів робастного керування технологічними об'єктами харчової промисловості та їх проектування виявлено таке: не враховуються особливості складних технологічних об'єктів, а саме багатозв'язність, запізнювання, а також їх еволюція; не існує узагальненого підходу до ідентифікації математичних

моделей технологічних об'єктів харчової промисловості та їх невизначеностей, який орієнтований на робастне керування; не існує єдиного методологічного підходу вибору критеріїв робастно-оптимального керування технологічними об'єктами харчової промисловості відповідно до вимог системи; не існує підходу щодо комплексування робастних та інших традиційних методів керування технологічними об'єктами харчової промисловості.

Таким чином, необхідність підвищення енерго-, ресурсоефективності та якості виробництва зумовлює актуальність вирішення складної науково-прикладної проблеми розроблення та впровадження робастно-оптимальних систем керування для технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, та створення науково-методологічних основ їх застосування та проектування на основі онтологічного підходу.

Вищезазначене зумовило вибір теми дисертації, встановлення її мети та завдань дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені у роботі, виконано відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України у рамках фундаментальної держбюджетної науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки України за темою «Теоретичні основи розробки робастно-оптимальних систем керування складними технологічними об'єктами та комплексами в умовах невизначеності» (номер державної реєстрації 0115U000379), 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 енергозберіжних методів» (номер державної реєстрації 0116U001531), «Наукові основи створення автоматизованих систем управління для комп'ютерно-інтегрованих виробництв харчової промисловості» (номер державної реєстрації 0112U001496), де здобувач була виконавцем.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи – розроблення наукових основ робастно-оптимального керування складними технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності та автоматизованого проектування систем керування для підвищення енерго-, ресурсоефективності та якості харчових виробництв.

Для досягнення означеної мети необхідно було вирішити такі завдання:

- провести систематизацію робастно-оптимальних методів керування для виявлення умов їх застосування та недоліків, що гальмують впровадження цих систем для технологічних об'єктів харчової промисловості;

- сформулювати предметну область дослідження, для якої визначити основні онтологічні задачі дослідження з урахуванням життєвого циклу системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, за виділеними задачами дослідження розробити онтологію процесів та структурно-логічну схему методу розроблення й моніторингу системи керування технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності;

- розробити узагальнену концепцію ідентифікації математичних моделей технологічних об'єктів харчової промисловості, що включає до визначення області невизначеності, та орієнтовану на робастне керування;

– вдосконалити методи робастно-оптимального керування з урахуванням особливостей технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, в тому числі на основі комплексування із традиційними методами керування складними технологічними об'єктами;

– розробити метод вибору системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що функціонує в умовах невизначеності, який базується на аксіомах прикладної онтології і дає змогу в автоматичному режимі рекомендувати множину критеріїв, структур системи керування та методи налаштування їх параметрів відповідно до вимог;

– розробити систему підтримки прийняття рішень, яка містить моніторинг відтворюваності робастно-оптимальних систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості та прикладну онтологію розроблення системи керування в умовах невизначеності та допомагає особі, що приймає рішення своєчасно та обґрунтовано виконувати переконструювання системи керування;

– розробити комплекс алгоритмічно-програмного забезпечення для задач розроблення та моніторингу відтворюваності системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що входять в систему підтримки прийняття рішень та перевірити її працездатність.

Об'єкт дослідження – процеси керування технологічними об'єктами та комплексами харчової промисловості (групи теплообмінників, дифузійні, випарні та ректифікаційні установки, пастеризатори та ін.), що функціонують в умовах суттєвих невизначеностей, зумовлених природними та людськими чинниками.

Предмет дослідження – закономірності, математичні моделі, критерії та методи робастно-оптимального керування з метою розроблення та проектування систем керування технологічними об'єктами, що функціонують в умовах невизначеності, для підвищення енерго-, ресурсоефективності та якості харчових виробництв.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано: методи сучасної теорії автоматичного керування, методи теорії оптимального та робастного керування, методи ідентифікації, імітаційне моделювання, системний аналіз, онтологічні методи дослідження, методи прикладного програмування, методи генерації повторних вибірок.

Наукова новизна одержаних результатів. Винесені на захист наукові результати є теоретичною основою для вирішення важливої науково-прикладної проблеми розроблення та впровадження робастно-оптимальних систем керування для технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, та створення науково-методологічних основ їх застосування й проектування для забезпечення підвищення енерго-, ресурсоефективності та якості виробництва. Основний науковий результат роботи полягає у розробленні та практичному застосуванні методів і моделей робастно-оптимального керування складними технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, та методів автоматизованого проектування таких систем.

Основні наукові положення, що визначають наукову новизну роботи:

– вперше розроблено метод розроблення та моніторингу системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що функціонує в умовах невизначеності та базується на життєвому циклі системи, використовує тестування на математичних моделях при виборі найкращого варіанта рішень і дає змогу в автоматизованому режимі здійснювати процеси розроблення та оцінку відтворюваності системи керування в умовах невизначеності й в кінцевому підсумку приводить до підвищення ефективності системи у цілому;

– вперше розроблено модель онтологічної системи предметної області проектування ефективних систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості із невизначеностями, що базується на життєвому циклі системи й містить онтологію об'єктів, процесів і задач, використовує традиційні та робастні методи синтезу, що дозволило сформулювати і представити знання та дані предметної області, а також систематизувало предметну область для подальшого розроблення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень;

– вперше розроблено комплекс процедур для ідентифікації математичних моделей технологічних об'єктів для робастного керування, що базується на методі довизначення області невизначеності, використовує евристичний, частотний або рандомізаційний підходи, адекватність яких оцінюється в номінальному стані та на області невизначеності і дає змогу ідентифікувати математичну модель технологічного об'єкта харчової промисловості та область невизначеності для робастного керування;

– вперше розроблено метод автоматизованого вибору системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості в умовах невизначеності, що базується на інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень, основу якої складає прикладна онтологія, яка, відповідно з вимогами до системи та особливостей об'єкта і моделі, ставить у відповідність множину критеріїв керування, структур системи керування та методів синтезу керувальної системи, таким чином обґрунтовуючи вибір системи;

– набули подальшого розвитку методи ідентифікації математичних моделей технологічних об'єктів харчової промисловості із невизначеностями, що базуються на процедурах рандомізації, зокрема, бутстрепа й «складального ножа», та ідентифікують область невизначеності параметрів моделі відповідно до обраних критеріїв адекватності і орієнтовані на подальше використання в робастних системах керування;

– вдосконалено методи комплексування робастних та традиційних методів керування складними технологічними об'єктами харчової промисловості, які базуються на ефекті емерджентності, що дозволило покращити якість та знизити енерговитрати систем керування технологічними об'єктами в умовах суттєвих невизначеностей;

– набули подальшого розвитку методи прийняття рішень щодо вибору системи керування технологічним об'єктом в умовах невизначеності з використанням тестування на математичних моделях, що дозволило підвищити ефективність функціонування системи керування;

– набули подальшого розвитку методи та системи робастного керування для технологічних об'єктів за рахунок запропонованих вагових коефіцієнтів, передавальних функцій, передавальних вагових матриць системи, що дозволило спрощено знаходити компроміс між енерговитратами та якістю системи;

– набули подальшого розвитку методи моніторингу технологічних об'єктів, до складу яких увійшла підсистема моніторингу відтворюваності системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що базується на визначенні та прогнозуванні старіння системи керування та своєчасному прийнятті рішення щодо переконструювання керувальної системи, що дозволило підвищити ефективність системи керування у змінюваних умовах.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені в дисертації онтологічні основи проектування системи керування технологічними процесами, які функціонують в умовах невизначеності, стали підґрунтям створення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, що забезпечує удосконалення процесів розроблення систем керування та моніторинг системи і, як наслідок, підвищення ефективності системи керування в цілому. У результаті застосування розроблених підходів забезпечується виконання вимог до системи на етапі розроблення системи та моніторинг «старіння» системи керування на підставі використання нової онтологічної концепції, розроблених методів та процедур. Використання створених підходів обумовить вибір раціональної структури та оптимальних параметрів керувального пристрою, суттєво скоротить час розроблення системи, обумовить нову організацію до переналагодження системи керування, що призведе до отримання економічного ефекту.

Практично вагомими вважаються такі результати: процедури ідентифікації математичних моделей технологічних об'єктів з уточненням номінальних параметрів та довизначенням області невизначеності, основною перевагою яких є простота обчислювальних процедур та орієнтація на робастне керування; розроблені робастні системи керування, в тому числі й на основі комплексування, дозволяють збільшити якісні показники системи, зменшити витрати енергоносіїв, що в цілому збільшує загальну ефективність системи в межах 2,5–4,5 %; генерація альтернативних структур системи керування на основі вимог до системи керування та особливостей технологічного об'єкта харчової промисловості, що реалізується прикладною онтологією; система моніторингу відтворюваності системи керування, що є частиною моніторингу технологічного процесу, яка дозволяє виявити та спрогнозувати «старіння» налаштувань системи та своєчасно прийняти рішення щодо переконструювання структури та параметрів керувального пристрою; запропоновано інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень, що допомагає виконувати розроблення та здійснює моніторинг системи керування, може бути впроваджена на харчових підприємствах, зокрема, для ефективного керування неперервними технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності.

Результати роботи впроваджено на ТОВ «Технопарк Полесьє» (м. Пінськ, Республіка Білорусь), ДП «Укрспирт» (Червонослобідське МПД Макарівського

району Київської області), ПАТ «Линовицький цукрокомбінат «Красний»» (с/мт Линовиця Чернігівської області), ТОВ «Проектування та розробка автоматизованих технологій», ПП «Альтернативні джерела», ТОВ «НВП «ЕА Діджитал» та ТОВ «САУТКОМ». Результати дисертації використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій.

Особистий внесок здобувача. До дисертації увійшли наукові результати, отримані здобувачем особисто. Здобувачу належить постановка завдань і вибір методів 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 дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях: Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2012, 2014, 2016, 2017 (м. Київ, 2012 р., 2014 р., 2016 р., 2017 р.); «The Second North and East European Congress on Food» (м. Київ, 2013 р.); «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (м. Київ, 2014, 2016–2018 рр.); «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2016, 2019 рр.); «Automation 2017: Innovations in Automation, Robotics and Measurement Techniques, Advances in Intelligent Systems and Computing» (м. Місто, Республіка Польща, 2017 р.); 5th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering «ICMRE 2019» (м. Рим, Італія, 2019 р.); «E3S Web of Conferences: 6th International Conference – Renewable Energy Sources» (м. Криниця, Республіка Польща, 2020 р.); «ICO 2020: Intelligent Computing and Optimization» (м. Хуа Хін, Таїланд, 2020 р.).

Публікації. Основні теоретичні та експериментальні результати наукових досліджень висвітлено у 50 наукових працях, з яких монографія, 28 статей у наукових фахових виданнях України, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних, 6 статей у наукових виданнях інших держав, 15 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 427 сторінок. Робота містить 108 рисунків та 33 таблиці. Список використаних джерел налічує 231 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі «Систематизація наукових результатів за методами синтезу систем управління для об'єктів з невизначеностями» проведено систематизацію робастно-оптимальних систем керування, а також виявлено особливості технологічних об'єктів харчової промисловості, що гальмують їх застосування.

За результатами проведеного аналізу показано, що вимоги забезпечення робастної стійкості та якості управління на кожному ієрархічному рівні виробництва забезпечують також робастну стійкість технологічного процесу, що в кінцевому підсумку призводить до отримання продукту заданої якості. Зокрема, розглядаються невизначеності виробництва, що виникають внаслідок неконтрольованих або неврахованих факторів і ведуть до недостовірної оцінки істинного значення процесу та неправильного розрахунку керувальних дій. При цьому невизначеності технологічних об'єктів харчової промисловості як об'єктів автоматизації можна поділити на декілька видів: невизначеність, що виникає при неточності подання та видачі інформації в технічних засобах автоматизації (включаючи лінії зв'язку), або її відсутність; невизначеність, що виникає при описі та розрахунку математичних залежностей процесу; невизначеність цілей, взаємодії та конфліктів.

Аналіз існуючих методів синтезу робастно-оптимальних систем керування поділено на ті, що будуються на номінальній моделі, та на сімействі моделей із заданим видом невизначеності. В табл. 1 наведено основні методи синтезу робастно-оптимальних систем керування за критерієм H_{∞} -норми.

Таблиця 1

Методи синтезу робастно-оптимальних систем керування

Метод/ напрямок	Математична модель та вид невизначеності	Особливості
2-Ріккати	Номінальна модель	Синтезується центральний регулятор у просторі змінних стану за алгебраїчними рівняннями Ріккати
LMI	Номінальна модель, матричні невизначеності	Базується на квадратичній стабілізації та функції Ляпунова
Loop shaping	Номінальна модель, структурні невизначеності	Регулятор синтезується в частотній області на основі взаємно простої факторизації
μ -синтез	Модель з усіма видами невизначеностей (структурована невизначеність)	Базується на понятті структурованого сингулярного числа матриці та теоремі про малий коефіцієнт підсилення
Non-smooth оптимізація	Номінальна модель	Структура системи керування задається розробником

Врахування невизначеностей вимагає ідентифікації математичної моделі об'єкта із невизначеностями, що сьогодні недостатньо вивчено для технологічних об'єктів харчової промисловості, а існуючі методи занадто громіздкі, складні або потребують додаткових експериментальних заходів на об'єкті.

Зроблено висновок, що різноманітність існуючих методів робастної оптимізації, а також вимоги виробництва потребують розроблення нового класифікаційного підходу до їх розв'язання, що базується на особливостях технологічних об'єктів харчової промисловості, побудові адекватної математичної моделі об'єкта керування та синтезу робастно-оптимального керувального пристрою. Враховуючи, що значна частка вхідної інформації для розроблення системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що функціонує в умовах невизначеності, є емпіричною, а також розмиті вимоги до системи, необхідним є формалізація проблемної та предметної області дослідження, а також використання бази знань.

У другому розділі **«Онтологічні основи та математичні моделі технологічних об'єктів харчової промисловості для робастного керування»** розроблено модель онтологічної системи для формалізації предметної області, формулювання і фіксації загальних знань та їх структурних відношень, а також явної концептуалізації та категоризації, орієнтованої на підтримку прикладних задач автоматичного керування.

У роботі виділено проблемну область дослідження, в центрі якої розташована система керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що функціонує в умовах невизначеності. Неврахування області невизначеності призводить до зниження ефективності керування, тобто зниження якості продукту та енергоефективності, іноді навіть до втрати стійкості та постійної переналадки системи керування. Предметна область дослідження розробляється на основі концепції українського академіка А. В. Палагіна, згідно з якою модель онтологічної системи (ОнС), описується кортежем:

$$\text{ОнС} = \langle O^{\text{Пд}^0}(O, O^{\text{Пр}}(\text{ЖЦСК})), O^3 \rangle, \quad (1)$$

де предметна область $O^{\text{Пд}^0}$ складається із двох частин – онтології об'єктів O та онтології процесів $O^{\text{Пр}}$. Перша визначає статичні терміни, визначення та взаємозв'язки предметної області, а друга – динаміку (події та тривалості) предметної області. Онтологія процесів предметної області, на відміну від концепції А. В. Палагіна, розроблена відповідно до життєвого циклу системи керування та задач проблемної області O^3 . Життєвий цикл системи керування підтримує загальноприйнятту еволюційну модель складних систем. Зокрема, як і будь-яка складна система, система керування технологічним об'єктом харчової промисловості складається як мінімум із трьох узагальнених стадій: зародження, функціонування і загибель. Зародження пов'язано з процесом розроблення системи керування і, у свою чергу, входить у життєвий цикл проєктування та функціонування автоматизованої системи управління технологічним процесом і його частин, у тому числі технічних засобів автоматизації. З іншого боку, життєвий цикл системи керування пов'язаний із функціонуванням технологічного об'єкта харчової промисловості, який також розвивається за еволюційним принципом. Неповнота життєвого циклу системи керування перешкоджає оптимальності рішення щодо проєктування системи керування технологічним об'єктом, тому необхідне її врахування.

Життєвий цикл системи керування технологічним об'єктом поділено на стадії, які зображені на рис. 1. Виділені особливості реалізації стадій життєвого циклу, зокрема, на стадії розроблення системи керування, традиційним є ряд таких дій: формулювання концепції; ідентифікація математичної моделі об'єкта; розроблення системи керування, моделювання та перевірка системи. У роботі пропонується обрати систему керування із множини альтернативних рішень, до яких входять різні структури систем керування. Питання остаточного вибору залишається за проєктантом. Крім того, такий підхід підтримує модельно-орієнтований принцип, в якому модель системи використовується для синтезу, симуляції та тестування програмного коду, що реалізується на промислових контролерах. Також на стадії експлуатації пропонується проводити моніторинг відтворюваності системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості для виявлення її «старіння». «Старіння» системи керування викликане зменшенням ефективності системи і в кінцевому підсумку може призвести до її краху. Одним із проявів цього для систем регулювання є розбіжність перехідних процесів. Причиною зменшення ефективності таких систем може бути еволюція технологічного об'єкта або його оточення. Окремим питанням постає вихід із ладу елементів технічних засобів автоматизації. Таким чином, згідно з життєвим циклом системи керування сформульовано дві головні задачі: 1 – розроблення та 2 – моніторинг системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості.

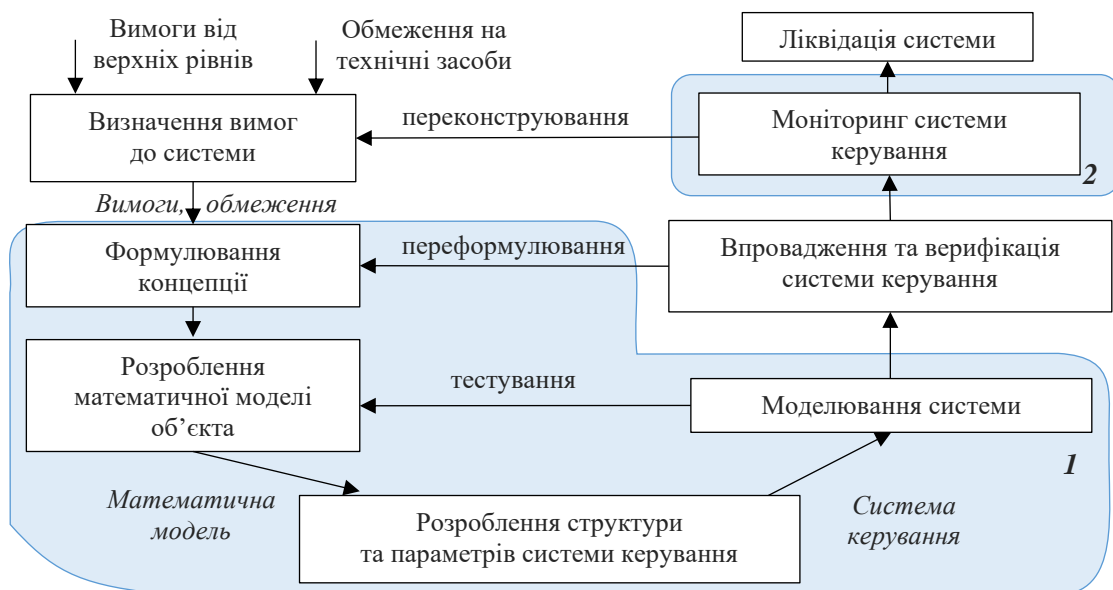


Рис. 1. Типовий життєвий цикл системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості

Враховуючи (1), розроблено граф моделі онтологічної системи предметної області функціонування системи керування технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності (рис. 2). Модель складається із трьох онтологій, зв'язаних між собою відповідними задачами, які впливають із проблемної області дослідження.

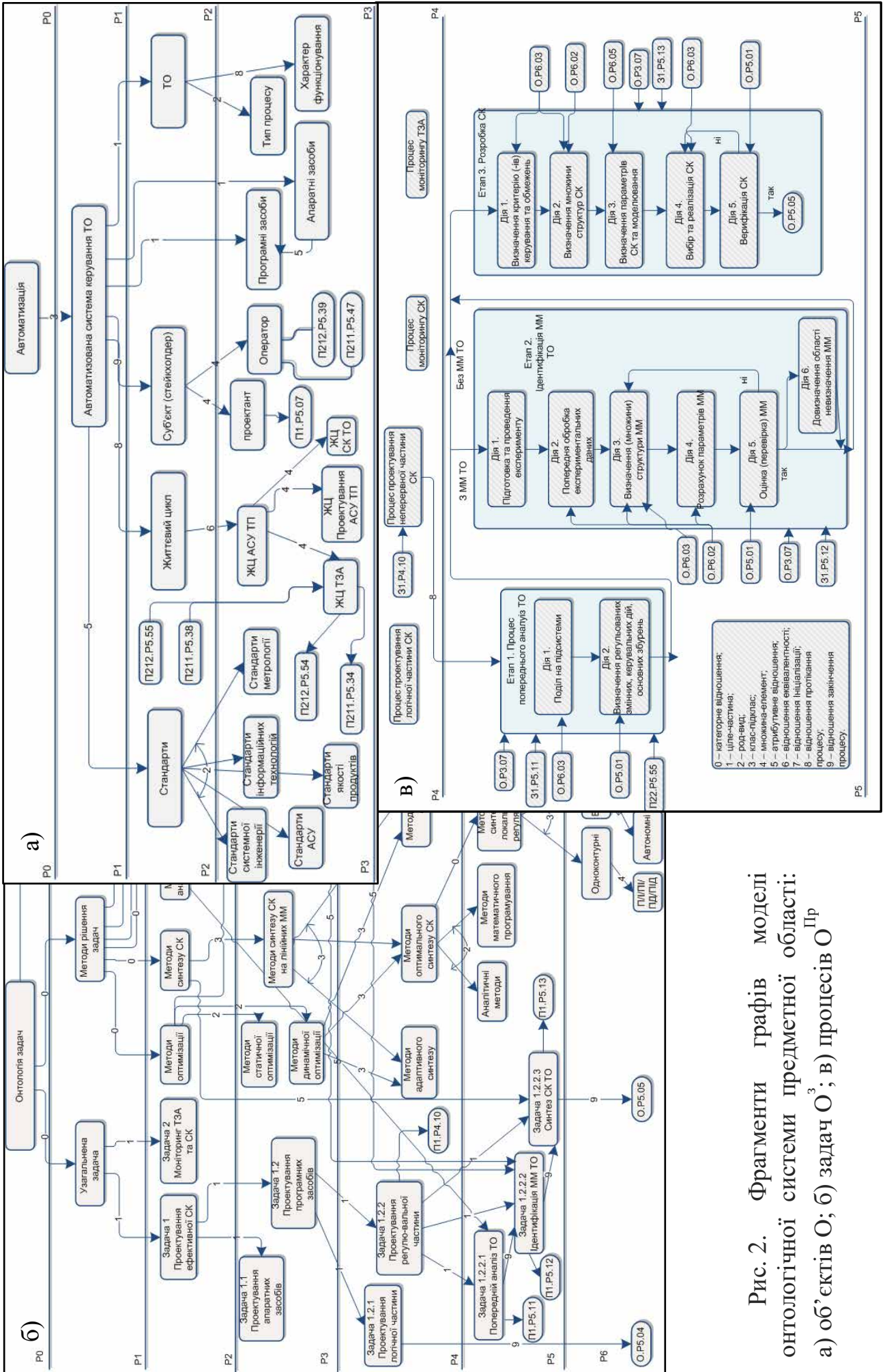


Рис. 2. Фрагменти графів моделі онтологічної системи предметної області: а) об’єктів О; б) задач О³; в) процесів О^{Pr}

Онтологія предметної області дослідження включає такі основні концепти (рис. 2, а): технологічний об'єкт, стандарти, життєвий цикл, суб'єкт, а також безпосередньо керувальна частина автоматизованої системи управління, що складається із програмних та апаратних засобів. Названі концепти предметної області обґрунтовуються безпосереднім впливом на проблемну область та задачі дослідження. Функції інтерпретації на онтологіях показані відповідними стрілками. Крім того, модель поділена на умовні рівні для кращого структурування категорій, а також зв'язку між онтологіями. Зв'язок з іншими схемами в єдиній онтологічній системі здійснюється за допомогою овалів (посилання) та прямокутників (приймання) з номерами, що відповідають шаблону *Онтологія (Лист схеми). Рівень. Номер зв'язку*.

Онтологія задач (рис. 2, б) складається з загальної задачі, яка ділиться на підзадачі, методи їх рішень, а також вирішувач задач, представлений в онтології процесів. Задачі проєктування системи керування, моніторинг технічних засобів та системи керування поділяються на менші частини. Задача моніторингу відтворюваності системи керування є частиною задачі моніторингу технологічного процесу та технічних засобів. Основними типовими методами розв'язку задачі проєктування системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що функціонує в умовах невизначеності, є методи ідентифікації математичної моделі об'єкта, що також включають ідентифікацію невизначеностей; методи оптимального та робастного синтезу; методи перевірки робастної стійкості. Онтологія процесів (рис. 2, в) побудована відповідно до виділених задач проблемної області. Процеси на нижньому рівні P5 відповідають послідовності дій та операцій, які приводять до розв'язку відповідних підзадач онтологічного дослідження.

На основі викладеного сформульовано метод розроблення та моніторингу системи керування технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, структурно-логічну схему якого представлено на рис. 3. Запропонований метод відрізняється від наявних використанням моделі онтологічної системи предметної області проєктування системи керування, прикладної онтології, що генерує варіанти рішень системи керування, а саме критерії, структури та методи, які в подальшому тестуються на моделях, а також моніторингом відтворюваності системи керування, що оцінює «старіння» структури та налаштування, та на основі якого особа, що приймає рішення приймає рішення щодо переконструювання системи керування.

Також у другому розділі роботи запропоновано узагальнений підхід до ідентифікації математичної моделі технологічного об'єкта харчової промисловості з невизначеностями, що базується на емпіричному, частотному підходах та з використанням рандомізації. Запропонований підхід побудовано на поетапних процедурах, що включають проведення експерименту, ідентифікацію параметрів математичної моделі у номінальному режимі, а також довизначення області невизначеності. Враховуючи, що класичні методи «бутстрепа» та «складального ножа» використати неможливо внаслідок взаємозалежності, автокореляції та періодичності вхідних даних, у роботі

псевдовибірка з поверненням генерується шляхом випадкового витягування групи даних з однією змінною сигналу керування k . На основі вказаного реалізується метод корекції номінальних значень параметрів та довизначення області параметричної невизначеності, для якого сформульовано етапи ідентифікації математичної моделі технологічного об'єкта харчової промисловості:

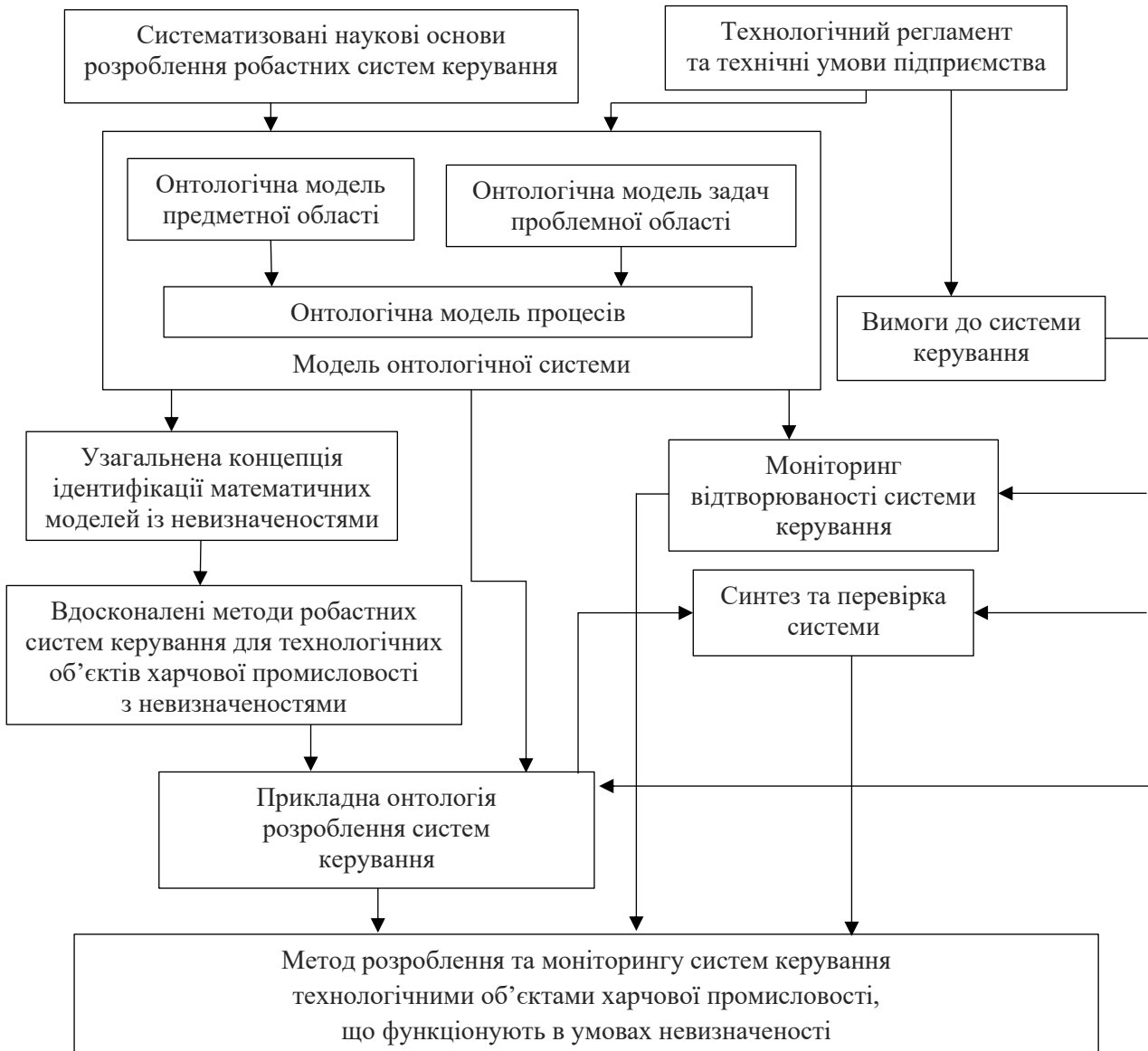


Рис. 3. Структурно-логічна схема методу розроблення та моніторингу систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності

– провести експеримент за детермінованими вхідними діями (u, y – відповідно вхід та вихід об'єкта) при різних умовах експлуатації об'єкта (k – номер експерименту):

$$y^k(t) = [y^k(0), y^k(T_s), y^k(2T_s), \dots, y^k(NT_s)],$$

$$u^k(t) = [u^k(0), u^k(T_s), u^k(2T_s), \dots, u^k(NT_s)], \quad k = 1, \dots, K; \quad (2)$$

– сформулювати масив загальних B псевдовибірок ($B=500$ і більше) з поверненням із K -частин емпіричної вибірки:

$$([y^{*1}(t), u^{*1}(t)], [y^{*2}(t), u^{*2}(t)], \dots, [y^{*K}(t), u^{*K}(t)])_b, b = 1, \dots, B; \quad (3)$$

– провести загальну структурну та параметричну ідентифікацію кожної псевдовибірki та отримати масиви кожного з параметрів ($\hat{\theta}$ – вектор оцінок параметрів моделі):

$$[\hat{\theta}^1, \hat{\theta}^2, \dots, \hat{\theta}^b], b = 1, \dots, B; \quad (4)$$

– за допомогою псевдостатистики отриманих параметрів можна розрахувати їх статистичні характеристики, зокрема, математичне сподівання, дисперсію, квантілі або довірчий інтервал.

На рис. 4 показано гістограму розподілу коефіцієнтів математичної моделі технологічного об'єкта харчової промисловості, що описується аперіодичною ланкою першого порядку з запізнюванням. Суцільною лінією показано статистичну невизначеність параметрів при використанні стандартних процедур ідентифікації моделі, а стовпчиками – невизначеність при використанні бутстрепу. Як видно, звичайні методи ідентифікації математичної моделі технологічного об'єкта харчової промисловості не відображають дійсну область невизначеності, а середні значення параметрів є зміщеними, на відміну від запропонованого підходу.

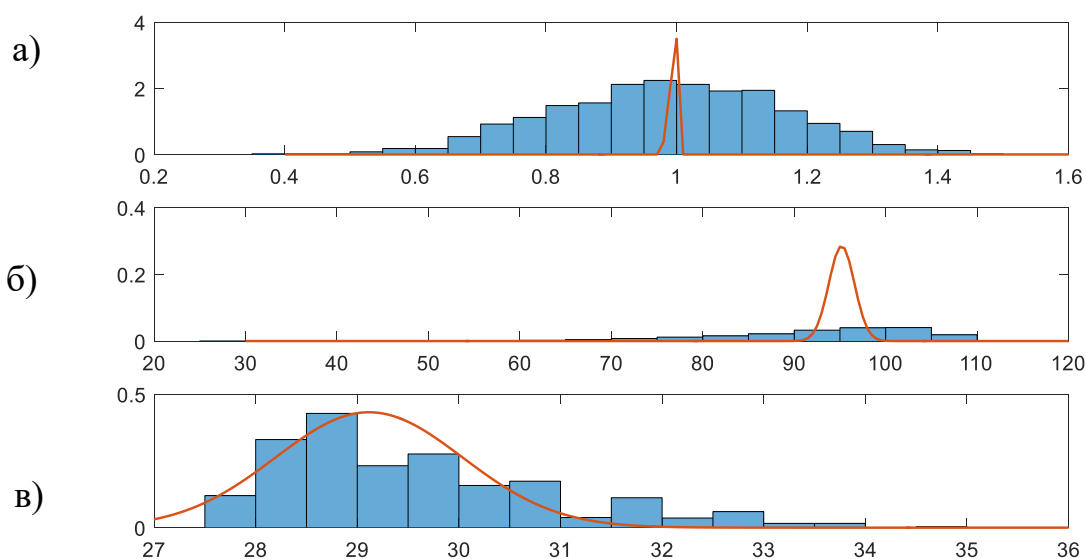


Рис. 4. Гістограми (PDF) розподілу параметрів математичної моделі тестового об'єкта: а) коефіцієнт передачі; б) постійна часу; в) час запізнювання

Враховуючи невизначені умови функціонування технологічних об'єктів харчової промисловості, порівняння різних варіантів ідентифікації номінальної математичної моделі та на області невизначеності проводилося за такими характеристиками (табл. 2): в номінальному режимі верхня межа гар- та пугар-метрики (Vinnicombe) між ідентифікованою та дійсною моделями; на області

невизначеності нижня та верхня межі підсилення ЛАЧХ при найгірших комбінаціях невизначеностей.

Таблиця 2

Порівняльні характеристики ідентифікації математичної моделі об'єкта

№	Підхід		гар-метрика	
			gar	nugar
1	Емпіричний		0.1619	0.1611
2	У частотній області		0.0910	0.0900
3	3.1	З використанням бутстрепа	0.0927	0.0924
	3.2	З використанням методу «Складального ножа»	0.0898	0.0895

Для всіх запропонованих підходів значення гар-метрики мале ($gar, nugar \ll 1$), що означає, що будь-який регулятор, який стабілізує ідентифіковану математичну модель, стабілізує дійсний об'єкт, крім того, коефіцієнти підсилення у двох системах із зворотним зв'язком будуть подібні. Для підходу з використанням методу «Складального ножа» при ідентифікації параметрів моделі gar або $nugar$ близько нуля визначає, що дійсний об'єкт та ідентифікована математична модель майже рівні.

Враховуючи, що математичні моделі складних технологічних об'єктів харчової промисловості є багатовимірними, рекомендується обирати структуру моделі, виходячи з міркувань фізичних властивостей процесів та максимально спрощуючи порядок диференціальних рівнянь. Параметри моделі визначаються на основі експериментальних даних, а область невизначеності формується у вигляді мультиплікативної або адитивної структури, до якої входить модель неврахованої динаміки та розраховується за частотним підходом.

У третьому розділі «Розвиток методів синтезу систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості при використанні робастних алгоритмів» розроблено низку робастно-оптимальних систем керування для складних технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності та доведено їх ефективність при різних умовах експлуатації. Розглянуто методи робастної стійкості, робастної оптимізації, робастного розв'язування каналів керування, а також на основі комплексування, вказано додаткові процедури з урахуванням особливостей об'єкта, що ведуть до спрощення та покращення розробки та збільшення часу експлуатації таких систем.

Вирішена оптимізаційна задача на основі H_2 -норми замкненої системи для пастеризаційно-охолоджувальної установки молочного виробництва, математична модель якої описується лінійними диференціальними рівняннями 7-го порядку з мультиплікативною невизначеністю. Показано, що в умовах інтенсивних зовнішніх збурень та наявності невизначеностей в об'єкті ефективним є використання такого критерію:

$$J = \min_{\mathbf{K}(s) \in \Omega} \|\mathbf{W}_L(s)\mathbf{H}(s)\mathbf{W}_R(s)\|_2, \quad (5)$$

де $\mathbf{H}(s)$ – передавальна функція замкненої системи; Ω – область стабілізованих керувань; $\mathbf{W}_L(s)$, $\mathbf{W}_R(s)$ – вагові матриці відповідно виходів та входів системи.

Вагова матриця $W_L(s)$ задає якість системи в частотній області, а матриця $W_R(s)$ – вид вхідного сигналу, зокрема, можна задати фільтр для неоднорідного спектра сигналу. Таким чином, використовуючи критерій (5), система мінімізує загальну енергію імпульсного відгуку для детермінованих входів, а також вихідну дисперсію для заданої дисперсії вхідного стохастичного сигналу. Також показано, як ефективно використати методи пониження порядку регулятора, зокрема синтезований регулятор 11-го порядку знижено до 6-го за графіком сингулярних значень Хенкеля.

Проведено моделювання систем із синтезованим робастно-оптимальним регулятором (CL H2) та локальними PID і PI-регуляторами (CL PID-PI) для номінальної моделі та моделі з максимальною мультиплікативною невизначеністю (рис. 5).

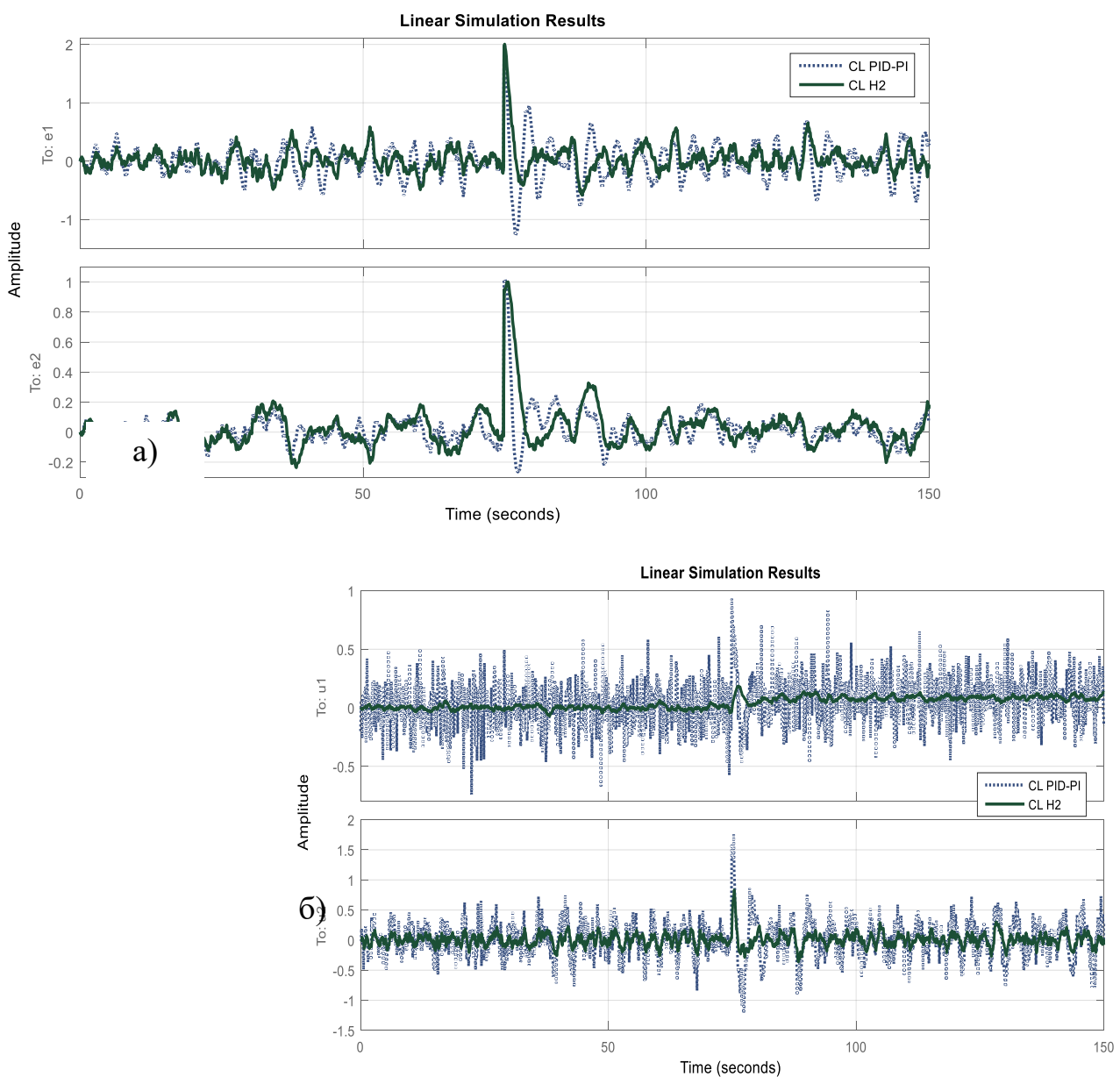


Рис. 5. Результати моделювання: а) відхилення температур пастеризації та охолодження; б) сигнали керування

Параметри локальних регуляторів синтезовані за критерієм максимальної фільтрації збурень. На вхід систем на всьому проміжку часу подавалися сигнали збурень, при чому зовнішні збурення моделювалися стохастичною та детермінованою складовою, а в момент часу 75 с змінилися завдання з нульового до відповідно 2 °С та 1 °С. Порівняльні оцінки зведені в табл. 3, з яких видно, що кращі показники якості та енергозбереження має система з N₂-регулятором. Крім того, Н_∞-норми передавальної функції системи та функції чутливості S(s) для такої системи менші, що підтверджує робастні властивості системи.

Таблиця 3

**Порівняльні характеристики систем керування
для технологічного об'єкта з інтенсивними зовнішніми збуреннями**

Характеристика	Тип регулятора	
	<i>N₂-регулятор</i>	<i>PID-PI регулятори</i>
Максимальне відхилення	$\varepsilon_1=2.1$ °С $\varepsilon_2=1.0$ °С $u_1=0.2$ кг/с $u_2=0.9$ кг/с	$\varepsilon_1=2.0$ °С $\varepsilon_2=1.0$ °С $u_1=1.0$ кг/с $u_2=1.9$ кг/с
Середньо-квадратичне відхилення	$\sigma\varepsilon_1=0.2$ °С $\sigma\varepsilon_2=0.1$ °С $\sigma u_1=0.04$ кг/с $\sigma u_2=0.1$ кг/с	$\sigma\varepsilon_1=0.4$ °С $\sigma\varepsilon_2=0.1$ °С $\sigma u_1=0.2$ кг/с $\sigma u_2=0.4$ кг/с
$\ H_{w_e}(s)\ _2$ за зовнішніми збуреннями	0.25	0.34
$\ H_{v_e}(s)\ _2$ за шумами вимірювань	1.02	2.25
Загальна $\ H_{[w v]_e}(s)\ _\infty$	1.13	5.27
Розмах невизначеності γ	0.56	0.13
Чутливість $\ S(s)\ _\infty$	1.63	5.29

Актуальною є задача синтезу системи керування для багатозв'язних технологічних об'єктів харчової промисловості в умовах невизначеності. В роботі запропоновано задачу розв'язування перехресних зв'язків та робастної оптимізації, використовуючи положення методів комплексування. Для цього задається структура компенсатора та керувального пристрою при $n=m$ у вигляді (рис. 6):

$$W_{\text{кп}}(s) = \begin{bmatrix} 1 & k_{12}(s) & \dots & k_{1m}(s) \\ k_{21}(s) & 1 & \dots & k_{2m}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{m1}(s) & k_{m2}(s) & \dots & 1 \end{bmatrix}; W_{\text{пер}} = \begin{bmatrix} PID_1(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & PID_2(s) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & PID_m(s) \end{bmatrix}; \quad (6)$$

де $PID_i(s)$ – позначено передавальну функцію ПІД-регулятора; $k_{ij}(s)$ – передавальна функція компенсатора за перехресним каналом $i \neq j$.

Тоді, можна побудувати робастно-оптимізаційну задачу за критерієм

$$J = \min_{K(s) \in \Omega_1} \|H_{\text{eu-wr}}(s)\|_\infty, \quad (7)$$

де $H_{\text{eu-wr}}(s)$ – зважена матрична передавальна функція від векторів $[e, u]^T$ до $[w, r]^T$; $K(s) = W_{\text{пер}}(s)W_{\text{кп}}(s)$ – результуючий керувальний пристрій.

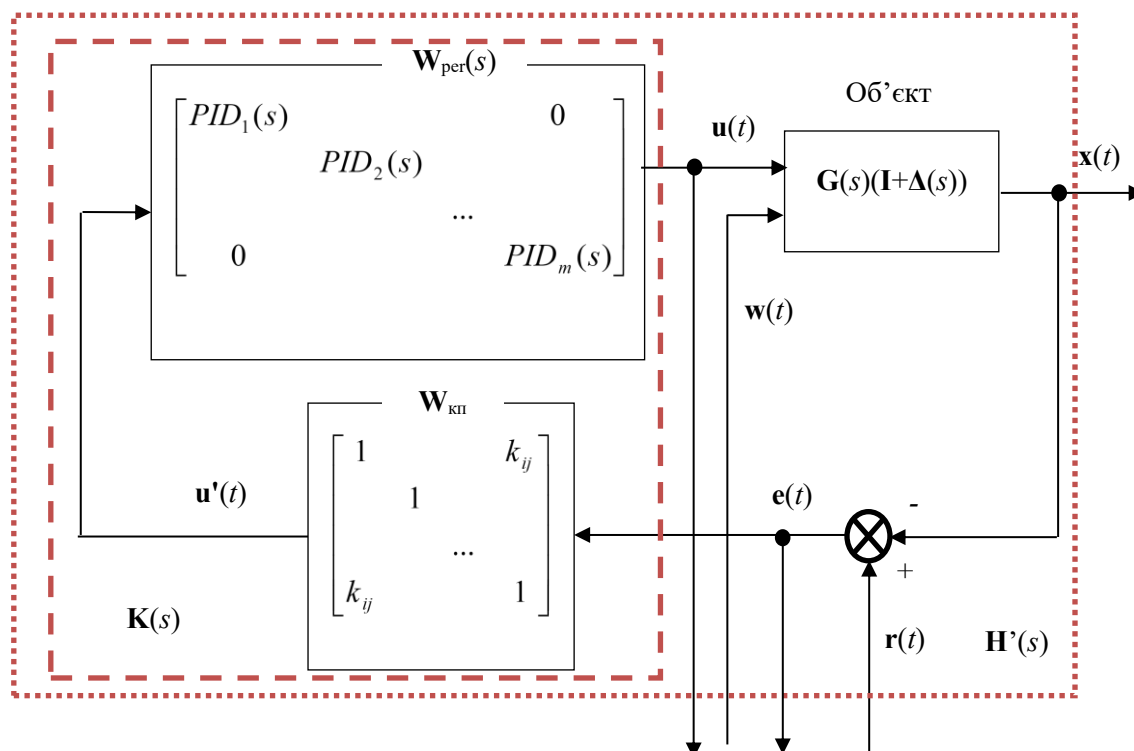


Рис. 6. Структурна схема робастно-оптимальної системи керування з компенсатором

На рис. 7 зображено перехідні процеси системи, синтезованої за (7) для рівнів багатокорпусної випарної установки цукрового заводу відносно зміни завдання в номінальному режимі та при випадкових невизначеностях. Хоча перехідні процеси за перехресними каналами наявні, однак, їх якісні характеристики значно кращі, ніж без компенсатора.

У табл. 4 наведено порівняльні характеристики систем при найгірших комбінаціях невизначеності: робастно-оптимальна система при статичному компенсаторі та ПІ-регуляторах; система керування із робастно-оптимальними ПІ-регуляторами; система керування з ПІ-регуляторами, параметри яких розраховувалися за інтегрально-квадратичним критерієм та статичним компенсатором, розрахованим за класичною схемою. Остання система керування за рахунок малого діапазону керувального сигналу не відпрацьовує збурення при найгірших комбінаціях невизначеностей.

Також розглянуто та доведено покращення якості перехідних процесів при введенні робастного регулятора у структуру системи із предиктивним пропорційно-інтегральним регулятором (ПІІ-регулятор) для технологічного об'єкта харчової промисловості із запізнюванням (рис. 8). $W_d(s)$ – вагова передавальна функція, що обмежує частотний діапазон дії зовнішніх збурень.

Використовуючи теорію чутливості, синтезовано налаштування k_p та T_i ПІІ-регулятора. При цьому чутливість та додаткова чутливість записується

$$\begin{aligned} S(s) &= [1 + G(s)e^{-\tau} K(s)]^{-1}, \\ T(s) &= G(s)e^{-\tau} K(s) [1 + G(s)e^{-\tau} K(s)]^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{та керуючий пристрій} - K(s) = k_p \left[1 - \frac{e^{-\tau_0 s}}{1 + sT_i} \right]^{-1} = \frac{k_p(1 + sT_i)}{1 + sT_i - e^{-\tau_0 s}}, \quad (9)$$

де τ_0 – номінальне значення запізнювання.

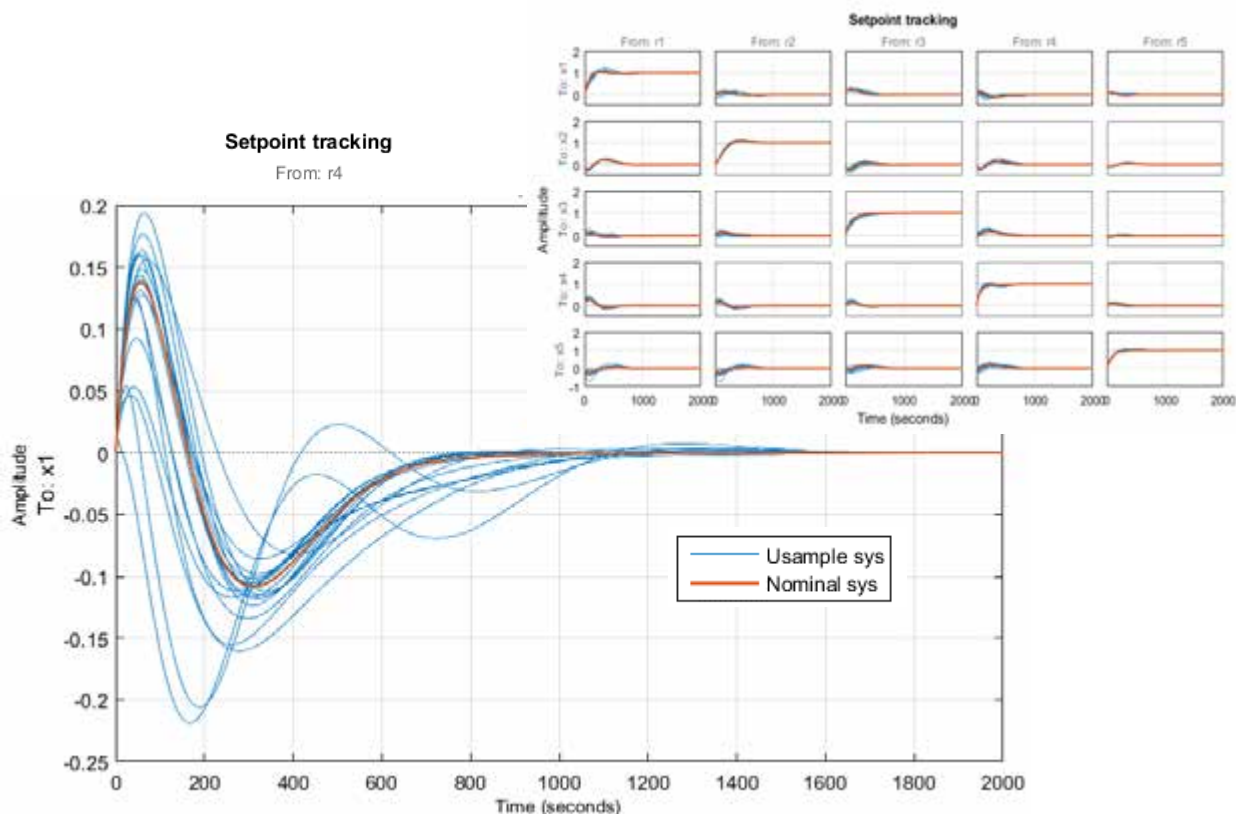


Рис. 7. Перехідні процеси в системі керування з багатозв'язним технологічним об'єктом харчової промисловості

Таблиця 4

**Порівняльні характеристики системи керування
для багатозв'язного технологічного об'єкта**

№	Характеристика	Система керування з регулятором		
		$K(s) = W_{\text{per}}^{\text{robust}}(s)W_{\text{кп}}^{\text{robust}}(s)$	$K(s) = W_{\text{per}}^{\text{robust}}(s)$	$K(s) = W_{\text{per}}^{\text{ISE}}(s)W_{\text{кп}}(s)$
1	$I_1 = \int e^2(t)dt$	900.3	1333.0	$1.7 \cdot 10^7$
2	$I_2 = \int u^2(t)dt$	$1.38 \cdot 10^6$	$1.35 \cdot 10^6$	$2.31 \cdot 10^6$
3	$I_3 = \ \mathbf{H}(s)\ _{\infty}$	1.13	2.07	3.53
4	Максимум ЛАЧХ за перехресними каналами	-2.5 dB	-2.0 dB	6.8 dB

Розглядається оптимізаційна задача знаходження параметрів ППІ-регулятора за критерієм змішаної чутливості:

$$I = \min_{k_p, T_i} \|\mathbf{H}(s)\|_{\infty} = \min_{k_p, T_i} \left\| \frac{T(s)}{W_1(s)S(s)} \right\|_{\infty}, \quad (10)$$

де $W_I(s)$ – вагова передавальна функція, за допомогою якої налаштовується якість перехідних процесів. Мінімізація (10) визначає якісну міру відслідковування сигналу завдання $r(t)$ та придушення зовнішніх збурень $d(t)$. Також (10) визначає міру стійкості зворотного зв'язку в контексті мультиплікативно збуреного об'єкта. Отже, визначивши параметри робастного ППІ-регулятора, можна розширити область невизначеності об'єкта та регулятора, викликану змінами параметрів об'єкта (корені характеристичного полінома, запізнювання передавальної функції $G(s)$ та запізнювання в регуляторі $K(s)$). Дану задачу (8–10) можна розв'язати за оптимізаційним алгоритмом негладкого синтезу Non-smooth (див. табл. 1).

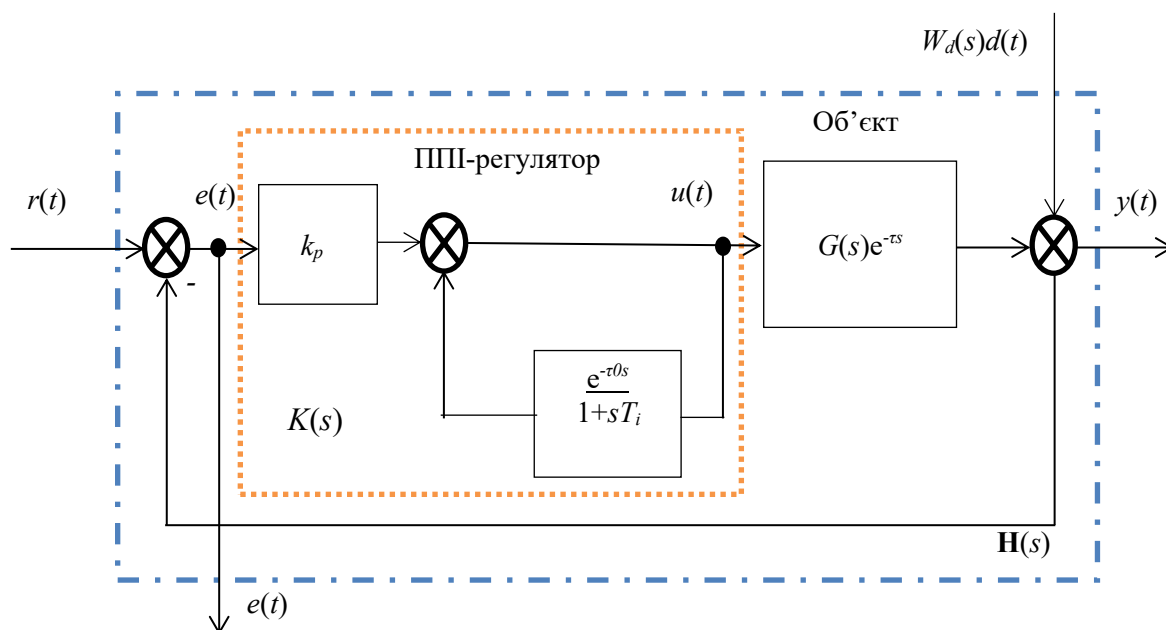


Рис. 8. Структура системи з робастним ППІ-регулятором

За описаною процедурою синтезу отримано результати моделювання системи керування концентрацією сиропу для випарної установки цукрового заводу. Математична модель об'єкта в номінальному режимі за каналом концентрація сиропу після п'ятого корпусу – витрата соку на перший корпус апроксимується аперіодичною ланкою з запізнюванням, в якій змінюються коефіцієнт передачі, постійна часу та запізнювання. Однак, при дослідженні системи з параметричними невизначеностями доцільно перейти до мультиплікативних невизначеностей, враховуючи невизначеності, викликані іншими факторами.

На рис. 9 наведено перехідні процеси відносно завдання та збурення при номінальних (Not) та найгірших комбінаціях невизначеностей (WC), а в табл. 5 – порівняльні характеристики систем із різними регуляторами. Як бачимо, робастний ППІ-регулятор має найкращу якість перехідних процесів при найгірших комбінаціях невизначеностей та дещо гірші показники в номінальному режимі. Крім того, необхідний керувальний ресурс у цієї системи найменший.

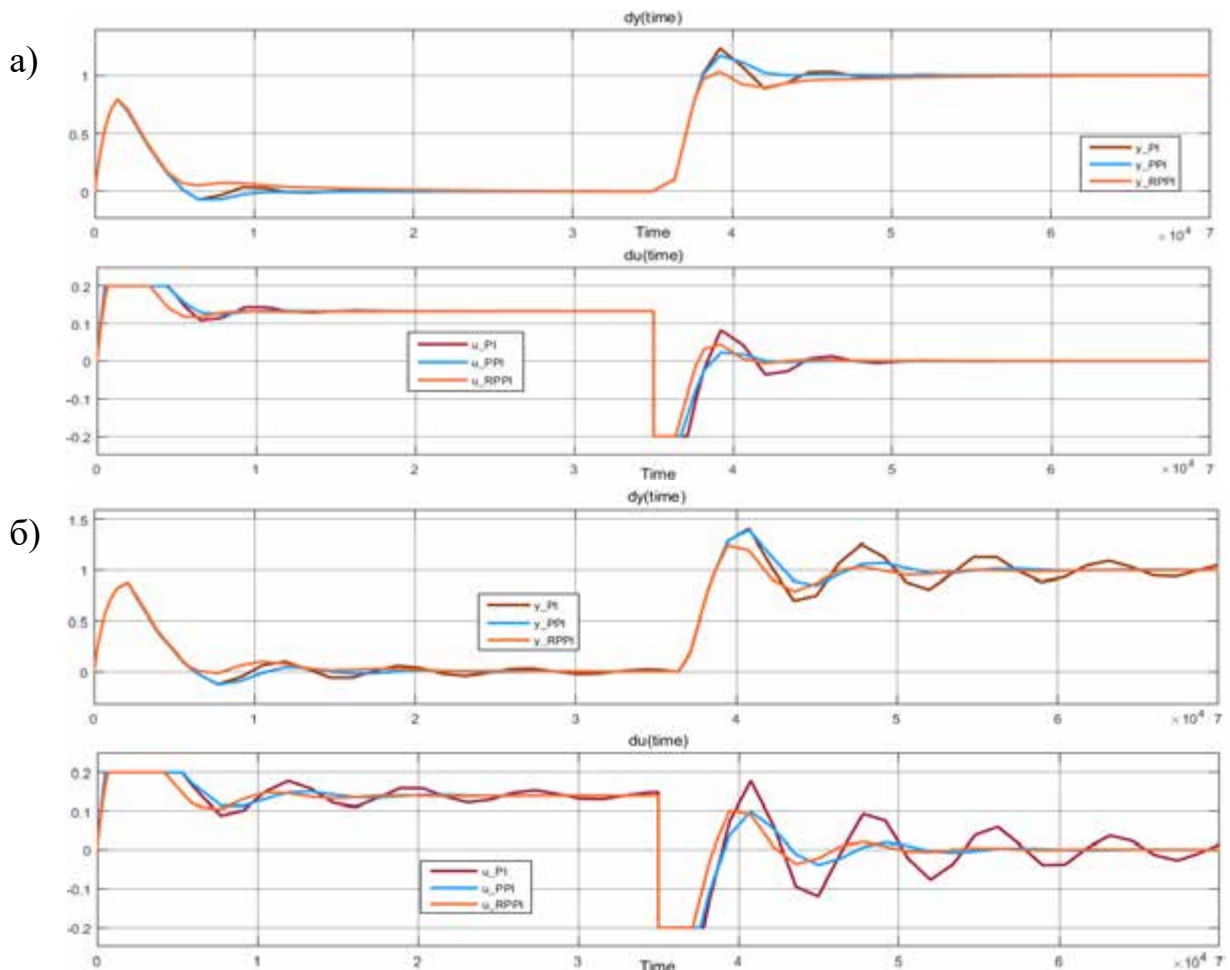


Рис. 9. Перехідні процеси та сигнал керування в системі керування для технологічного об'єкта з запізнюванням при: а) номінальних невизначеностях; б) при найгірших комбінаціях невизначеностей

Таблиця 5

Порівняльні характеристики системи керування для технологічного об'єкта харчової промисловості з запізнюванням

Регулятор	Динамічна похибка, кг/м ³		Час перехідного процесу, с		Інтегрально-квадратичний критерій	
	<i>Nom</i>	<i>WC</i>	<i>Nom</i>	<i>WC</i>	<i>Nom</i>	<i>WC</i>
Перехідні процеси відносно зміни завдання						
ПІ (PI)	0.23	0.40	16500	>35000	3008	3756
ППІ (PPI)	0.17	0.40	12500	25500	3018	3715
Робастний ППІ (RPPi)	0.03	0.25	16500	20000	2999	3668
Перехідні процеси відносно збурення						
ПІ (PI)	0.80	0.89	15000	>35000	2650	3384
ППІ (PPI)	0.79	0.89	14000	26000	2671	3354
Робастний ППІ (RPPi)	0.79	0.89	15000	20000	2683	3338

Якщо оцінити поточну інформацію, до якої належать характеристики вхідних та вихідних сигналів, а також точність ідентифікованої моделі

з невизначеностями, то можна побудувати робастно-адаптивну систему керування з переключенням. При цьому, якщо інформації достатньо, то обирається оптимальна система, якщо ні – робастна система. Пристрій керування в такій системі може змінювати структуру при переході з однієї системи до іншої, або не змінювати – налаштовувати лише параметри регулятора, наприклад, ПІД. Саму систему переключення можна побудувати на базі нечіткого логічного висновку, що допоможе позбутися жорстких меж переходу між керувальними пристроями.

Запропонована робастно-адаптивна система керування може бути спрощена або розширена додатковими функціями. Зокрема, найпростішою такою системою може бути система керування з різними налаштуваннями регулятора з однією структурою за двома критеріями: оптимальним та робастним. Алгоритм переключення працює як логічний висновок за значенням похибки оперативної ідентифікації моделі технологічного об'єкта харчової промисловості.

У роботі наведено схеми та результати імітаційного моделювання робастно-адаптивної системи керування з переключенням (рис. 10) для пластинчастого теплообмінника при номінальних значеннях невизначеностей об'єкта. Відповідно до проведеного моделювання та результатів порівняння (табл. 6) в запропонованій системі на області невизначеності покращуються якість перехідних процесів та знижується ресурс на керування у порівнянні з окремими системами.

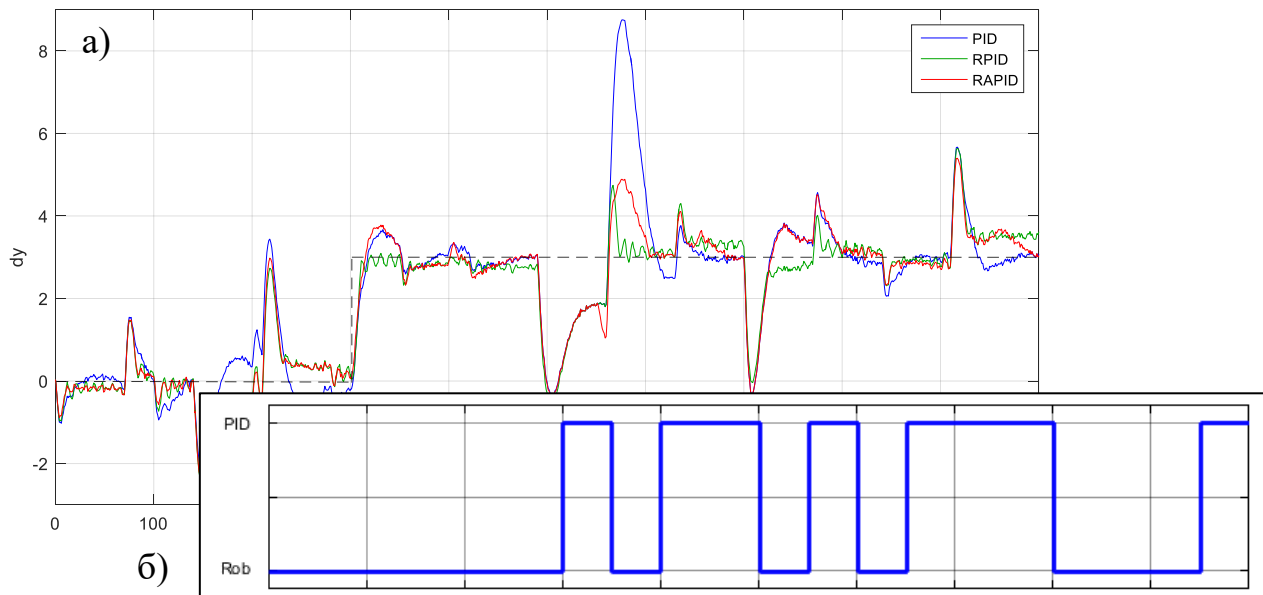


Рис. 10. Результати моделювання: а) перехідні процеси в системах з оптимальним ПІД-регулятором (PID), робастним ПІД-регулятором (RPID) та робастно-адаптивним ПІД-регулятором (RAPID), пунктирна лінія – уставка; б) стани системи з переключенням

Також у роботі показано, що якщо вимоги до системи керування розмиті та не сформульовано чітких вагових функцій для вхідних та вихідних сигналів, то можна побудувати оптимізаційну задачу знаходження вагових функцій

вхідних/вихідних сигналів на основі ефективного компромісу між якістю та енерговитратами.

Таблиця 6

Порівняльні характеристики робастно-адаптивної системи керування

Тип регулятора	Критерій порівняння			
	Інтегрально-квадратичний		$\ H^{w-e}(s)\ _{\infty}$	$\ H^{w-e}(s)\ _2$
	<i>Nom</i>	<i>Usample</i>		
Оптимальний ПД	$2.2 \cdot 10^4$	$[2.1-4.6] \cdot 10^4$	0.282	0.073
Робастний ПД	$2.5 \cdot 10^4$	$[1.6-2.8] \cdot 10^4$	0.156	0.059
ПД із переключенням	$1.8 \cdot 10^4$	$[1.5-2.5] \cdot 10^4$	–	–

У четвертому розділі «**Методи моніторингу та розроблення ефективних систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості в умовах невизначеності**» викладено науково-практичні результати методу розроблення та моніторингу систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності.

Для оцінки ефективності проектних рішень системи керування розглядаються функціональні та нефункціональні вимоги та критерії економічної ефективності та їх зв'язок із рівнем автоматизованого керування. Внаслідок розмитості вимог до системи та неможливості однозначно перекласти економічні вимоги на систему керування, виділені основні атрибути вимог до системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що функціонує в умовах невизначеності: загальні економічні вимоги до системи керування, що визначають ступінь загальних затрат на розробку; вимоги до надійності системи, що визначають ступінь надійності розробленої системи та напряму залежать від імовірності втрати стійкості системи; вимоги до гнучкості системи керування – визначають ступінь гнучкості системи з точки зору оператора процесу; вимоги до якості перехідних процесів або частотних характеристик системи.

Також сформульовані атрибути технологічного об'єкта харчової промисловості, виходячи з міркувань впливу на проблемну область: самовирівнювання, інерційність, ємність, вид технологічної змінної, вимірювання збурень. Наступним етапом було визначено атрибути математичної моделі технологічного об'єкта харчової промисловості, що функціонує в умовах невизначеності: наявність адекватної моделі; тип моделі – лінійна, нелінійна, з можливістю лінеаризації; наявність запізнювання; багатовимірність; ступінь невизначеності; структура невизначеності. Невизначеність математичної моделі розуміється в широкому сенсі як неточність моделі відповідно до функціонування технологічного об'єкта, включаючи його зміни та зміни зовнішнього середовища у процесі роботи. З іншого боку, невизначеність технологічного об'єкта харчової промисловості можна інтерпретувати як множину станів об'єкта, в яких він функціонує. Невизначеність при цьому повинна оцінювати не тільки ступінь відхилення моделі від дійсного опису об'єкта, але й характеризувати можливість прогнозу математичної моделі на деякий відрізок часу.

Вводиться нормувальна міра невизначеності (ступінь невизначеності), що записується так:

$$\kappa = \max_i \frac{\zeta_{i \max}(MM) - \zeta_{i \min}(MM)}{\zeta_{i \max}(MM)}, \quad (11)$$

де $\zeta_{i \max}(MM)$, $\zeta_{i \min}(MM)$ – максимальне та мінімальне значення i -тої числової характеристики математичної моделі на області невизначеності (наприклад, значення параметра).

На основі викладеного формується метод автоматизованого вибору системи керування для складних технологічних об'єктів харчової промисловості, що заснована на прикладній онтології, структуру якої в нотациях діаграми класів UML зображено на рис. 11.

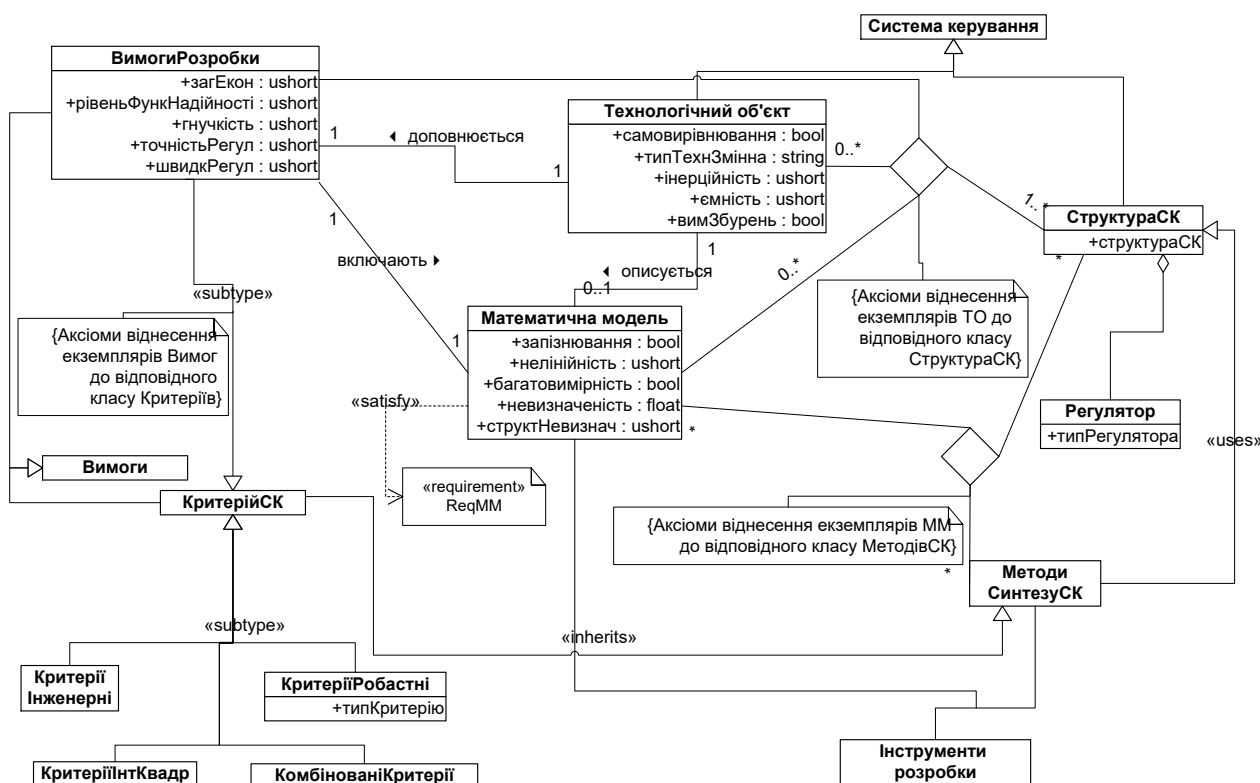


Рис. 11. Структура прикладної онтології в нотациях UML

Онтологія складається із трьох непустих класів (ВимогиРозробки, технологічний об'єкт (ТО) та математична модель (ММ)), екземпляри яких наділені атрибутами, на основі яких розробляється система керування. Дані екземпляри також належать до інших класів, зокрема, відповідно КритерійСК, СтруктураСК та МетодСК, множина яких складає необхідну інформацію для синтезу множини системи керування. Для останнього поділу використовуються правила (аксіоми) класів та екземплярів, що можуть формуватися за допомогою описової логіки. Уточнена схема рішення задачі розроблення системи керування, особливістю якої є: на основі прикладної онтології визначається множина критеріїв, методів та структур системи керування як альтернатив рішень. Далі синтезується кожна система керування і на основі тестування систем на моделях розраховуються прогноз якісних

оцінок кожного рішення. Кінцевим етапом є впорядкування альтернатив за оцінками та визначення найкращого варіанта.

Моніторинг відтворюваності системи керування передбачає поточну оцінку стану системи із виявленням погіршення її роботи, а також прийняття рішення щодо зміни структури або параметрів системи. Дана задача ґрунтується на припущенні, що все технологічне обладнання та технічні засоби працюють у штатному режимі і не виявлено жодної фізичної поломки або збою у програмному забезпеченні.

У роботі запропоновано кількісні оцінки відтворюваності системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, на основі яких можна оцінити ступінь старіння структури і параметрів системи та зробити висновок про її перекопструювання. Такі оцінки будуються на основі виробничих метрик KPIs, таких як критичний індекс можливостей процесу (Critical process capability index) та індекс можливостей технологічного процесу (Process capability index), а також враховують міру центральної тенденції сигналів керування. Прогноз оцінки відтворюваності виконується на нейронній мережі, яка розраховує серію наступних значень регульованих та керувальних змінних. Найкращий результат продемонструвала мережа MLP (багатошаровий перцептрон) 3-3-1, яка забезпечила продуктивність на всіх вибірках 95 %. Задавши 100 наборів дослідних даних, на яких мережа не навчалася, було отримано 93 % ефективності мережі, що доводить можливість її подальшого використання.

У п'ятому розділі «**Розроблення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень та її апробація**» реалізовано прикладну онтологію задачі розроблення системи керування в умовах невизначеності, інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень та викладено результати експериментальних досліджень і практичної апробації.

Метод вибору системи керування для технологічного об'єкта харчової промисловості в умовах невизначеності реалізовано прикладною онтологією на мові OWL, що підтримує описову логіку, за допомогою засобів редактора Protégé 5.5. Онтологія зберігає інформацію про ВимогиРозробки, технологічного об'єкта та математичної моделі у формі знань про екземпляри класів (рис. 12). Відношення між екземплярами використовується для ідентифікації сутностей розроблення системи керування. На рис. 13 наведено VOWL-граф, що відображає класи (Class) та властивості об'єктів (Object Property). Екземпляри класів ВимогиРозробки, технологічний об'єкт та математична модель мають властивості даних (Data Property), визначених у роботі та приведені до відповідних типів даних xsd. Частина властивостей даних було ранжовано за якісною шкалою.

Для віднесення екземплярів класів ВимогиРозробки, технологічного об'єкта та математичної моделі до відповідних підкласів КритеріїСК, СтруктураСК та МетодиСК визначено аксіоми для останніх класів. Шаблон аксіом такий:

Якщо екземпляр технологічного об'єкта (має відповідні атрибути) та (доповнюється екземпляром ВимогиРозробки, що (має відповідні атрибути))

та (описується екземпляром математичної моделі, що (має відповідні атрибути)), то екземпляр технологічного об'єкта відноситься до відповідного підкласу СтруктураСК

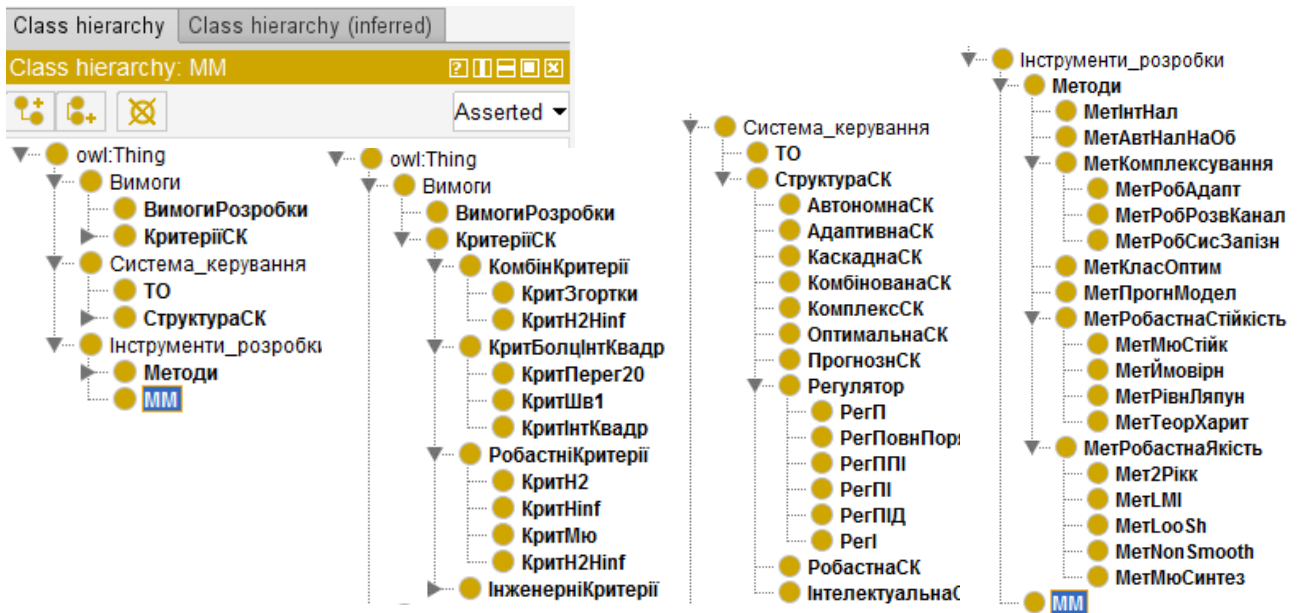


Рис. 12. Ієрархія класів прикладної онтології

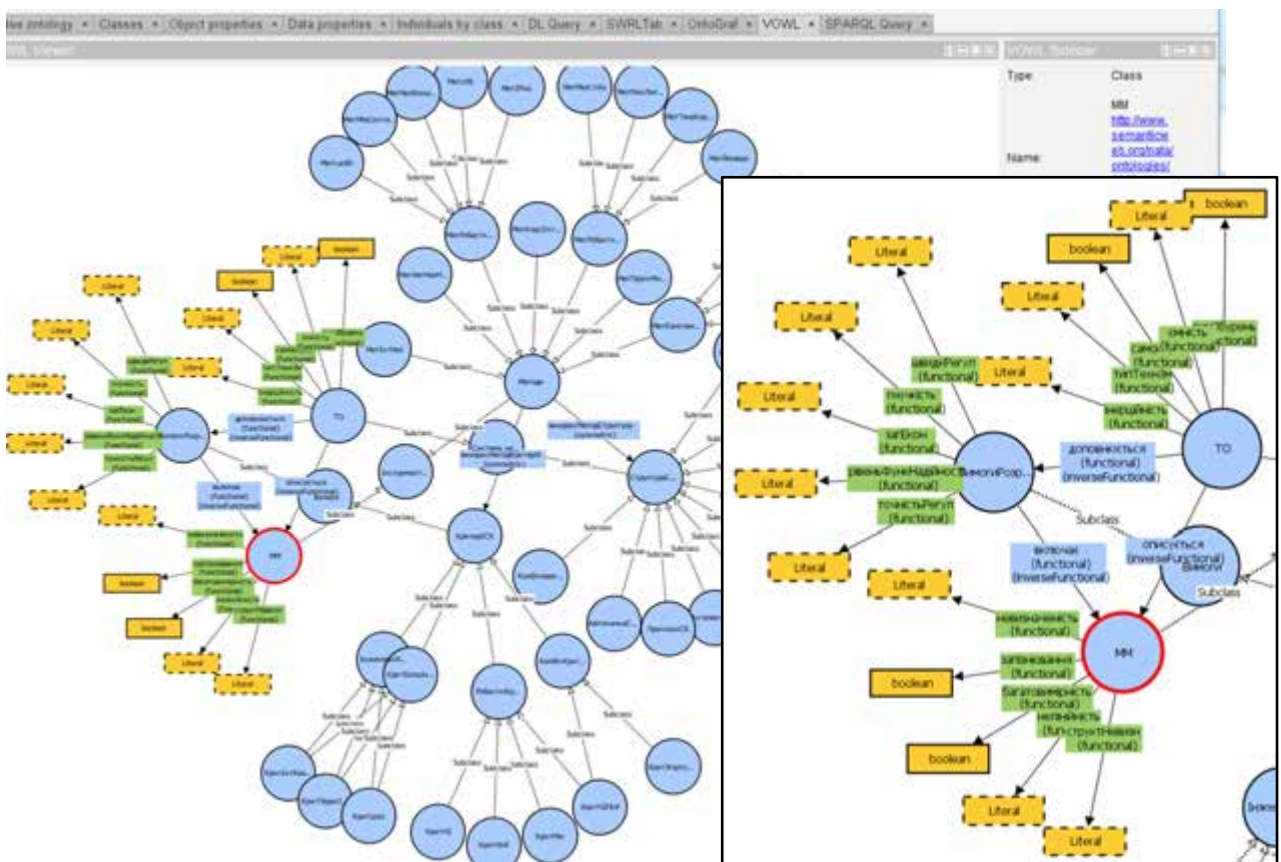


Рис. 13. VOWL-граф розробленої прикладної онтології

Таким чином, отримана прикладна онтологія видає рекомендації щодо методів синтезу, критеріїв та структур для синтезу систем керування складним

технологічним об'єктом харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, на основі екземплярів та атрибутів класів ВимогиРозробки, технологічного об'єкта та математичної моделі.

Перевірка прикладної онтології проводилася на наборі тестових екземплярів класів за допомогою резонера HermiT, DL- та SPARQL-запитів (рис. 14). Зокрема, на рис. 14 наведено множину структур, критеріїв та методів системи керування, за якою можна зробити висновок, що для даного об'єкта та відповідних вимог рекомендується побудова системи керування з ПІД-регулятором або робастної структури, що описана в розділі 3, причому для першої і другої структур можна використати алгоритми негладкого синтезу із множиною визначених робастних критеріїв, а також для другої структури можна використати 2-Ріккати підхід.

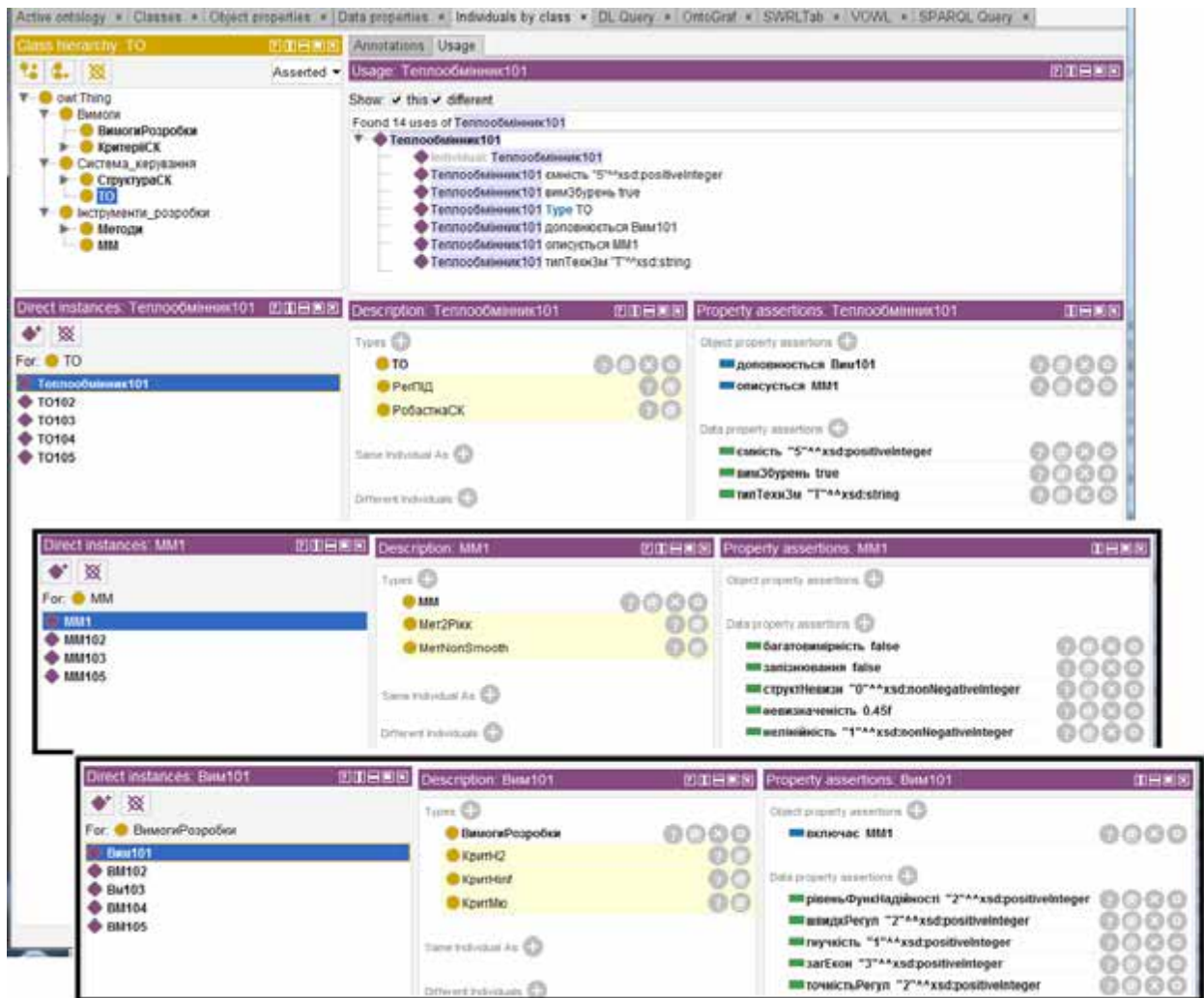


Рис. 14. Приклад роботи резонера на тестових екземплярах

Розроблену онтологію можна використати також для аналізу екземплярів бази знань за атрибутами або класами, а також для науково-практичної діяльності.

Відповідно до методології проектування UML розроблено мінімальний набір діаграм, що реалізує запропоновані рішення у вигляді системи підтримки прийняття рішень і на основі якого сформовано варіанти її архітектури. Одним

із варіантів реалізації пакета «Розроблення системи керування» є підхід, що базується на концепції Industrial internet of things (IIoT). При цьому підході як середовище виконання можна використати Node-RED, що є інструментом програмування для об'єднання апаратних пристроїв, API та онлайн-послуг. Інтеграція інформації онтологічного серверу та Node-Red, що використовується як засіб розроблення та виконання для пристроїв Edge, реалізується за протоколом HTTP. Приклад архітектури та форми користувача зображено на рис. 15. SPARQL-запит формується у URL, що відсилається, а отримана відповідь у форматі html включає дані, що витягаються з онтологічного сервера. Кінцева точка SPARQL, доступна поперх HTTP, таким чином сервер Fuseki забезпечує взаємодію у стилі REST із даними RDF-онтології.

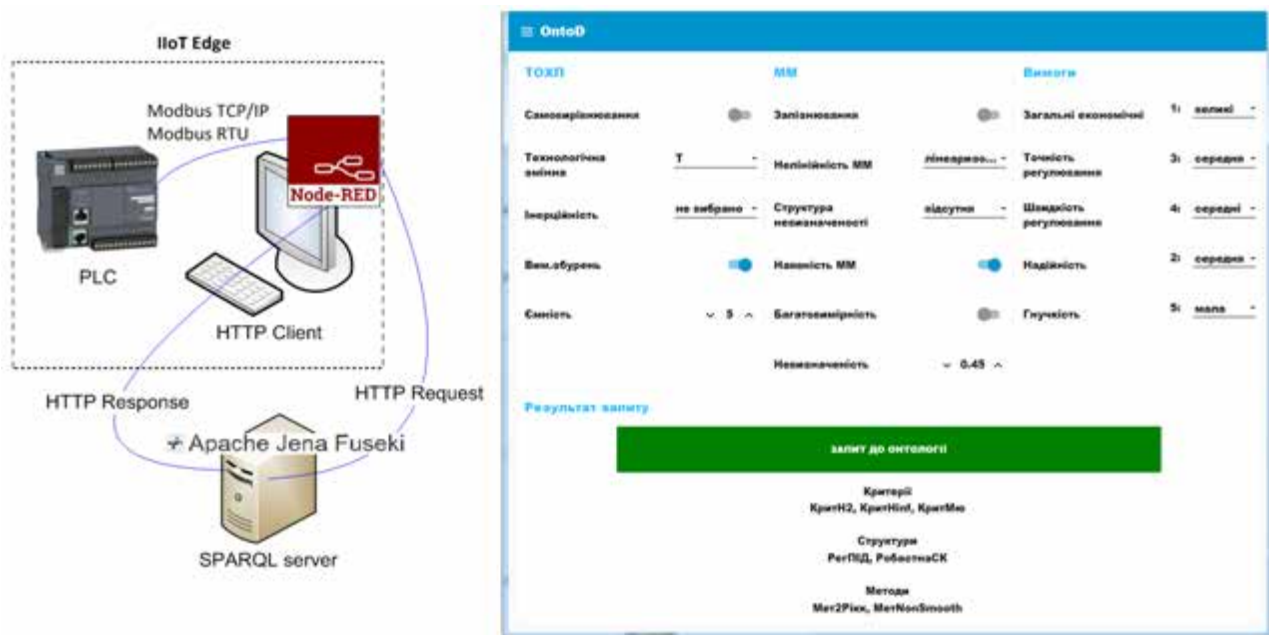


Рис. 15. Фрагмент архітектури онтологічної підсистеми на базі Node-Red-застосунку та форма користувача

Для реалізації запропонованих рішень використано Lite-сервіси, які пропонує хмара IBM Cloud для побудови IoT та IIoT. Для пакету «Моніторинг відтворюваності системи керування» реалізовано такі функції: збір даних для аналізу в реальному часі параметрів і структури системи керування та формування повідомлень; накопичення даних про роботу системи – її життєвий цикл; доступ до даних у необхідному місті, наприклад, через WEB-інтерфейс. Дані функції реалізовані через принцип Device twin (двійник пристрою), що пропонує Watson IoT Platform, також створена логічна модель подій для двійника пристрою. Зі сторони Edge було розроблено програму, яка збирає дані з ПЛК по Modbus RTU та направляє їх до хмари, використовуючи протокол MQTT. Зі сторони хмарного застосунку також розроблено програму в Node-RED, що приймає дані. Для моніторингу процесу використано вбудовані IoT Dashboards, що візуалізують як поточні тренди процесу, так і розраховану оцінку відтворюваності систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості.

Враховуючи, що запропоновані рішення є WEB-орієнтованими і можуть бути реалізовані у хмарі, розроблена система підтримки прийняття рішень або її окремі пакети є економічно вигідними, так як збільшуються оперативність рішень, що приймається, обґрунтованість керувальних дій та ефективність технологічної складової, зменшується ризик втрати стійкості системи керування для технологічних об'єктів харчової промисловості. Крім того, підвищується соціально-економічна ефективність.

ВИСНОВКИ

У дисертації здійснено теоретичне узагальнення та комплексне вирішення науково-прикладної проблеми розроблення та впровадження робастно-оптимальних систем керування для технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, та створення науково-методологічних основ їх застосування й проектування для забезпечення підвищення енерго-, ресурсоефективності та якості виробництва, що має важливе значення в галузі технічних наук.

Основні наукові та практичні результати можуть бути узагальнені в таких висновках:

1. Проведено систематизацію робастно-оптимальних методів керування, на основі якої виявлено, що використання робастно-оптимальних систем керування у структурі інтегрованої автоматизованої системи управління харчовим виробництвом приведе до покращення якості та зменшення витрат енергоносіїв. Показано, що складні технологічні об'єкти харчової промисловості працюють в умовах невизначеності, тому оцінка ступеня невизначеності дає змогу сформулювати умови застосування робастно-оптимальних систем керування. В технічній літературі існує велика кількість методів та підходів робастного, оптимального та робастно-оптимального керування, що обумовлює необхідність класифікації вказаних методів та розвиток їх з урахуванням особливостей складних технологічних об'єктів.

2. На основі системно-онтологічного підходу виділено предметну та проблемну області дослідження, для яких сформульовано модель онтологічної системи, що описує формалізовані закономірності проектування системи керування технологічними об'єктами харчової промисловості, яка функціонує в умовах невизначеності та містить семантичні відношення між об'єктами, процесами й виділеними задачами. Дослідження моделі предметної області показало, що задачу проектування системи керування потрібно розглядати з точки зору основних задач життєвого циклу системи керування та її оточення. Це дасть змогу надійно створювати системи керування в автоматизованому та масштабованому режимах, відстежувати і враховувати особливості роботи систем керування, узгоджувати роботу систем протягом їх життєвого циклу, виконувати переконструювання системи, коли системи керування не забезпечують підтримання заданих значень технологічних параметрів.

3. Розроблено онтологію задач дослідження та онтологію процесів, в рамках яких виконано декомпозицію на відповідні підзадачі, етапи та дії. Це дало змогу сформулювати метод розроблення й моніторингу систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, який забезпечує виконання умов цілісності, інтегрованості та несуперечливості при розробленні системи керування в умовах невизначеності, що, у свою чергу, підвищить загальну ефективність функціонування системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості.

4. На основі виявлених особливостей математичних моделей технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, виділено два типи математичної моделі: з визначеною невизначеністю та з невизначеною невизначеністю. За дослідженнями існуючих підходів до ідентифікації математичних моделей розроблено узагальнену концепцію ідентифікації математичної моделі технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, яка базується на методах довизначення області невизначеності. На основі виконаного моделювання показано ефективність запропонованих підходів до визначення та розроблено рекомендації щодо ідентифікації математичних моделей, орієнтованих на робастне керування. На відміну від існуючих методів, запропоновані підходи не використовують додаткові експериментальні процедури та складні розрахунки. Найкращий результат при розрахунку області невизначеності показав підхід, заснований на методі «складального ножа», зокрема, значення гар-метрики знизилася більше, ніж на 40 % у порівнянні з емпіричним підходом.

5. Формалізовано процес розроблення робастно-оптимальних методів керування для технологічних об'єктів харчової промисловості, які функціонують в умовах суттєвих невизначеностей, враховуючи вимоги щодо ресурсо- та енергоефективності системи, заснованих на:

5.1. Типових вагових функціях для вхідних та вихідних сигналів замкненої системи, що побудовані у зв'язку зі складністю розуміння робастно-оптимальних критеріїв синтезу та неможливістю безпосереднього поєднання з якістю перехідних процесів керування в часовій або частотній областях. Дані функції дають можливість робастно-оптимальний критерій керування використовувати в інженерних задачах синтезу автоматичної системи керування.

5.2. Оптимізаційній задачі знаходження вагових коефіцієнтів вхідних/вихідних сигналів на основі компромісу між якістю та енергоефективністю, якщо вимоги до системи автоматизації розмиті та не сформульовано чітких вагових функцій для вхідних і вихідних сигналів.

5.3. Імітаційному моделюванні робастно-оптимальних систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності за різними критеріями, які показали свою працездатність та ефективність при різних вимогах до системи, що в загальному призводить до зниження H_{∞} -норми замкненої системи більш, ніж у 2 рази.

5.4. Комплексуванні класичної теорії керування для складних технологічних об'єктів харчової промисловості та робастних методів синтезу,

що дало змогу підвищити якість перехідних процесів і зменшити енерговитрати у порівнянні із традиційними системами: для системи керування в умовах інтенсивних зовнішніх збурень обґрунтованим є застосування робастної системи керування за робастно-оптимальним критерієм, використання якої зменшує H_{∞} -норму замкненої системи в 4,5 рази; введення компенсатора для розв'язування каналів керування в багатозв'язній системі керування, коефіцієнти якого розраховуються за H_{∞} -критерієм, зменшують H_{∞} -норму замкненої системи в 2 рази; розрахунок параметрів системи керування для технологічних об'єктів із запізнюванням за H_{∞} -критерієм зменшують динамічну похибку та час регулювання відповідно на 37,5 та 21,6 %; використання системи керування із переключенням в адаптивній системі з ідентифікацією математичної моделі зменшує інтегрально-квадратичний критерій від 10 до 40 %.

6. Запропоновано метод вибору системи керування для технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, який базується на аксіомах прикладної онтології та моделюванні систем. Метод передбачає формування множини варіантів систем керування, зокрема, критеріїв, структур та методів синтезу за особливостями об'єкта, його математичної моделі та вимог до системи, що дає змогу підвищити обґрунтованість вибору критерію й методу системи керування та зменшить час розроблення системи.

7. Реалізовано прикладну онтологію розроблення системи керування для технологічних об'єктів харчової промисловості та систему моніторингу відтворюваності системи керування, які використовуються для формування системи підтримки прийняття рішень, що функціонує згідно з життєвим циклом системи керування та забезпечує оперативність прийняття рішень щодо її переконструювання. Моніторинг системи здійснюється шляхом прогнозування серій вхідних та вихідних сигналів системи керування на нейронній мережі та розрахунку введеної оцінки відтворюваності. Нейронна мережа забезпечила високу продуктивність на тестових вибірках (точність більше 80 %), що доводить можливість її використання.

8. Формалізовано процес створення системи підтримки прийняття рішень із застосуванням розподіленої архітектури та сучасних тенденцій Industry 4.0. Це дозволило чітко визначити місце підсистем моніторингу та розроблення систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності в інтегрованій автоматизованій системі управління виробництвом.

9. Результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію та передані у ТОВ «Технопарк Полесьє», Червонослобідський МПД ДП «Укрспирт», ПАТ «Линовицький цукрокомбінат «Красний»», ТОВ «САУТКОМ» для синтезу робастно-оптимальних систем керування, ідентифікації математичних моделей технологічних об'єктів в умовах невизначеності, моніторингу відтворюваності системи керування, що підтверджено відповідними актами та довідками. Загальна ефективність від впровадження запропонованої системи підвищується на 2,5–4,5 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами: монографія. К., 2015. 288 с. *(Здобувачем розроблено математичні моделі технологічних об'єктів харчової промисловості, виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

Статті у наукових фахових виданнях України, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних

2. Луцька Н. М., Заєць Н. А., Ладанюк А. П. Синтез та порівняння багатовимірних регуляторів для колонної дифузійної установки цукрового заводу. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. 2008. № 1 (21). С. 138–142. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

3. Ладанюк А. П., Луцька Н. М., Іващук В. В. Системи автоматизації технологічних об'єктів в структурі комп'ютерно-інтегрованого управління технологічними комплексами харчових виробництв. Энергетика і автоматика. 2009. № 1. С. 1–6. *(Здобувачем проаналізовано зв'язок критеріїв керування на різних рівнях в структурі комп'ютерно-інтегрованого управління технологічними комплексами харчових виробництв).*

4. Луцька Н. М., Савченко Т. В. Керованість та спостережність технологічних об'єктів управління. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. № 1/5 (43). С. 4–7. *(Здобувачем виконано дослідження спостережності та керованості технологічного об'єкта харчової промисловості).*

5. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М. Визначення спостережності та керованості епюраційної колони з використанням структурного підходу. Пищевая наука и технология. 2010. № 3 (12). С. 111–115. *(Здобувачем виконано дослідження спостережності та керованості технологічного об'єкта харчової промисловості).*

6. Ладанюк А. П., Голованов С. О., Луцька Н. М. Технологічні об'єкти в структурі оперативної оптимізації виробництва. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. № 2/4 (44). С. 41–43. *(Здобувачем проаналізовано зв'язок критеріїв керування на різних рівнях в структурі комп'ютерно-інтегрованого управління технологічними комплексами харчових виробництв).*

7. Заєць Н. А., Луцька Н. М. Розробка алгоритму ідентифікації адаптивної системи управління нестационарними об'єктами. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2011. № 37. С. 149–153. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задачі ідентифікації математичної моделі технологічного об'єкта).*

8. Луцька Н. М. Дослідження робастної стійкості оптимальної системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2012. № 44. С. 71–77.

9. **Луцька Н. М.**, Заєць Н. А. Синтез модального регулятора для системи керування колонною дифузійною установкою в умовах параметричної невизначеності. Вісник національного університету «Львівська політехніка». 2012. № 741.1. С. 54–59. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

10. **Луцька Н. М.**, Власенко Л. О. Розробка багатовимірних оптимальних регуляторів для випарної станції цукрового виробництва, що функціонує в умовах інтервальної невизначеності. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2013. № 52. С. 48–61. *(Здобувачем досліджено робастну стійкість оптимальної системи керування технологічним об'єктом).*

11. Луцька Н. М. Дослідження робастності оптимальної системи керування тепловим об'єктом. Енергетика і автоматика. 2014. № 4. С. 72–79.

12. **Луцька Н. М.**, Ладанюк А. П. Розробка та моделювання робастних систем керування технологічними об'єктами харчової промисловості. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. № 7. С. 35–42. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

13. Луцька Н. М. Дослідження впливу вагових матриць на робастну стійкість оптимальної системи керування. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2015. Т. 21. № 1. С. 21–27.

14. **Луцька Н. М.**, Власенко В. В., Циганенко В. В. Особливості моделювання систем керування технологічними об'єктами з невизначеностями. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. Т. 22. № 4. С. 41–47. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

15. Луцька Н. М. Порівняння методів робастно-оптимальних систем керування для технологічних об'єктів із невизначеностями. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 256. С. 122–128.

16. **Луцька Н. М.**, Гриценко Н. Г. Розробка моделей системи керування бражної колони. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. Т. 22. № 6. С. 22–27. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задачі ідентифікації математичної моделі технологічного об'єкта).*

17. Гриценко Н. Г., Ладанюк А. П., **Луцька Н. М.**, Смітюх Я. В., Кириленко Р. Г. Сучасні методи керування брагоректифікаційними установками. Енергетика і автоматика. 2016. № 3 (29). С. 68–78. *(Здобувачем проаналізовано зв'язок критеріїв керування на різних рівнях в структурі комп'ютерно-інтегрованого управління технологічними комплексами спиртового виробництва).*

18. Ладанюк А. П., Кишенько В. Д., **Луцька Н. М.**, Смітюх Я. В., Шумигай Д. А. Комплексування методів теорії керування в системах автоматизації технологічних об'єктів. Частина 1. Загальні положення. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2017. Т. 23. № 4. С. 8–16. *(Здобувачем розроблено концепцію комплексування робастних та традиційних методів керування для технологічних об'єктів із запізнюванням).*

19. Ладанюк А. П., **Луцька Н. М.**, Кишенько В. Д., Смітюх Я. В., Шумигай Д. А. Комплексування методів теорії керування в системах автоматизації технологічних об'єктів. Частина 2. Приклади. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2017. Т. 23. № 6. С. 7–20. *(Здобувачем виконано моделювання робастної системи керування для технологічного об'єкта з запізнюванням).*

20. **Луцька Н. М.**, Ладанюк А. П. Дослідження робастно-оптимальних систем керування багатозв'язними технологічними об'єктами. Енергетика та автоматика. 2018. № 5. С. 68–81. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

21. **Lutskaya N.**, Zaiets N., Vlasenko L., Shtepa V. Effective robust optimal control system for a lamellar pasteurization-cooling unit under the conditions of intense external perturbations. Ukrainian Food Journal, 2018. Vol. 7. Is. 3. P. 511–521. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

22. Луцька Н. М. Енергоефективність робастно-оптимальних систем керування технологічними об'єктами. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2018. Т. 24. № 6. С. 16–23.

23. Луцька Н. М. Розробка методики ідентифікації математичних моделей технологічних об'єктів з невизначеностями. Енергетика та автоматика. 2019. № 4. Р. 56–69.

24. Ладанюк А. П., **Луцька Н. М.**, Смітюх Я. В., Власенко Л. О., Сашньова М. В. Ефективність інтелектуальних систем керування технологічними об'єктами. Частина 1. Основні положення. Харчова промисловість. 2019. № 25. С. 141–147. *(Здобувачем проведено аналіз та сформовано оцінки для розрахунку ефективності функціонування інтелектуальних систем керування).*

25. **Lutska N. M.**, Ladanyuk A. P., Savchenko T. V. Identification of the mathematical models of the technological objects for robust control systems. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. Vol. 3 (50). P. 163–172. *(Здобувачем розроблено концепцію для ідентифікації математичних моделей технологічних об'єктів із невизначеностями).*

26. Ладанюк А. П., Власенко Л. О., **Луцька Н. М.**, Смітюх Я. В. Проблема забезпечення стійкості інтелектуальних систем керування технологічними об'єктами. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2019. Т. 25. № 2. С. 7–15. *(Здобувачем проведено аналіз та виявлено фактори, що впливають на стійкість інтелектуальних систем керування).*

27. Ладанюк А. П., Власенко Л. О., **Луцька Н. М.**, Смітюх Я. В., Бойко Р. О. Автоматизовані технологічні комплекси: сучасні методи, задачі аналізу та синтезу. Частина 1. Аналіз проблеми. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2020. Т. 26. № 3. С. 7–16. *(Здобувачем виконано аналіз результатів розроблення та впровадження автоматизованих технологічних комплексів на конкретних харчових виробництвах).*

28. Ладанюк А. П., Власенко Л. О., **Луцька Н. М.**, Смітюх Я. В., Бойко Р. О. Автоматизовані технологічні комплекси: сучасні методи, задачі аналізу та синтезу. Частина 2. Приклади реалізації і проблема технологічних ризиків. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2020. Т. 26. № 4. С. 15–22. *(Здобувачем розроблено концепцію та виконано моделювання системи автоматичного керування на основі оцінки технологічних ризиків).*

29. **Луцька Н. М.**, Власенко Л. О., Пупена О. М. Технічні аспекти інтеграції відкритих онтологічних баз знань із сучасними автоматизованими системами управління. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2021. Т. 27. № 1. С. 8–21. *(Здобувачем розроблено архітектуру системи та виконано її тестування).*

Статті в наукових виданнях інших держав

30. **Lutskaya N. N.**, Ladanyuk A. P. Use of Optimal Controllers for Multidimensional Technological Objects. Journal of automation and information sciences. 2007. Vol. 39. № 3. P. 16–24. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального керування, аналіз результатів моделювання).*

31. Ladanyuk A. P., **Lutskaya N. N.** Problems Features of the Robust Control of Process Plants. Part I. Process Plants and their Mathematical Models. Journal of automation and information sciences. 2016. Vol. 48. Issue 9. P. 75–83. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування).*

32. **Lutskaya N. N.**, Ladanyuk A. P. Problems Features of the Robust Control of Process Plants. Part II. Examples of Modeling of Robust Control Systems. Journal of automation and information sciences. 2016. Vol. 48. Issue 12. P. 62–69. *(Здобувачем виконано моделювання систем оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

33. Заець Н. А., Власенко Л. О., **Луцкая Н. Н.**, Штепа В. Н. Современные технологии оценивания режимов работы технологических комплексов пищевых производств. Вестник Брестского государственного технического университета. 2018. № 4 (112). С. 28–31. *(Здобувачем проаналізовано зв'язок критеріїв керування на різних рівнях в структурі комп'ютерно-інтегрованого управління технологічними комплексами харчових виробництв).*

34. Штепа В. Н., Заець Н. А., Прокопеня О. Н., **Луцкая Н. Н.** Вероятностные нейронные сети в задачах управления комбинированными системами водоочистки. Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика

и геоэкология. 2018. № 2. С. 88–90. *(Здобувачем виконано моделювання та оцінку результатів нейронної мережі).*

35. Штепа В. Н., Луцкая Н. Н., Заец Н. А. Управление теплотехническими режимами электротехнологической водоочистки. Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2019. № 3. С. 63–70. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

Тези наукових доповідей

36. Луцька Н. М. Робастна стійкість технологічних об'єктів управління. Автоматика – 2012. XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 26–28 вересня 2012 року: тези доповіді. Київ, 2012. С. 227.

37. **Lutskaya N.**, Vlasenko L. Synthesis of the optimal control system for evaporating station of sugar production in interval uncertainty conditions. The Second North and East European Congress on Food, Kyiv, 26–29 May. Kyiv, 2013. P. 54. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

38. Власенко Л. О., Довженко Є. В., Луцька Н. М. Особливості функціонування технологічного комплексу молокозаводу в умовах невизначеності. Автоматика – 2014: XXI Міжнародна конференції з автоматичного управління, м. Київ, 23–27 вересня 2014 року: тези доповіді. Київ, 2014. С. 78–79. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

39. Луцька Н. М. Моделювання технологічних об'єктів та систем керування з невизначеностями у середовищі Matlab. 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. Київ, 2014. С. 64–65.

40. Ладанюк А. П., Луцька Н. М. Проблема компенсації збурень в робастних системах автоматизації технологічних об'єктів. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 21–22 листопада 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 63–64. *(Здобувачем виконано постановку та розв'язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

41. Lutska N. N. Robust control of heat exchange processes for food industry. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами: III Міжнародна науково-технічна Internet-конференція, м. Київ, 23 листопада 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 100–101.

42. **Lutska N. M.**, Vlasenko L. O. Features simulation of process control with uncertainty. Автоматика – 2016: XXIII Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Суми, 22–23 вересня 2016 року: тези доповіді. Суми, 2016.

С. 96–97. *(Здобувачем виконано постановку та розв’язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

43. Луцька Н. М. Проблема ідентифікації математичних моделей для синтезу робастно-оптимальних систем керування технологічними об’єктами. Автоматика – 2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 13–15 вересня 2017 року: тези доповіді. Київ, 2017. С. 42.

44. Луцька Н. М. Ідентифікація математичних моделей технологічних об’єктів для синтезу робастних регуляторів. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами: IV Міжнародна науково-технічна Internet-конференція, м. Київ, 22 листопада 2017 року: тези доповіді. Київ, 2017. С. 57.

45. Korobiichuk I., **Lutskaya N.**, Ladanyuk A. et al. Synthesis of optimal robust regulator for food processing facilities. Automation 2017: Innovations in Automation, Robotics and Measurement Techniques, Advances in Intelligent Systems and Computing. Warsaw, Poland, 15–17 May 2017. Vol. 550. P. 58–66. *(Здобувачем виконано постановку та розв’язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

46. Луцька Н. М. Сучасний стан та перспективи використання методів робастного керування технологічними об’єктами. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами: V Міжнародна науково-технічна Internet-конференція, м. Київ, 22 листопада 2018 року: тези доповіді. Київ, 2018. С. 70–71.

47. Луцька Н. М. Теоретичні основи створення ефективних систем керування технологічними об’єктами, що функціонують в умовах невизначеності. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електро-технологій та автоматики в АПК: V Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам’яті професора В. М. Синькова, м. Київ, 19 грудня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 133.

48. Zaiets N., Vlasenko L., **Lutskaya N.**, Usenko S. System modeling for construction of the diagnostic subsystem of the integrated automated control system for the technological complex of food industries. 5th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering «ICMRE 2019». Rome, Italy, February 16–19. Rome, 2019. P. 93–98. *(Здобувачем проаналізовано зв’язок критеріїв керування на різних рівнях в структурі комп’ютерно-інтегрованого управління технологічними комплексами харчових виробництв).*

49. Zaiets N., Kondratenko I., **Lutskaya N.**, Zhylytsov A., Usenko S. Modeling and robust optimization of the technological mode of electrotechnological complexes with the renewable energy systems of heat. E3S Web of Conferences, Krynica, Poland, 2020. Vol. 154. P. 254–272. *(Здобувачем виконано постановку та розв’язок задач оптимального та робастного керування, аналіз результатів моделювання).*

50. **Lutskaya N.**, Vlasenko L., Zaiets N., Shtepa V. Ontological aspects of developing robust control systems for technological objects. ICO 2020: Intelligent Computing and Optimization, Advances in Intelligent Systems and Computing book

series, Hua Hin, Thailand, 22–23 April 2021. Vol. 1324. P. 1252–1261. (Здобувачем сформовано проблемну область, онтології об'єктів, процесів та задач проектування систем керування технологічними об'єктами з невизначеностями).

АНОТАЦІЯ

Луцька Н. М. Робастно-оптимальні системи управління складними технологічними об'єктами харчової промисловості. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». Національний університет біоресурсів та природокористування України. Київ, 2021.

За результатами дисертаційного дослідження, а також комплексу науково-дослідних та прикладних робіт за тематикою дисертації запропоновано вирішення науково-технічної проблеми, що полягає в розробленні та впровадженні робастно-оптимальних систем керування для технологічних об'єктів харчової промисловості, що функціонують в умовах невизначеності, та створенні науково-методологічних основ їх застосування та проектування для забезпечення підвищення енерго-, ресурсоефективності та якості виробництва. Висунута проблема вирішується шляхом формування онтологічної моделі предметної області, що містить онтологію об'єктів, задач та процесів, на основі якої формується метод розроблення та моніторингу системи керування технологічним об'єктом харчової промисловості, що функціонує в умовах невизначеності.

Ключові слова: система керування, управління, технологічний об'єкт, робастний регулятор, онтологія, математична модель, предметна область, система підтримки прийняття рішень.

АННОТАЦИЯ

Луцкая Н. Н. Робастно-оптимальные системы управления сложными технологическими объектами пищевой промышленности. – 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, 2021.

По результатам диссертационного исследования, а также комплекса научно-исследовательских и прикладных работ по тематике диссертации предложено решение научно-технической проблемы, которая заключается в разработке и внедрении робастно-оптимальных систем управления для технологических объектов пищевой промышленности, функционирующих в условиях неопределенности и создании научно-методологических основ их применения и проектирования для обеспечения повышения энерго-, ресурсоэффективности и качества производства. Выдвинутая проблема решается путем формирования онтологической модели предметной области, содержащую онтологию объектов, задач и процессов, на основе которой формируется метод

разработки и мониторинга системы управления технологическим объектом пищевой промышленности, функционирующим в условиях неопределенности.

Ключевые слова: система управления, управление, технологический объект, робастный регулятор, онтология, математическая модель, предметная область, система поддержки принятия решений.

ANNOTATION

Lutska N. M. Robust Optimal Control Systems for Complex Technological Objects of Food Industry. – The Manuscript.

Thesis for the 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, 2021.

Based on the results of the dissertation research, as well as a set of research and applied works on the topic of the thesis, there is proposed a solution to the scientific and technical problem which consists in the development and implementation of robust control systems for technological objects of food industry in conditions of uncertainty. In addition, there are created scientific and methodological foundations for their application designed to improve energy and resource efficiency, and quality of production.

The systematization of existing methods of robust stability, robust optimal methods, as well as methods of control system synthesis for objects with uncertainties is carried out. Problems that complicate the use of robust methods for complex technological objects of food industry are identified. An ontological system model for the subject domain of the research, which consists of an ontology of objects, an ontology of processes and an ontology of tasks, is developed. The ontology of objects consists of entities and is interrelated with the ontology of tasks whose main task is to develop the control system of technological objects for food industry and to monitor its reproducibility. The ontology of processes is formulated according to the control system life cycle. It includes the formation of system requirements, the process of identification of the technological object mathematical model with the definition of uncertainty, the formation of many structures and methods for the development of the control system of technological objects for food industry, system testing, selection, monitoring of the control system reproducibility and timely reconfiguration of the system.

A generalized approach to the identification of mathematical models of technological objects for food industry with the correction of nominal values of parameters and additional definition of the region of uncertainty is offered. There have been synthesized numerous robust control systems for technological objects of food industry, in particular for the following facilities: heat exchangers, diffusion and evaporation units, pasteurizers and distillation units. The conditions of their use have been analyzed as well. As a part of the combination of robust and traditional methods for process control, control systems have been developed and tested for the objects with delays, with the solution of cross-channels, as well as robust adaptive control systems for technological objects of food industry. Improvement of the quality

of transients for the proposed approaches in the nominal mode, as well as preservation of robust properties in the region of uncertainty have been proved.

The classification of the control system for technological objects of food industry operating in conditions of uncertainty has been out. Special attention has been paid to some classification features, in particular to the features of maintenance, mathematical model and structure of the control system. On the basis of the conducted classification for the task of the process control development, there have formulated some rules which form a basis of axioms of the applied ontology. Attributes of system requirements classes, technological object of food industry and the mathematical model for object have been used for the creation of the applied ontology that forms a set of the process control structures, methods and criteria. The applied ontology has been tested on test objects, and approaches to its use have been offered.

For the monitoring task, quantitative estimates of the reproducibility of the control system for technological objects of food industry are proposed. Based on these estimates, it is possible not only to assess the degree of aging of the structure and the control system parameters of the system, but also to make a conclusion concerning the redevelopment of the system. There has been performed estimation of the reproducibility, carried out on a neural network that calculates a series of values of adjustable and control variables.

Based on the proposed method of effective design and monitoring of the control system for technological objects of food industry, which consists of the proposed solutions, a decision support system that automatically develops and monitors the control system for technological objects of food industry reproducibility has been created. Several architectures for the implementation of the decision support system and its individual components have been proposed. The probability of the developed method and the possibility of its implementation in the food industry have been defined on the basis of consistent and correct use of the proposed ontological system and algorithmic software. Their adequacy is confirmed by the corresponding calculations and acts of implementation.

Key words: control system, management, technological object, robust controller, ontology, mathematical model, subject domain, decision support system.

Підписано до друку 18.08.21
Ум. друк. арк. 2,6
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Зам. № 210577

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55