

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-03.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

Ярослав Головацький

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Головацький Ярослав Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53:541.13

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Синтез адаптивної системи керування процесом озонування

(назва роботи)

сільськогосподарської продукції

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-1

(шифр групи)

Я.В. Головацький

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доц., к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання)

О.В. Кучмистенко

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С. Борин

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« » 20 25 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Головацькому Ярославу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез адаптивної системи керування процесом озонування сільськогосподарської продукції

керівник роботи к.т.н., Олександр Васильович Кучмистенко

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» 11 20 25 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025

3. Вихідні дані до роботи технологічна схема об'єкта, технологічний регламент, стандарти, каталоги, методичні вказівки, технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз процесу озонування повітря, як об'єкту автоматизації

2. Математичне моделювання системи адаптивного керування

технологічним процесом озонування повітря

3. Синтез системи автоматизації регулювання концентрації озону

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз процесу озонування повітря, як об'єкту автоматизації	10.11.25-24.11.25	
2	Математичне моделювання системи адаптивного керування технологічним процесом озонування повітря	19.11.25-30.11.25	
3	Синтез системи автоматизації регулювання концентрації озону	01.12.24-07.12.25	

Студент _____
(підпис)

Я.В. Головацький _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

О.В. Кучмистенко _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

На магістерську роботу студента Головацький Я.В. на тему: «Синтез адаптивної системи керування процесом озонування сільськогосподарської продукції».

Магістерська робота на здобуття кваліфікації магістра з автоматизації за спеціальністю 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, – Івано- Франківськ, 2025 р.

У роботі досліджено фізичні процеси формування коронного розряду в озонувальному елементі з голчасто-сітчастою електродною системою та розроблено математичні моделі адаптивної системи управління технологічним процесом озонування плодоовочевої продукції. Розглянуто структури одноконтурної та двоконтурної систем управління з використанням рекурентних алгоритмів оцінки змінних параметрів об'єкта, що забезпечують локально-оптимальну підстройку моделей під конкретні партії продукції. Проведено порівняння експериментальних та розрахункових даних для перевірки точності моделі, що підтвердило її ефективність у прогнозуванні параметрів озонування та управлінні концентрацією озону.

Пояснювальна записка до магістерської роботи має обсяг 75 сторінок та містить 15 рисунків, 2 таблиці, 8 літературних джерел.

Результати роботи можуть бути використані для проектування та впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами озонування, підвищення безпеки та якості плодоовочевої продукції, а також для навчальної та наукової діяльності в галузі автоматизації харчових технологій.

Ключові слова: ОЗОНУВАННЯ, АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.

ANNOTATION

For the master's thesis of student Holovatskyi Y.V. on the topic: “Synthesis of an Adaptive Control System for the Ozonation Process of Agricultural Products”. The master's thesis is submitted for the degree of Master in Automation, specialty 174 – Automation, Computer-Integrated Technologies, and Robotics. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2025.

The work investigates the physical processes of corona discharge formation in an ozonation element with a needle–mesh electrode system and develops mathematical models of an adaptive control system for the technological process of fruit and vegetable ozonation. The structures of single-loop and dual-loop control systems are analyzed using recurrent algorithms for estimating variable parameters of the object, which ensure locally optimal adjustment of models for specific product batches. A comparison of experimental and calculated data was conducted to verify the model’s accuracy, confirming its effectiveness in predicting ozonation parameters and controlling ozone concentration.

The explanatory note of the master's thesis comprises 75 pages and includes 15 figures, 2 tables, and 8 references.

The results of the work can be applied to the design and implementation of automated control systems for ozonation technological processes, improving the safety and quality of fruit and vegetable products, as well as serving educational and scientific purposes in the field of food technology automation.

Keywords: OZONATION, ADAPTIVE CONTROL SYSTEM, MATHEMATICAL MODELING, AUTOMATED CONTROL SYSTEMS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ОЗОНУВАННЯ ПОВІТРЯ, ЯК ОБ’ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ	12
1.1. Існуючі методи та підходи до дезінфекції й санації повітря шляхом озонування виробничого середовища	12
1.2. Огляд досліджень присвячених автоматизації процесів озонування повітря	16
1.3. Особливості технологічного процесу утворення озону в негативній короні	18
1.4. Вимоги до системи автоматизованого керування процесу озонування повітря	24
Висновки до розділу 1	30
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ОЗОНУВАННЯ ПОВІТРЯ	32
2.1. Формування адаптивної прогнозувальної моделі технологічного процесу озонування	32
2.2. Ідентифікація та керування технологічним процесом озонування	39
2.3. Ідентифікація та керування технологічним процесом озонування з нестационарними параметрами	46
Висновки до розділу 2	50
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ	52
3.1. Розробка блоку автоматичного регулювання частоти генератора озону.....	52
3.2. Концептуальна блок-схема роботи системи автоматичного регулювання генератора озону	53
3.3. Експериментальне визначення продуктивності та питомого енергетичного виходу озону	57
3.4. Модель адаптивного керування процесом зберігання при озонуванні сільськогосподарської продукції у MATLAB	62
Висновки до розділу 3	70

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

ОВІ – озонатор високовольтних імпульсів;

ОКР – озонатор на коронному розряді;

ВЧ – високочастотний;

ПДК – гранично допустимі концентрації;

ІКР – імпульсний коронний розряд;

ТГІ – тиристорний генератор імпульсів;

БАРЧ – блок автоматичного регулювання частоти;

АРЧ – автоматичне регулювання частоти;

БМ – балансний модулятор.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні технології обробки плодоовочевої продукції спрямовані на підвищення безпеки та тривалості зберігання продуктів харчування, зменшення втрат поживних речовин та контролю мікробіологічного стану. У цьому контексті особливу актуальність набувають методи озонування, які забезпечують ефективне знезараження продуктів без використання хімічних добавок. Оптимізація процесів озонування, автоматизація регулювання та підвищення ефективності технологічного процесу є важливими завданнями сучасної харчової та біотехнологічної промисловості, що визначає актуальність теми дослідження.

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Вибір теми обумовлений потребою розробки інтелектуальних систем управління технологічними процесами озонування, здатних враховувати нестационарність та багатовимірність об'єкта управління. Незадовільна ефективність існуючих систем та відсутність комплексних підходів до прогнозування та адаптивного регулювання технологічного процесу в умовах різноманітності плодоовочевої продукції стимулювали проведення даного дослідження.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є розробка та обґрунтування методології створення адаптивної системи управління процесом озонування плодоовочевої продукції на основі математичного моделювання, аналізу електрофізичних процесів та застосування методів прогнозування. Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання: аналіз фізичних явищ у зоні коронного розряду та формування електричного поля; моделювання ідентифікації об'єкта управління та побудова адаптивної прогнозуючої системи; розробка математичних моделей одноконтурної та двоконтурної систем управління; визначення ефективності управління за різних параметрів продукції та умов експлуатації системи.

Об'єктом дослідження є технологічний процес озонування плодоовочевої продукції, який включає формування коронного розряду та хімічне перетворення

озону у робочому об'ємі.

Предметом дослідження є закономірності функціонування озонувального елемента з голчасто-сітчастою електродною системою та алгоритми адаптивного управління процесом озонування з урахуванням дискретності та варіабельності характеристик продукції.

Методи дослідження.

У роботі використано комплекс методів наукового аналізу, експериментального дослідження та математичного моделювання. До них належать теоретичний аналіз електрофізичних процесів коронного розряду, розробка математичних моделей об'єкта управління та адаптивної системи, рекурентні алгоритми оцінки змінних коефіцієнтів, чисельне моделювання та статистичний аналіз вимірюваних параметрів продукції.

Новизна отриманих результатів полягає у поєднанні фізичного аналізу електродної конфігурації «голка-сітка» та методів адаптивного управління технологічним процесом озонування. Запропоновано підхід до побудови прогнозуючих моделей, які інваріантні до змін вхідних характеристик продукції та забезпечують підвищену точність управління в умовах нестационарності та багатовимірності об'єкта.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

В рамках діючих наукових програм акцентується увага на розробці нових технологій та систем управління, які здатні оптимізувати процеси харчової промисловості.

Результати дослідження можуть значно вплинути на розвиток інновацій у галузі харчового виробництва, підвищуючи конкурентоспроможність підприємств на ринку та їх здатність відповідати сучасним вимогам щодо екологічності та ефективності технологій.

Практичні значення отриманих результатів.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження адаптивних систем управління для оптимізації процесів озонування плодоовочевої продукції, підвищення якості та безпеки продуктів, зменшення втрат і зниження енергетичних

витрат у виробництві. Розроблені методики можуть бути використані при проектуванні промислових установок, у технологічних регламентах та системах моніторингу.

Структура та обсяг магістерської роботи. Пояснювальна записка до магістерської роботи має обсяг 75 сторінок та містить 15 рисунків, 2 таблиці, 8 літературних джерел.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ОЗОНУВАННЯ ПОВІТРЯ, ЯК ОБ'ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Існуючі методи та підходи до дезінфекції й санації повітря шляхом озонування виробничого середовища

Використання озону як активного дезінфекційного агента має тривалу історію, що бере свій початок у дослідженнях А. П. Доброславіна, який ще у 1874 році запропонував його як ефективний засіб проти патогенної мікрофлори [1]. З плином часу феномен окисної активності озону набув широкого технічного застосування, зокрема в технологіях очищення питної води, де його здатність швидко вступати в реакції з органічними та неорганічними домішками підтвердила високу придатність для задач знезараження. Проте у контексті виробничих приміщень особливий інтерес становить його дія на поверхневу мікрофлору та на зважені у повітрі бактеріальні аерозолі, які становлять істотну небезпеку у робочому середовищі.

На підставі результатів експериментальних робіт [2] сформульовано висновок про переважно поверхневий характер впливу озону, що зумовлено механізмами його взаємодії з клітинними структурами, які локалізуються у верхніх шарах субстратів або у повітряній фазі. Такий механізм забезпечує ефективне руйнування мікроорганізмів, що безпосередньо контактують з озоним середовищем. Подальше уточнення параметрів впливу показало [3], що при температурах 288–293 К та відносній вологості повітря 80–95 % концентрація озону, нижча за 1 мг/м³, не створює істотного інгібувального ефекту на патогенну мікрофлору. Лише перевищення цього порогу забезпечує стабільне пригнічення розвитку пліснявих колоній, що свідчить про виражену залежність ефективності озонування від узгодження концентраційних та метеорологічних параметрів.

У промисловій практиці озон виконує важливу санітарну функцію, забезпечуючи очищення повітря в об'ємних спорудах, видалення запахів,

пригнічення шкідливих випарів і запобігання біодеградаційним процесам у харчовій та переробній промисловості [4]. Завдяки високій реакційній здатності озон ефективно руйнує бактеріальні клітини, відповідальні за псування продукції, попереджує утворення плісняви та слизових нальотів і тим самим сприяє стабілізації мікробіологічного стану технологічного середовища. Для знешкодження гнилоствних бактерій та спор при температурі 277 К та відносній вологості 60–90 % достатньою є концентрація озону у межах 0,08–0,2 мг/м³, що відображає високу біоцидність навіть малих доз при оптимальних параметрах середовища. За аналогічних концентрацій озон пригнічує розвиток пліснявих грибів на упаковці для зберігання фруктів за температури 273 К, що додатково демонструє універсальність його дії в умовах харчових виробництв.

Поглиблені мікробіологічні дослідження, присвячені впливу озону на фітопатогенні гриби *Fusarium solani*, *Phytophthora infestans* та *Rhizoctonia solani*, висіяні на тверді живильні середовища, підтвердили важливість комплексного підбору параметрів озонування. Експерименти проводилися за концентрацій озону 12–15 мг/м³ при температурі 291 К та відносній вологості 80–90 % з експозиціями 20 хв., 3 год. та 24 год., а також за аналогічних концентрацій при зниженій температурі 277 К та вологості 85–90 %. Додаткові дослідження при концентрації 30 мг/м³ із тривалістю озонування 48 год. [5] дозволили оцінити поведінку культур у розширеному діапазоні умов.

Оброблення озоном у концентрації 12–15 мг/м³ при температурі 291 К спричинило помітне зниження темпів росту колоній *Fusarium solani*, що чітко відображено на рисунку 1.1. Зниження інтенсивності росту упродовж трьох годин становило подвоєння ефекту інгібування порівняно з контрольними зразками, а збільшення експозиції до 24 годин призводило до п'ятикратного посилення гальмівного впливу. Аналіз залежності швидкості росту цього гриба від тривалості озонування при температурі 277 К показав дещо іншу динаміку: дія озону впродовж трьох годин знижувала швидкість росту лише на 10 %, проте при 48-годинній експозиції інгібування досягало майже 4,4 разу. Такі результати підтверджують визначальну роль температури у реалізації антимікотичного ефекту

озону, що пов'язано з впливом температурного режиму на кінетику руйнування клітинних структур і швидкість дифузії озону в мікробні матриці.

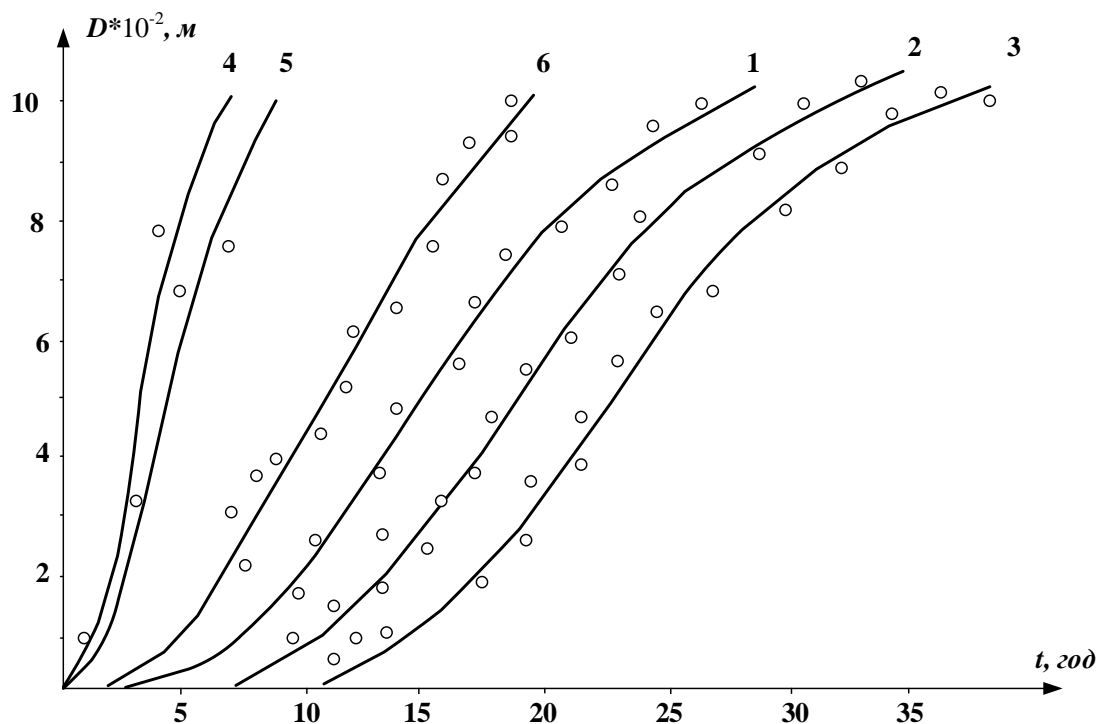


Рис. 1.1. Оброблення озonom колоній гриба *Fusarium solani* при температурі 291 К

Питання забезпечення збереженості харчових продуктів становлять фундаментальну складову аграрного виробництва, харчової промисловості, торговельної інфраструктури й систем громадського харчування, оскільки саме у цих сферах від ефективності технологій зберігання залежить не лише економічна результативність, а й безпека продовольчого забезпечення населення. Якість продуктів упродовж тривалого зберігання зазнає суттєвих змін, що зумовлено природою біологічних процесів, які продовжують розвиватися в тканинах рослинної чи тваринної сировини навіть після її відокремлення від біологічної системи. Особливо інтенсивними є ферментативні реакції, активація яких призводить до гідролізу, окиснення, розпаду складних органічних сполук і поступового зниження харчової цінності або органолептичних властивостей продуктів. Своє вагомe місце у цих процесах займає діяльність мікроорганізмів, які розкладають органічні речовини до простих сполук, інколи продукуючи токсичні

метаболіти, що поглиблюють деградацію харчової сировини та становлять потенційну небезпеку для здоров'я споживача.

Попри значний прогрес сучасних методів зберігання харчових продуктів, їх інтенсивний розвиток та удосконалення технологічних процесів, аналіз ринку продовольчої сировини демонструє значні втрати, що виникають через обмеження існуючих підходів. Особливо виражено це проявляється у зберіганні овочів і фруктів, де нестабільність мікроклімату, недостатність вентиляційних режимів, незбалансованість температурно-вологісних параметрів і мікробіологічна активність призводять до значних економічних збитків. Відомо, що у звичайних овочесховищах втрати картоплі можуть досягати майже третини від загального обсягу, що є істотним показником неефективності існуючих систем зберігання. Аналогічні проблеми спостерігаються під час зберігання цукрових буряків у кагатах, де втрата від трьох до восьми відсотків цукру внаслідок ферментативного розпаду відповідних полісахаридів формує додаткові витрати сировини й трудових ресурсів, що відчутно знижує рентабельність виробництва.

Окремого наукового значення набуває застосування електрофізичних методів впливу, зокрема електростимуляції, яка відкриває перспективи для прискорення біохімічних реакцій та регуляції ферментативних процесів. Використання електричного розряду створює умови для інтенсифікації повільних біохімічних механізмів, що характерні для проростання і підготовки зернових культур, зокрема ячменю у процесі виготовлення солоду. У таких умовах виникає можливість значного скорочення тривалості технологічного циклу приблизно удвічі, що супроводжується підвищенням виходу екстрактивних речовин та помітним покращенням якості готової продукції, зокрема пива. Це створює наукове підґрунтя для розширення спектра застосувань електростимуляції у біотехнологічних процесах, у тому числі в системах зберігання та перероблення харчових продуктів, де виникає реальна можливість інтегрування таких технологій у комплексний підхід до отримання продукції з мінімальними втратами та низьким рівнем відходів.

Вплив коронного розряду та високоефективних озонових технологій

розглядається як перспективний напрям у регуляції ферментативних і мікробіологічних процесів, що мають суттєве значення в умовах зберігання харчових продуктів. Проте наявний експериментальний матеріал щодо комплексної дії озону та електричного поля на живі системи поки що не дає можливості сформулювати однозначні висновки. Існує лише загальне розуміння того, що реакція культур клітин на такі впливи може суттєво варіюватися залежно від їх видової належності, фізіолого-біохімічного стану та параметрів зовнішнього середовища. У певних ситуаціях спостерігається стимулювальний ефект, тоді як за інших умов фіксується виражене пригнічення життєдіяльності, що суттєво ускладнює формування універсальної концепції застосування цих методів у промислових технологіях та потребує поглиблених систематичних досліджень [37].

1.2. Огляд досліджень присвячених автоматизації процесів озонування повітря

Сучасний стан досліджень, присвячених автоматизації процесів озонування повітря, формується під впливом складної фізико-хімічної природи цього процесу та високої чутливості озону до зміни умов синтезу. Якість озонування повітря визначається поєднанням характеристик озоногенераторів, режимів охолодження, параметрів підготовки повітря та рівня електричної енергії, яка витрачається на формування озоновмісної суміші. У динаміці ці залежності описуються складною системою диференціальних рівнянь, що характеризуються значною розмірністю простору станів та векторів керувальних впливів. Через це реалізація оперативної оптимізації технологічної складової собівартості озонування на практиці залишається надзвичайно складним завданням. Оптимізаційні процедури в реальному часі вимагають великих обчислювальних ресурсів і детальних моделей, що відображають нелінійність, гістерезис, залежність від температури та вологості, а також стохастичні зміни параметрів повітряного середовища.

Попри складність оптимального керування озонуванням, можливо

сформувати підхід, який забезпечує наближення до оптимуму без необхідності вирішення повномасштабної задачі оптимізації. Такий підхід спирається на аналіз структури технологічного процесу та врахування фундаментальних закономірностей формування озону. Найбільші енергетичні витрати зосереджені у процесі отримання озону, який характеризується залежністю від інтенсивності коронного розряду, режимів охолодження, електричної потужності генератора та складу початкової повітряної суміші. Саме стабілізація складу озоновоздушної суміші є одним із найефективніших шляхів підвищення точності дезінфекції та санітарної обробки приміщень, що використовуються для зберігання сільськогосподарської продукції. Розбалансування цього складу зазвичай виникає під впливом зміни продуктивності окремих агрегатів та технічного стану обладнання, що формує повільні, але суттєві зовнішні збурення.

Ці збурення проявляються з малою частотою, що характерно для режимів усталеного функціонування обладнання. Різкі зміни параметрів спостерігаються лише під час аварійних ситуацій або планових перемикань апаратів, пов'язаних із проведенням технічного обслуговування чи ремонту. Відтак система керування повинна орієнтуватися на стабілізацію робочих параметрів у режимах, що характеризуються відносною повільністю змін, забезпечуючи плавне коригування режимів охолодження, осушування та синтезу озону.

Зміна продуктивності окремих апаратів або технологічної установки загалом впливає на величину функціонала, що описує витрати, пов'язані із синтезом озону. Проте оптимальні значення параметрів внутрішніх потоків, які визначають концентрацію озону на виході генератора, зберігають сталість у широкому діапазоні робочих режимів. Виняток становлять лише ситуації з різким зростанням навантаження, коли режимні обмеження втрачають свою ефективність, що потребує корекції стратегій керування та перегляду допустимих меж технологічних параметрів.

У типовому режимі система автоматичного керування має забезпечувати підтримання стабільного складу внутрішніх потоків атмосферного та озонованого повітря для забезпечення заданої концентрації озону, необхідної для дезінфекції та

санації. Якщо ж зміни продуктивності генераторів або агрегатів підготовки повітря не дозволяють задовольнити ці вимоги, виникає потреба у зміщенні діапазонів стабілізації температури, вологості та параметрів електророзрядного синтезу. За таких умов відбувається перехід від автономного керування окремими апаратами до інтегрованого керування комплексом технологічного обладнання, коли вирішення задачі оптимізації відбувається на рівні всієї системи, а отримані результати задають нові робочі режими для кожного апарата технологічної схеми.

Ефективна реалізація такої автоматизованої системи керування технологічним процесом потребує узгодженої взаємодії апаратного, програмного та інформаційного забезпечення, а також участі кваліфікованого оперативного персоналу. Оператор може виконувати функції в межах замкненого контуру керування або діяти поза ним, спираючись на рекомендації системи щодо раціональних режимів роботи установки озонування. У таких умовах система виконує функцію інформаційно-консультативного компонента, забезпечуючи підтримку прийняття рішень.

У класичній теорії автоматичного керування відомо, що розімкнені системи з компенсацією збурень забезпечують високу стійкість і суттєве зростання швидкодії, оскільки реакція на збурення формується до того, як відхилення проявиться у вихідних параметрах. У контексті озонування це означає, що величини, які характеризують зовнішні впливи, наприклад температура навколишнього повітря, функціонують як збурювальні дії, що визначають реакцію керуючої системи та формують закономірності її поведінки.

1.3. Особливості технологічного процесу утворення озону в негативній короні

Особливість коронного розряду в електродних системах, що містять голчасті коронуючі електроди, полягає у тому, що просторово-зарядові структури формуються в умовах істотної неоднорідності локального електричного поля. Кривизна поверхні електрода визначає концентрацію силових ліній поля, тому

початкова напруженість на різних ділянках поверхні електрода змінюється пропорційно кривині. Найбільші значення напруженості спостерігаються поблизу кончика голки, де радіус кривизни мінімальний, що формує первинну зону іонізації. У початковому стані саме ця зона є джерелом виникнення коронного розряду, оскільки електричне поле тут набуває значень, достатніх для стартової іонізації молекул газу в міжелектродному проміжку.

У міру підвищення прикладеної напруги відбувається поступове розширення активної зони, і коронування починає поширюватися з області біля кончика голки на більш віддалені ділянки поверхні. Це зумовлено тим, що зростання потенціалу призводить до перерозподілу силових ліній, які охоплюють більшу частину поверхні електрода, хоча локальна напруженість у цих областях не досягає первинного максимуму, що був біля кончика. Таким чином, коронний розряд у системах з голчастими електродами характеризується динамічною зміною геометрії активної зони, яка поступово охоплює периферійні ділянки електрода. Умови виникнення коронного розряду на цих периферійних зонах істотно відрізняються від умов первинної іонізації, оскільки тут напруженість поля формується не лише прикладеною напругою, але й характером вже існуючого просторового заряду, що модифікує локальну структуру поля.

Для аналітичного опису поля у зовнішній області уніполярного коронного розряду вводять низку наближень, які дозволяють отримати математично зручну модель без необхідності врахування складної мікроструктури коронного об'єму. Головною ідеєю є представлення коронного розряду у вигляді тонкого іонізаційного «чехла», який утворюється біля поверхні електрода. У теоретичних розрахунках вважається, що цей іонізаційний шар однорідний у просторі та часі, а його товщина настільки мала порівняно з характерними розмірами електродної системи, що не впливає на загальний розподіл електричного поля у зовнішній області.

У моделі також закладається уявлення про те, що напруженість електричного поля поблизу поверхні коронуючого електрода стабілізується на рівні початкової напруженості E_0 . Це означає, що незалежно від сили коронного розряду або

щільності струму в коронній зоні система врівноважується таким чином, що поле у безпосередній близькості до електрода не перевищує або не зменшується відносно значення, яке ініціює розряд. Така стабілізація є характерною ознакою уніполярної корони, оскільки просторовий заряд позитивних або негативних іонів, що утворюється, саморегулює інтенсивність поля.

Рух іонів у зовнішній області описується з урахуванням того, що їхня швидкість визначається напруженістю поля, оскільки на великій відстані від електрода зіткнення іонів із молекулами газу відбувається у квазістаціонарному режимі. У моделі також передбачається, що рухливість іонів K є величиною, яка не змінюється із часом або координатою, а їх швидкість визначається співвідношенням $V_i = K \cdot E$. Така ідеалізація дає змогу подати залежність густини просторового заряду та струму у вигляді аналітичних функцій, що робить можливим подальший розрахунок характеристик озону й параметрів озонувального елемента.

У структурі озонуючого елемента, поданого на рисунку 1.2, спостерігається функціональна взаємодія геометрично та електрофізично відмінних компонентів, що формують єдиний коронно-розрядний простір, у якому відбувається ініціювання, підтримання та протікання процесів генерації озону. Центральним елементом системи виступає коронуючий електрод (1), виконаний у вигляді загостреної голки з малим радіусом заокруглення вершини r_3 . Саме ця геометрична особливість визначає здатність електрода створювати екстремальний градієнт електричного поля, оскільки локальна кривизна поверхні зумовлює ефект концентрації силових ліній у безпосередній зоні навколо кінчика голки. Таке зосередження поля формує умови для інтенсивної іонізації молекул кисню навколишнього середовища, що є вихідним етапом у послідовності реакцій утворення озону. Діаметр коронуючого електрода d впливає на розподіл потенціалу вздовж його довжини, а також на теплові та електричні навантаження, що виникають під час роботи у режимі коронного розряду.

Паралельно до коронуючого електрода розташована плоска металева сітка (2), яка виконує роль збірного електрода та створює рівномірну площину

вирівнювання потенціалу, забезпечуючи стабільні умови для формування електричного поля в міжелектродному проміжку. Відстань між кінчиком голки і площиною сітки визначається параметром h , який суттєво впливає на інтенсивність розряду, оскільки саме через зміну h можна регулювати як напруженість поля, так і зону розвитку плазмових процесів. Сітка водночас виконує функцію просторового обмежувача, який стабілізує геометрію іонізаційної області та сприяє відтоку надлишкових зарядів, перешкоджаючи неконтрольованому переходу коронного розряду в дуговий.

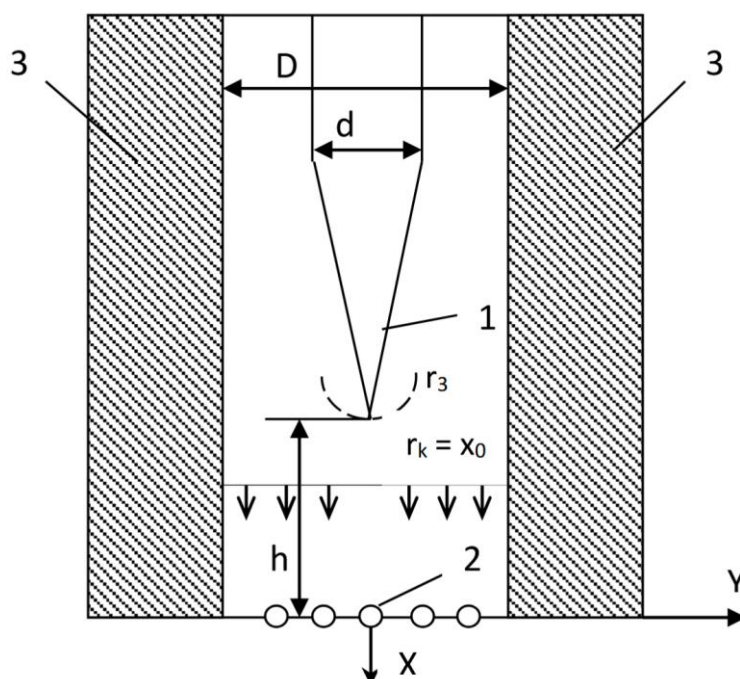


Рис. 1.2. Функціональна схема озонувального елемента: 1 – коронивальний електрод, 2 – плоска сітка, 3 – корпус озонувального елемента

Корпус озонуючого елемента (3), що має діаметр D , створює захисну та структуроутворюючу оболонку, в середині якої формується робочий об'єм системи. Матеріал і геометрія корпусу визначають характер електричного поля поблизу поверхонь, можливість локальних накопичень заряду та поведінку високовольтних ліній у замкнутій конфігурації. Корпус утворює замкнений діелектричний простір, у якому формується стабільний газодинамічний режим, що сприяє рівномірному розподілу озонвмісного потоку. Габаритні параметри корпусу задають умови для розвитку об'ємної іонізації та визначають ефективність

масообміну між утвореним озоном і середовищем, що обробляється.

Принципово важливим параметром виступає відстань r_k від поверхні електрода до точки, у якій ефективний кут електричного поля α_{ef} зводиться до нуля. Цей параметр характеризує межу області, де інтенсивність коронного розряду максимальна, а отже, де зосереджено основне утворення активних частинок, включно з озоном, атомарним киснем та різноманітними короткоживучими радикалами. Радіус r_k визначає особливості просторової структури розряду, відображаючи закономірності згасання поля та відстань, на якій відбувається перехід іонізаційного шару до слабоіонізованої зони.

Функціонування озонуючого елемента базується на утворенні коронного розряду в електродній системі «голка–сітка», що реалізує складний комплекс взаємопов'язаних електрофізичних процесів. Після подачі високої напруги на коронуючий електрод формується інтенсивний електричний градієнт, який призводить до ударної іонізації молекул кисню, внаслідок чого утворюються позитивні та негативні йони, а також вільні електрони. Локальна концентрація зарядів у зоні кінчика голки породжує мікроплазмовий шар, у межах якого ініціюється послідовність реакцій дисоціації та рекомбінації. Атомарний кисень, що утворюється під дією електронного удару, вступає у реакції з молекулами кисню, формуючи озон відповідно до механізмів $O_2 \rightarrow 2O$ та $O + O_2 \rightarrow O_3$. Процес супроводжується коливальними та збудженими електронними станами, які впливають на кінетику реакцій і визначають енергетичний баланс озонаторного модуля.

У сформованому міжелектродному просторі газова суміш рухається через область з максимальною іонізацією, у якій відбувається збагачення повітря озоном. Подальше переміщення потоку відбувається до вихідного каналу озонатора, де озонований газ вводиться у рідину або направляється до відповідного технологічного об'єкта. Ефективність роботи системи залежить від стабільності електричного поля, теплових втрат, інтенсивності масообміну та рівномірності газодинамічних потоків, що визначає необхідність точного дотримання геометричних параметрів, поданих на рисунку.

Функціональна схема озонатора, наведена на рисунку 1.3, демонструє пристрій, що працює в напівзакритому режимі і використовує окремо розташовані озонуючі елементи та додаткові коронуючі електроди для створення направленої електричного потоку повітря, відомого як «електричний вітер».

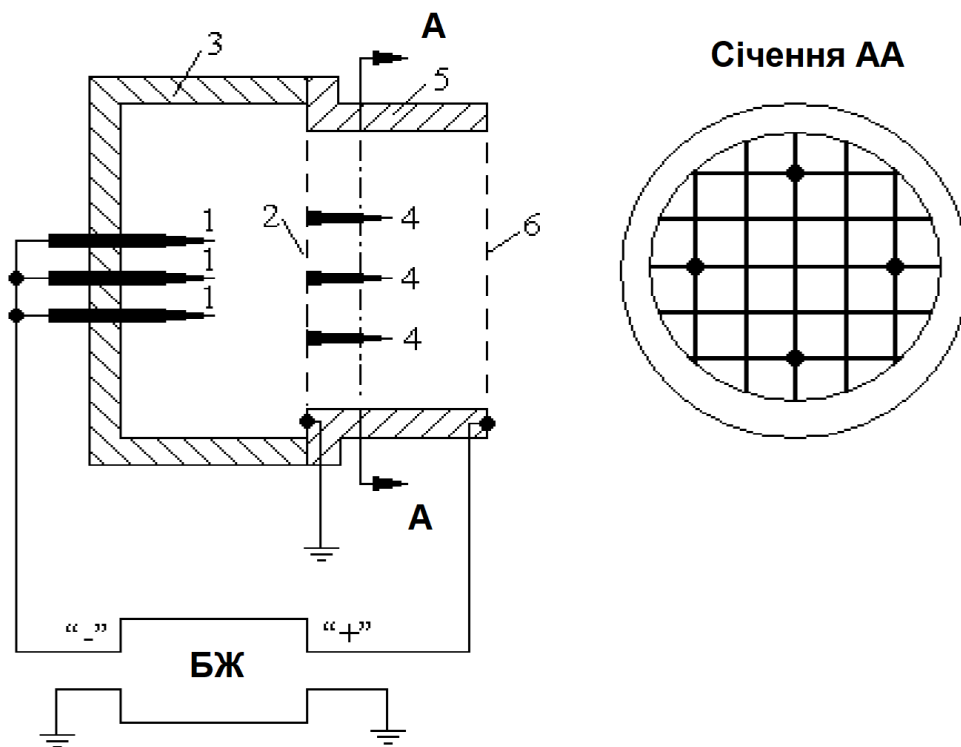


Рис. 1.3. Функціональна схема озонатора, який працює в режимі напівзакритого контуру

Кожен із чотирьох озонуючих елементів складається з електродної системи «ігла-сітка». Коронуючий електрод (1) виконаний у вигляді гострої ігли, до якої підводиться високовольтне негативне живлення, а плоский зовнішній електрод (2) у вигляді сітки заземлений і забезпечує збір іонів та стабілізацію електричного поля. Обидва електроди розміщені у закритій частині ізоляційної труби (3) із озоностійкого матеріалу (фторопласт, винипласт), що гарантує надійність і безпеку роботи. Геометричні параметри елементів (радіус закруглення ігли $r_0=0,2r_0 = 0,2r_0=0,2$ мм, діаметр труби 16 мм, відстань від кінчика ігли до сітки $r_1=6r_1 = 6r_1 = 6$ мм) визначають характеристики коронного розряду та ефективність генерації озону.

Для створення стійкого електричного потоку повітря у відкриту частину

розрядної камери встановлені додаткові коронуючі електроди (4), розташовані по краю січної площини патрубка (5). Другим електродом для них є сітка (6), підключена до позитивного полюса джерела живлення. Така конфігурація дозволяє запобігти засмоктуванню повітря по стінках камери та забезпечити стабільний режим електричного насоса.

Принцип роботи озонатора полягає у наступному. Після подачі напруги на коронуючі електроди виникає коронний розряд, який іонізує молекули повітря, формуючи переважно негативний об'ємний заряд з іонами кисню та озону. Частина іонів нейтралізується при контакті із сіткою 2, утворюючи молекули озону, а більшість прискорюється у напрямку додаткових електродів 6. Через кілька секунд встановлюється стабільний електричний вітер у відкритій частині камери, що спричиняє пониження тиску повітря та збільшення розрядного струму.

Устаткування працює в режимі іонно-конвекційного насоса, при якому переміщення іонів і молекул повітря створює ефективне змішування озону в об'ємі камери і сприяє стабілізації концентрації озону. Параметри пристрою дозволяють отримати середню продуктивність озонуючого елемента близько 0,8 г озону на годину при силі струму розряду 4 мА. Устаткування показує удельну енергоефективність 20–23,5 г/кВт·год при атмосферному тиску 680 мм рт.ст., а регулювання напруги живлення дозволяє підтримувати оптимальні параметри роботи та знижувати енергоспоживання.

1.4. Вимоги до системи автоматизованого керування процесу озонування повітря

Оптимізація процесу озонування повітря, що використовується для дезінфекції виробничих приміщень та забезпечення мікробіологічної чистоти робочого середовища, ґрунтується на виборі такого режиму керування, який забезпечує найвищу ефективність відповідно до обраного критерію. Пошук оптимальних технологічних режимів традиційно може здійснюватися або шляхом багаторазових експериментів безпосередньо на об'єкті керування, або через

побудову та дослідження його математичної моделі. У ситуації з процесом озонування обидва підходи взаємодоповнюють один одного, однак саме моделювання дає можливість працювати зі складними умовами експлуатації без ризику для продукції чи обладнання.

Процес озонування належить до багатовимірних технологічних систем, для яких характерна зміна параметрів у випадковому режимі та складність отримання своєчасної інформативної вимірювальної інформації. Така природа об'єкта не дозволяє оператору використовувати методи експериментального пошуку оптимальних режимів у реальному часі, оскільки динаміка зміни концентрації озону, стану продукції та характеристик повітряного середовища має стохастичний характер. У подібних умовах методи оптимального керування мають спиратися на математичну модель, що являє собою формальний опис зв'язків між вимірюваними і невимірюваними параметрами та дозволяє здійснювати прогнозування майбутніх станів системи, а також оцінювати ті змінні, які не піддаються прямому вимірюванню.

Зважаючи на випадкову мінливість характеристик продукції та параметрів озонатора, які визначають траєкторію технологічного процесу, доцільно застосовувати підходи, засновані на статистичному описі об'єкта. Ці методи дають змогу включати у модель вплив неконтрольованих збурень, враховувати ймовірні зміни властивостей оброблюваного середовища та адаптувати управляючу дію таким чином, щоб процес озонування залишався стабільним і ефективним. Однак нестационарність системи «озонатор–повітряне середовище–продукція» та велика кількість чинників, що змінюються у часі, можуть спричинювати надмірне ускладнення математичного апарату, що потребує значних обчислювальних ресурсів і ускладнює практичне впровадження статистичного оптимального керування.

З огляду на такі обмеження виникає потреба у застосуванні адаптивних методів, які здатні поєднувати переваги математичного моделювання з можливістю корекції параметрів моделі у режимі реального часу. Сутність адаптивного підходу полягає у тому, що модель не фіксується раз і назавжди, а постійно уточнюється

відповідно до поточного стану системи, дозволяючи враховувати повільні зміни у характеристиках зберігання продукції та роботі озонатора. Такий підхід створює можливість описувати об'єкт, що має нелінійні властивості, за допомогою лінеаризованої моделі, яка адаптується до фактичних умов, зберігаючи точність прогнозування при суттєвому зменшенні обчислювальних затрат.

Особливості взаємодії озонатора зі зберігальною камерою формують комплекс вимог до системи керування. Енергоефективність стає визначальним критерієм, оскільки виробництво озону пов'язане зі значним електроспоживанням. Водночас забезпечення високої концентрації озону неможливе без дотримання умов, що запобігають швидкому псуванню продукції, що особливо важливо при зберіганні сільськогосподарської продукції з високою чутливістю до окислювальних процесів. Система керування повинна підтримувати роботу озонатора в умовах, які є оптимальними за енергетичними та технологічними показниками, запобігати аварійним режимам та забезпечувати стабільність концентрації озону у межах, що відповідають встановленим санітарним та технологічним нормативам.

Логіка побудови системи керування передбачає застосування принципу оптимальності, що вимагає математичної формалізації задачі оптимізації та визначення оптимального режиму за допомогою методів математичного програмування. Водночас природа збурень, які не піддаються прямому регулюванню, але можуть бути спостережені, зумовлює необхідність реалізації принципу компенсації. Застосування керування за збуренням забезпечує оперативне реагування на зміни стану продукції й дає можливість утримувати технологічний процес у межах передбачених режимів навіть за суттєвої зміни зовнішніх умов.

Математичне формування системи керування потребує визначення загальної структури автоматизованої установки озонування повітря, концептуальне уявлення про яку подано на рисунку 1.3. Структурна схема є узагальненою моделлю системи з компенсацією за збуренням і демонструє взаємозв'язок між параметрами, що описують стан повітряного середовища, озонатора та продукції. Об'єм сховища

визначає загальну інерційність технологічного середовища; концентрація озону в повітрі, що змінюється у просторі, відображається через вимірювання озонometrів у різних точках; концентрація озону на виході озонатора характеризує ефективність його роботи; початкова концентрація озону визначає вихідний стан системи на момент початку керування. Вихідна змінна, яка відображає стан продукції, є інтегральним показником того, наскільки ефективним є процес озонування з погляду забезпечення її зберігання.

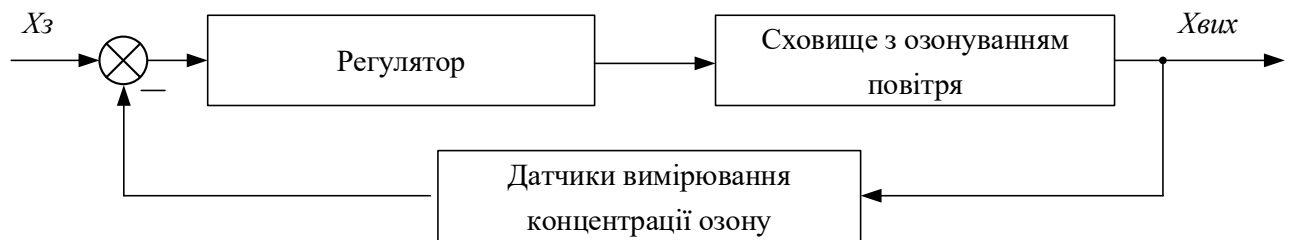


Рис. 1.3. Структурна схема САК установки озонування повітря

У межах функціонування автоматизованої установки озонування повітря, структурна схема якої подана на рисунку 1.2, формується підхід до побудови системи, що діє як система з компенсацією впливу зовнішніх збурень. У конфігурації такої системи важливими вхідними параметрами виступають об'єм сховища, початкова концентрація озону, поточні показники його вмісту за даними датчиків, а також характеристики роботи озонатора. Вихідна змінна відображає стан збережених продуктів і визначає ефективність процесу обробки повітря озonom. Така постановка завдання дає можливість розглядати систему як об'єкт складної природи, у якому внутрішні й зовнішні фактори формують значну мінливість процесів.

З урахуванням прийнятої ідеології побудови, система керування озонуванням належить до класу оптимальних систем за збуренням, де вирішальним є здатність реагувати на зміну стану продукції та зовнішніх параметрів повітряного середовища. Для аналізу таких систем доцільно застосовувати імітаційне моделювання, що дає змогу дослідити поведінку об'єкта без потреби у трудомісткому натурному експерименті. Математична модель, побудована на основі аналізу фізичних закономірностей процесу озонування, відіграє роль об'єкта

дослідження при моделюванні та дозволяє формалізувати закономірності перерозподілу озону, його взаємодії з компонентами повітря і продукцією.

Незалежно від вибраної стратегії керування, ефективність автоматизованої системи безпосередньо залежить від архітектури технічної реалізації. Централізовані структури, що традиційно застосовувалися у практиці дезінфекції та санітарної обробки повітря, передбачають концентрацію всіх засобів обробки інформації в операторському пункті. Попри простоту експлуатації й можливість повного контролю за станом установки, такі системи характеризуються збільшеними капітальними витратами через значний обсяг кабельних з'єднань та потребу у дублюванні обладнання для забезпечення надійності. Це обмежує їх ефективність у великих або просторово розгалужених сховищах.

Розвиток мікропроцесорних технологій зумовив перехід до розподілених структур, у яких окремі автономні підсистеми виконують локальний контроль і з'єднані мережею високої пропускної здатності. Такий підхід значно підвищує гнучкість системи, забезпечує адаптацію до просторової неоднорідності параметрів середовища та дає можливість здійснювати регулювання без затримок, пов'язаних із передаванням інформації на центральний пункт. У подібній структурі мікроконтролер кожного модуля забезпечує незалежне функціонування, але водночас залишається інтегрованим у загальну систему керування.

Система автоматичного контролю та регулювання концентрації озону у сховищі забезпечує безперервний моніторинг стану повітря та підтримання концентрації озону на рівні, ефективному для дезінфекції й безпечному для продукції. Об'єктом впливу у цьому разі є концентрація озону, а виконавчим органом – озонатор з компресором, який визначає інтенсивність подачі озоноповітряної суміші. Програмний регулятор виконує функцію формування керуючого сигналу, налаштовує режими озонування та забезпечує циклічність процесу обробки продукції.

Параметри, що визначають поведінку об'єкта – об'єм, вологість та тиск – обираються відповідно до вимог технологій зберігання. Регулятор змінює концентрацію озону таким чином, щоб забезпечити досягнення необхідного

режиму обробки з урахуванням типу продукції, інтенсивності її дихання та об'ємного коефіцієнта заповнення сховища. Біологічна дія озону проявляється за принципом порогової активності, тому вибір концентрації повинен відповідати вимогам конкретних продуктів. Відомо, що оптимальний робочий діапазон становить від п'яти до п'ятдесяти міліграмів на кубічний метр, а час обробки залежить від початкової концентрації та величини навантаження озону на органічні речовини.

Розподіл озону у повітряному об'ємі визначається швидкістю його природної дисоціації та інтенсивністю взаємодії з поверхнею овочів і фруктів. Найбільша частина озону витрачається саме на окиснювальні реакції з компонентами продукції, що підкреслює необхідність динамічного регулювання подачі озону. Підтримання стабільної концентрації потребує врахування максимальних навантажень, що виникають у процесі роботи системи. Умови нестабільної експлуатації можуть спричинити надмірне спрацювання обладнання або порушення технологічного процесу, тому контролер має функцію обмеження потужності, що дозволяє зменшувати подачу озону при критичних навантаженнях.

Результативність системи визначається якістю датчиків та інших компонентів автоматики, оскільки контролер не здатен компенсувати інерційність або похибки первинних вимірювальних перетворювачів. Датчики концентрації озону повинні характеризуватися низькою інерційністю, оскільки повільне реагування на зміну параметрів знижує точність регулювання та прискорює деградацію озонатора. Важливим елементом виступає також датчик стану продукції, який дає змогу регулятору враховувати зміну хімічного складу та швидкості окислення органічних компонентів.

Контролер, що реалізує ПД-алгоритм, має функції адаптації та оптимізації, необхідні для врахування змін у динаміці процесу озонування. Періодична заміна продукції, зміна умов мікроклімату та варіації у структурі повітряного середовища вимагають здатності контролера до адаптивного коригування параметрів. Постійна оцінка концентрації озону дає змогу забезпечити стабільність керування протягом року та підтримувати режим, що відповідає санітарно-технологічним вимогам.

Сукупність вимог до автоматизованої системи диктується необхідністю швидкого і точного реагування на зміну концентрації озону, здатністю устаткування автоматично налаштовувати режими, використовуючи інформацію про стан продукції, а також можливістю швидкого переходу до нового режиму зберігання залежно від типу сільськогосподарської продукції. Такий підхід дає змогу формувати керування, яке забезпечує економічність, технологічну ефективність і стабільність обробки повітря у сховищі.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі було розкрито фізичні процеси, що визначають роботу озонувального елемента з голчасто-сітчастою електродною системою. Аналіз явищ, пов'язаних із виникненням та розвитком коронного розряду, продемонстрував складність електрофізичних механізмів у зоні значної неоднорідності електричного поля, яка формується біля кончика коронуючого електрода. Показано, що саме радіус кривизни поверхні електрода визначає інтенсивність локального поля і задає умови для початкової іонізації газового середовища. Установлено, що збільшення прикладеної напруги спричинює поступове розширення активної коронної зони, яка на ранніх етапах локалізується поблизу найменшого радіуса кривизни, а з підвищенням потенціалу охоплює периферійні ділянки поверхні електрода. Такий характер поведінки електричного поля свідчить про самоорганізацію просторового заряду, що водночас визначає форму і динаміку коронного об'єму.

Розгляд моделей, що описують структуру уніполярного коронного розряду, дав змогу сформулювати математичний підхід до оцінювання параметрів поля у зовнішній області розряду. Використання припущень щодо однорідності й малої товщини іонізаційного шару, а також стабілізації напруженості біля поверхні електрода на рівні початкового значення створює основу для спрощеного, але фізично узгодженого опису процесу. У такому контексті швидкість руху іонів може бути подана у вигляді пропорційної залежності від напруженості поля, що дозволяє

надалі враховувати вплив іонного струму на формування концентрації озону в робочому проміжку.

У межах системного аналізу електродної конфігурації типу «голка-сітка» було показано, що геометричні параметри, включно з діаметром корпусу, діаметром коронуючого електрода, радіусом заокруглення кончика голки та відстанню між електродами, відіграють визначальну роль у формуванні розподілу електричного поля. Саме від них залежить ефективність запуску коронного розряду, величина робочого струму, стабільність коронної зони та інтенсивність озонування. Ці положення створюють методологічну базу для аналітичних і чисельних розрахунків, необхідних у наступних розділах для конструювання озонувального елемента та оптимізації його геометричних і електричних характеристик.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ОЗОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

2.1. Формування адаптивної прогнозувальної моделі технологічного процесу озонування

Технологічний процес озонування повітря становить складну інерційну систему, яка демонструє змінність своїх характеристик у часі та залежить від динаміки зовнішніх і внутрішніх впливів. Нестационарність параметрів цього процесу при зберіганні аграрної продукції пов'язана передусім із варіативністю фізико-хімічних властивостей сировини, що надходить на обробку, оскільки умови росту, стиглість плодів, вологість, структурна цілісність та інші фактори безпосередньо впливають на інтенсивність озонування та його ефективність. Така мінливість породжує складнощі в побудові точних математичних моделей, адже класичні стаціонарні підходи не відображають реальних режимів функціонування промислової системи.

Динамічні зміни параметрів технологічного процесу додатково поглиблюються специфікою виробничого середовища. Плоди й овочі, що надходять у приміщення для зберігання, відрізняються ступенем стиглості, структурною міцністю, вологістю та іншими характеристиками, які визначають швидкість окиснення органічних компонентів озоном. Додаткову варіативність створює широкий асортимент продукції, що обробляється протягом сезону. Це означає, що фізичні й біохімічні параметри об'єкта впливу ніколи не є однорідними, а отже модель процесу озонування не може залишатися постійною впродовж тривалого технологічного циклу. До цього додаються процеси старіння обладнання, зниження точності датчиків та деградація виконавчих механізмів, що спричиняє зміщення робочих точок та порушення конфігурації системи керування.

У таких умовах виникає фундаментальна проблема керування: якщо використовувати фіксовану модель, що була отримана для певного набору

властивостей продукції чи для певного стану обладнання, то система не зможе забезпечити стабільність регулювання та оптимальний рівень концентрації озону. Це може спричинити вихід параметрів за допустимі норми, що в технологічних процесах зберігання харчової продукції є особливо небажаним, оскільки надмірне озонування призводить до руйнування клітинних структур, а недостатнє не гарантує захисту продукції від мікробіологічного псування. З огляду на це будь-яке порушення нормованих параметрів може викликати втрату товарної якості і відхилення від вимог чинних стандартів, що закріплені у відповідних нормативних документах, включно з українськими національними стандартами, які встановлюють граничні допустимі показники.

У практиці промислового керування проявили себе два підходи до моделювання нестационарних об'єктів: використання значної кількості заздалегідь підготовлених моделей або побудова моделей безпосередньо в процесі роботи. Перший підхід орієнтується на створення окремих математичних описів для кожного різновиду технологічної продукції та кожного режиму роботи системи. Однак під час реальної експлуатації такий підхід ускладнює керування, адже вимагав би швидкого перемикавання між моделями, постійного оновлення їх набору і не враховував би несподіваних змін у властивостях продукції. Другий підхід, який передбачає отримання моделі в режимі реального часу, демонструє значно вищу адаптивність і дозволяє відстежувати зміни динамічних характеристик процесу. Саме тому він набув широкого поширення в практиці стохастичного керування складними виробничими системами.

Основна складність побудови моделі в режимі реального часу полягає в тому, що на її формування необхідний певний часовий інтервал, протягом якого регульовані параметри можуть вийти з допустимої області. Для безперервного технологічного процесу озонування, де параметри концентрації, температури, вологості та потужності озонатора мають залишатися стабільними, навіть короточасні відхилення можуть спричинити неякісну обробку продукції. Тому вибір методів адаптивної ідентифікації повинен забезпечувати точність, швидкодію та стійкість до стохастичних збурень.

У запропонованому дослідженні використано підхід до адаптивної ідентифікації нестационарних систем із марковськими параметрами, що дозволяє описувати процеси, у яких властивості об'єкта керування змінюються за стохастичними законами й можуть переходити між низкою станів зі своєю ймовірністю. Такий підхід надає можливість враховувати перехідні етапи досягання продукції, зміни температурно-вологісного режиму, а також деградацію технічних засобів. Ідентифікація виконується у формі пасивного оцінювання параметрів, коли система зчитує реакції технологічного процесу на природні зміни вхідних сигналів, не вносячи спеціальних тестових впливів. Це забезпечує безперервність роботи озонаторної установки та дає змогу формувати модель, що адекватно відображає актуальний стан об'єкта.

Технологічний процес озонування можна подати як нестационарний багатовимірний динамічний об'єкт із декількома каналами входів і виходів, пов'язаних між собою складною структурою внутрішніх зв'язків. Вхідні параметри поділяються на керувальні й збурювальні, причому збурювальні формують множину випадкових впливів, що виникають через змінність властивостей продукції. Цей вектор можна уявити як $X^T(N) = (x_1(N), \dots, x_n(N))$, що описує багатокomпонентний стан об'єкта у момент дискретного часу N . У цьому векторі частина параметрів характеризується невизначеністю, що зумовлена ненаблюдаваними змінними $b_j(N)$. Така змінність створює необхідність застосування адаптивних моделей, які здатні змінювати свою структуру та параметри відповідно до фактичної динаміки процесу.

Рисунок 2.1 демонструє узагальнену схему нестационарного динамічного багатовимірного та багатозв'язного об'єкта керування, у якому всі елементи системи перебувають у стані постійної зміни параметрів. У такій структурі канал керування визначається як спостережуваний вектор $U_T(N) = (u_1(N), \dots, u_r(N))$, що належить до простору R_2^r і охоплює всі допустимі керувальні дії. На відміну від каналу збурень, який містить параметри з невизначеною або частково ненаблюдаваною природою, канал керування характеризується повною відомістю своїх компонентів, тобто всі параметри c_k , де k від 1 до \bar{r} , визначені та доступні для

вимірювання. У такому формулюванні кількість вхідних сигналів p задається сумою $p = n + r$, що відображає як збурювальні, так і керувальні впливи.

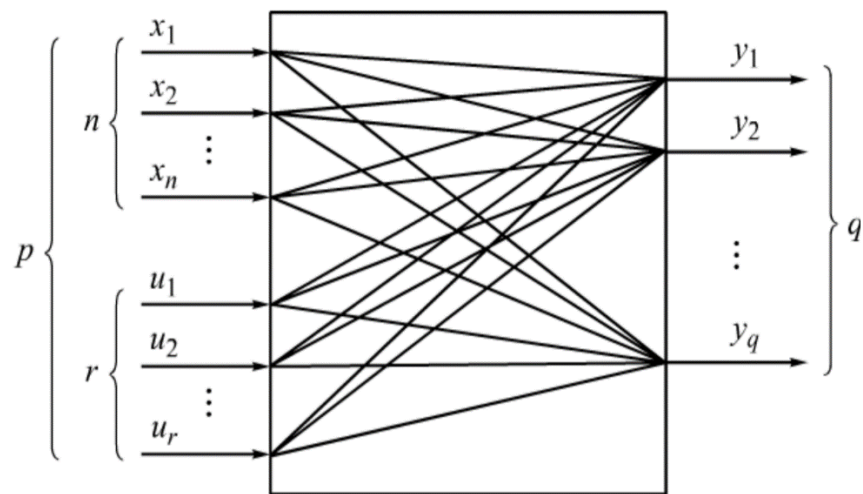


Рис. 2.1. Схема нестационарного динамічного багатовимірної та багатозв'язного об'єкта керування

Вихідні характеристики об'єкта описуються спостережуваним вектором $Y_T(N) = (y_1(N), \dots, y_q(N))$, що належить до простору R_3^q і включає всю множину фізично прийнятних значень вихідних параметрів. З математичного погляду вектор виходів фіксує реакцію об'єкта на впливи каналів керування та збурень і надає основу для процедури ідентифікації, адаптивного прогнозування та формування зворотних зв'язків у системі керування.

У процесі аналізу припускається, що структура нестационарного динамічного об'єкта є відомою, тобто визначено порядок m диференціального або відповідного йому різницевого рівняння, яке описує еволюцію стану системи. Це означає, що дослідник має інформацію про ступінь інерційності та кількість необхідних попередніх значень вихідних і вхідних параметрів, які впливають на поточний стан. Таке припущення не виключає варіативності самих параметрів, але дозволяє побудувати формальну модель, яка здатна адаптуватися до змінних умов.

Після виконання процедури декомпозиції багатовимірний і багатоканальний об'єкт розпадається на сукупність елементів зі спрощеною структурою причинно-наслідкових зв'язків. Така декомпозиція дає можливість подати систему у вигляді,

наведеному на рисунку 2.2, де кожен канал аналізується окремо, але з урахуванням крос-впливів, що зберігають загальну взаємопов'язаність процесу. У результаті складна система перетворюється на ансамбль підсистем, кожна з яких описується власним динамічним рівнянням, а їх сумісна робота формує повну картину поведінки об'єкта з урахуванням його нестационарності.

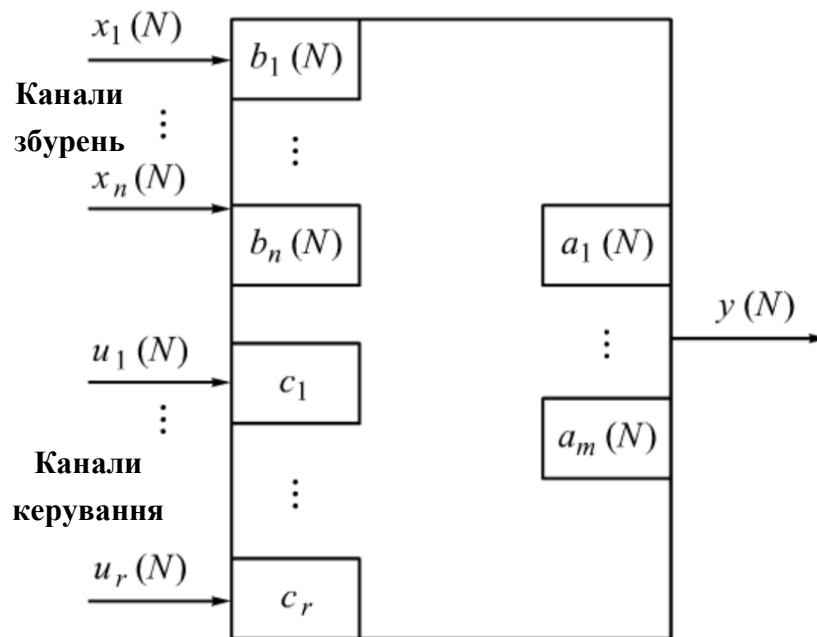


Рис. 2.2. Структура нестационарного динамічного багатовимірного однозв'язаного об'єкта керування, у якому величини $x_n(N)$ та $u_r(N)$ представляють вимірювані входні сигнали, а $y(N)$ відображає його вихідну реакцію

. У загальному випадку багатовимірний багатозв'язаний об'єкт керування, структура якого наведена на рисунку 2.1, може бути представлений у вигляді системи з q різницевих рівнянь, що залишаються лінійними щодо змінних коефіцієнтів. Кожне з цих рівнянь описує еволюцію відповідної вихідної координати та відтворює функціонування об'єкта з урахуванням внутрішньої пам'яті та впливів зовнішнього середовища. Аналітичний запис цієї системи має вигляд:

відміну від збурювальних впливів, усі коефіцієнти $c_k(N)$ для каналу керування є відомими і не потребують ідентифікації. Вихідна координата $y(N)$ є скалярною величиною, що належить простору допустимих виходів R_3^S .

Аналіз динаміки таких систем дозволяє зробити висновок, що процес озонування як об'єкт керування демонструє властивості нестационарності через зміну коефіцієнтів різницевого рівняння у часі, лінійності за своїм математичним описом та динамічності завдяки залежності між входами та виходами, що описується рівняннями з пам'яттю.

Формування адаптивних систем керування для таких об'єктів потребує використання моделей із змінними коефіцієнтами, які обчислюються в реальному часі в процесі ідентифікації. Саме тому доцільним є застосування адаптивних прогнозувальних моделей, здатних відтворювати поведінку об'єкта та прогнозувати його вихід у наступні моменти часу.

$$\hat{y}(N) = \sum_{i=1}^m [\hat{a}_i(N) \cdot \hat{y}(N-i)] + \sum_{j=1}^n [\hat{b}_j(N) x_j(N)] + \sum_{k=1}^r [c_k u_k(N)]. \quad (2.3)$$

Векторна форма моделі:

$$\hat{y}(N) = K^T(N-1) \cdot \hat{\Phi}(N)$$

Тут $K(N-1) = (\hat{a}_1(N-1), \dots, \hat{a}_m(N-1), \hat{b}_1(N-1), \dots, \hat{b}_n(N-1), c_1, \dots, c_r)$

$$\hat{\Phi}(N) = (\hat{y}(N-1), \dots, \hat{y}(N-m), x_1(N), \dots, x_n(N), u_1(N), \dots, u_r(N)).$$

Оцінювання невідомих коефіцієнтів вимагає проведення більшої кількості вимірювань, ніж їх загальна кількість $l = m + n$, що забезпечує стійкість алгоритмів ідентифікації.

У реальних технологічних процесах система піддається дії множини шумів, походження яких пов'язане з особливостями обладнання, нестабільністю зовнішніх умов та флуктуаціями у первинних вимірюваннях. Оскільки інформація щодо їх статистичної природи здебільшого відсутня, результуючий шум розглядають як гауссівський процес із нульовим середнім та дисперсією σ_v^2 :

$$v(N) = N(0, \sigma_v^2)$$

Таке припущення не накладає обмежень на саму модель, але істотно

полегшує аналітичні процедури.

2.2. Ідентифікація та керування технологічним процесом озонування

Процес побудови адаптивної системи керування технологічним процесом озонування ґрунтується на поєднанні двох послідовних етапів, які мають різну функціональну природу, але формують єдиний контур керування. На першому етапі виконується ідентифікація характеристик об'єкта та формування адаптивної прогнозуючої моделі, яка виступає математичною репрезентацією динаміки ТП озонування, що змінюється у часі. На другому етапі відбувається безпосереднє керування, коли система формує необхідний вплив на керований об'єкт на основі параметрів побудованої моделі та актуальних вимірювань.

Ідентифікація передбачає отримання оціненого виходу моделі $\bar{y}(N)$, який формується у процесі аналізу поведінки об'єкта під дією збурень та керувальних впливів. Модель адаптивного типу забезпечує можливість обчислення параметрів у реальному часі, що особливо важливо для нестационарних процесів, де параметри змінюються під впливом технологічних режимів, зовнішніх чинників та структурних особливостей об'єкта. Внаслідок цього формується адаптивна прогнозуюча модель $\hat{y}(N)$, яка здатна відтворювати динаміку вихідної змінної з необхідною точністю.

На наступному етапі відбувається синтез керуючої дії. Вплив $U(N)$ формується на основі інформації про поточні входи $X(N)$, фактичні значення виходу $y(N)$ та прогнозованого виходу $\hat{y}(N)$. Закон керування $\Psi(\cdot)$ описує спосіб формування керуючого впливу з урахуванням прогнозу поведінки об'єкта та спостережуваних даних, що дозволяє системі адаптивно реагувати на зміни умов технологічного процесу. Такий підхід забезпечує звуження розмаху коливань вихідних параметрів, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту та стабільність виробничого процесу.

Керування визначається функціональним співвідношенням

$$U(N) = \Psi(X(N), y(N), \hat{y}(N)). \quad (2.4)$$

Функціональна залежність демонструє використання одночасно трьох інформаційних потоків: вимірних вхідних параметрів, фактичного виходу та прогнозу моделі. Така структура дозволяє компенсувати невизначеність та непередбачувані стани об'єкта, що виникають унаслідок дії випадкових чинників.

Поділ системи на етап навчання та етап керування є необхідним для зменшення обчислювальних витрат та забезпечення можливості роботи в реальному часі. Проте цей підхід не гарантує глобальної оптимальності параметрів моделі протягом усього технологічного циклу. Внаслідок цього оцінки параметрів, що формуються під час адаптації, є оптимальними лише локально, тобто в межах конкретних часових інтервалів, протягом яких відбувається корекція параметрів.

Для технологічного процесу озонування такий підхід має суттєве значення, оскільки властивості оброблюваного середовища, умови подачі озону та поведінка електрофізичних характеристик обладнання можуть змінюватися непередбачувано. Адаптивне керування забезпечує стійке відтворення необхідних технологічних режимів, що призводить до стабілізації параметрів продукту та покращення його якості завдяки згладженню флуктуацій контрольованих змінних.

Узагальнена структурна схема адаптивної системи керування ТП озонування наведена на рисунку 2.3, де показано взаємодію між блоками ідентифікації, прогнозування та формування керуючого впливу. Така структура забезпечує високий рівень автономності системи, здатність до самооновлення параметрів та можливість функціонування в умовах значної невизначеності.

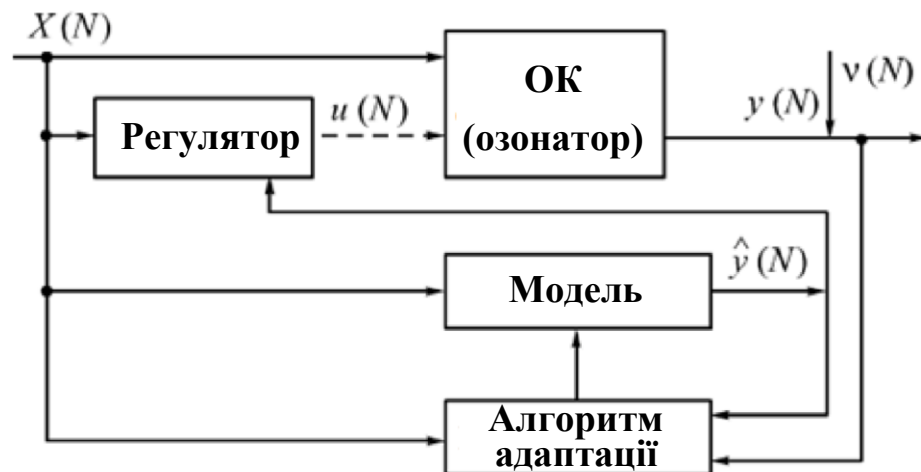


Рис. 2.3. Структура адаптивної системи керування ТП озонування

Обґрунтування проєкційного алгоритму ідентифікації. У процесі побудови адаптивної моделі технологічного об'єкта особливе значення має коректне визначення похибки прогнозування, що дозволяє кількісно оцінити відхилення між фактичним вихідним сигналом та прогнозованим значенням моделі. Похибка прогнозу визначається співвідношенням

$$\varepsilon(N) = y(N) - \hat{y}(N), \quad (2.5)$$

що відображає різницю між вимірним виходом об'єкта та оцінкою, сформованою адаптивною прогнозуючою моделлю. Саме ця похибка є основою для формування критерію якості ідентифікації та визначає алгоритм корекції параметрів моделі.

Формування критерію $J(N)$ базується на ідеї мінімізації середньоквадратичних відхилень прогнозу, що забезпечує збіжність оцінок параметрів та підвищує точність опису динаміки об'єкта. Вибір середнього квадрата похибки як цільової функції зумовлений його статистичними властивостями та математичною зручністю при синтезі рекурсивних алгоритмів. Умова мінімізації критерію $J(N) = M\{\varepsilon^2\}(N)$ дозволяє отримати рекурентний алгоритм оновлення оцінок параметрів моделі у вигляді:

$$K(N) = K(N - 1) + \Gamma(N)(y(N) - K^T(N - 1)\Phi(N))\Phi(N), \quad (2.6)$$

де вектор $K(N)$ описує поточні оцінки параметрів моделі, $\Gamma(N)$ є матрицею підсилення, а $\Phi(N)$ позначає вектор регресорів. Початкові оцінки $K(0) = K_0$ задаються на старті алгоритму й визначають стартове наближення моделі.

У прикладних задачах ідентифікації широко застосовується алгоритм Чадеєва-Качмажа, який дає змогу отримувати рекурсивні оцінки параметрів навіть за умов змінності структури збурень або неповної інформації. У його формі оновлення параметрів задається співвідношенням

$$K(N) = K(N - 1) + \frac{y(N) - K^T(N - 1)\Phi(N)}{\mu + \Phi^T(N)\Phi(N)}, \quad (2.7)$$

де величина μ гарантує невиродженість оцінок, стабілізує алгоритм та запобігає числовій нестійкості в умовах обмеженості вхідної інформації. Застосування такого підходу особливо важливе для нестационарних об'єктів, коли

статистичні характеристики процесу можуть змінюватися у часі, а сам об'єкт демонструє властивості, несумісні з припущеннями класичної теорії стаціонарної ідентифікації.

Класична парадигма ідентифікації базується на уявленні про існування незмінних параметрів, які детермінують динаміку об'єкта управління. Проте в реальних технологічних процесах озонування об'єкт має суттєво виражену нестаціонарність, що зумовлює необхідність застосування адаптивних або проєкційних алгоритмів. Проєкційний підхід дає змогу забезпечити збіжність оцінок навіть за умов структурної мінливості та зміни властивостей процесу упродовж часу.

Перехід від ідентифікації до етапу керування здійснюється за умови виконання комплексу вимог, які визначають стабільність оцінок та монотонність зменшення параметрів якості. Ці умови можна описати співвідношеннями

$$\begin{aligned} \mu(i): \text{alg}_n(\Delta y(N_1)) = \text{alg}_n(\Delta y(N_2)), \Delta y(N_3) = 0, \eta(N_1) > \eta(N_2) > \eta(N_3), \\ \eta(i) < 1, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де величина η характеризує узагальнений показник збіжності параметрів моделі та стабільності процесу ідентифікації. Якщо зазначені умови не виконуються, система залишається в режимі ідентифікації, оскільки перехід до управління за відсутності стабільних оцінок може призвести до втрати керованості та появи значних похибок у роботі технологічного контуру.

На n -му кроці ідентифікація здійснюється в розімкненому контурі, що забезпечує незалежність оцінок від зворотних зв'язків і дає змогу достовірно визначити внутрішню структуру об'єкта. Це особливо важливо для технологічного процесу озонування, де взаємозв'язок між електричними, газодинамічними та хімічними параметрами має складний, часто нелінійний характер.

Двоконтурна адаптивна система керування технологічним процесом озонування в умовах нестаціонарних параметрів розглядається як концептуально розширена структура, що забезпечує підвищену стійкість та точність регулювання для динамічних багатовимірних об'єктів. У межах такого підходу формується ієрархічний механізм адаптації, де первинний контур працює на основі

автоматизованої системи з ідентифікатором, тоді як другий контур інтегрує експертне середовище, представлене групою технологів, здатних генерувати усереднені рішення щодо якості продукції і режимів її обробки. Такий підхід дозволяє задіяти не лише формальні математичні моделі, а й накопичений досвід фахівців, що особливо важливо у випадку об'єктів із непередбачуваними стохастичними змінами параметрів.

Двоконтурна структура (рис. 2.4) передбачає наявність автоматизованої прогнозувальної моделі першого контуру та вербальної моделі другого контуру, побудованої на основі колективної оцінки експертів. Взаємодія цих елементів приводить до синтезу керувального сигналу $u(N)$, який набуває властивостей комбінованого управління і інтегрує алгоритмічну основу адаптивної системи ідентифікації та коригувальні дії технологів. Завдяки цьому формується високоадаптивна система, здатна компенсувати змінність параметрів і забезпечувати стабільну роботу установки озонування в умовах коливань динамічних характеристик.

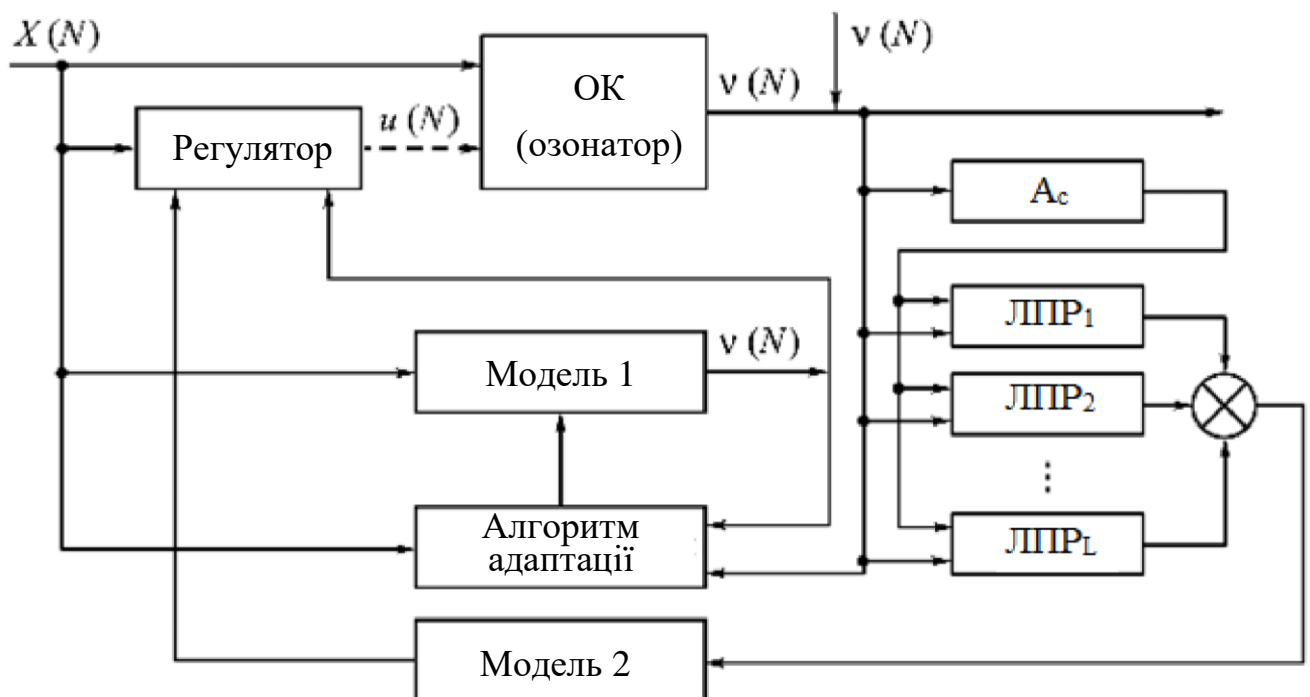


Рис. 2.4. Структурна схема двоконтурної адаптивної системи керування ТП озонування

Керуюча дія набуває вигляду

$$U(N) = \Psi(X(N), y(N), \hat{y}(N)) \oplus \Delta \left(y(N), \left(\frac{1}{L} \right) \Sigma LPP_i \right), \quad (2.9)$$

де оператор об'єднання дозволяє поєднати автоматизовану частину керування і корекцію, яка формується експертною групою. Усереднене рішення технологів відображає інтегральне уявлення про поточний стан якості продукції, що проходить озонування, тому друга група моделей системи виконує функцію вербального опису нестационарності процесу та корекції меж регулювання.

Аналітичний опис двоконтурної адаптивної системи керування технологічним процесом озонування формується як узагальнена система рівнянь, що поєднує реальний об'єкт керування, адаптивну прогнозуючу модель першого контуру, механізми ідентифікації параметрів та коригувальні впливи, які генеруються у другому контурі адаптації.

У загальному вигляді вихід об'єкта на дискретному кроці N визначається залежністю

$$y(N) = L_1(A(N), B(N), Y(N-1), U(N), C), \quad (2.10)$$

яка відображає динаміку реального технологічного процесу. Вектор параметрів $A(N)$ та $B(N)$ характеризує поточні значення коефіцієнтів моделі об'єкта, що змінюються у часі під дією фізико-хімічних факторів, зміни режимів обробки та стохастичних флуктуацій. Історія попередніх значень вихідної величини $Y(N-1)$ задає стан системи, що визначає наявність внутрішньої пам'яті технологічного процесу. Вектор керувань $U(N)$ формує безпосередній вплив на об'єкт, тоді як C представляє сукупність технологічних параметрів та констант, які залишаються незмінними в межах розглянутого інтервалу.

Адаптивна прогнозуюча модель першого контуру створює наближене відтворення поведінки реальної системи:

$$\hat{y}(N) = L_2(\hat{A}(N), \hat{B}(N), \hat{Y}(N-1), U(N), C). \quad (2.11)$$

Параметри $\hat{A}(N)$ і $\hat{B}(N)$ є оцінками справжніх коефіцієнтів та оновлюються у процесі ідентифікації, що дозволяє моделі постійно відстежувати зміни у динаміці об'єкта. Порівняння $y(N)$ та $\hat{y}(N)$ створює основу для визначення похибки прогнозування, яка в подальшому використовується для адаптації.

Еволюція коефіцієнтів реального об'єкта описується стохастичними процесами

$$\begin{aligned} a_i(N) &= F_1(a_i(N-1), \gamma_{ai}, \xi_{ai}(N)), \\ b_i(N) &= F_2(b_i(N-1), \gamma_{bi}, \xi_{bi}(N)), \end{aligned}$$

де γ_{ai} та γ_{bi} є параметрами швидкості зміни, а $\xi_{ai}(N)$ та $\xi_{bi}(N)$ формують випадкову компоненту, що моделює нелінійні та нерегулярні процеси в озонувальній системі, наприклад локальні зміни концентрацій озону, температурні коливання, варіації структури оброблюваної продукції.

Оцінки коефіцієнтів моделі адаптивної АПМ змінюються за законом

$$\begin{aligned} \hat{a}_i(N) &= G_1(\hat{a}_i(N-1), y(N), \hat{y}(N), X(N)), \\ \hat{b}_i(N) &= G_2(\hat{b}_i(N-1), y(N), \hat{y}(N), X(N)), \end{aligned}$$

де $X(N)$ містить інформацію про входи системи. Ці залежності формують механізм адаптації, що забезпечує асимптотичне зближення моделі із реальною системою у міру накопичення даних.

Керувальний вплив у двоконтурній структурі синтезується як комбінація дії першого контуру адаптації та коригувальних дій другого контуру:

$$U(N) = \Psi(X(N), y(N), \hat{y}(N)) \oplus \Delta(y(N), (1/L) \Sigma_1 \text{ЛПР}_1).$$

Оператор Ψ визначає адаптивне керування, що формується на основі прогнозу моделі, тоді як $\Delta(\dots)$ представляє коригувальну дію, яка вводиться за результатами експертної оцінки групи технологів. У середньому рішенні експертів відображається сукупний досвід та інтуїтивне знання поведінки технологічного процесу, які неможливо повністю формалізувати у вигляді математичної моделі. Тому другий контур виконує роль інтелектуального компенсатора, що враховує якісні характеристики кінцевого продукту, граничні умови та технологічні обмеження.

Вектори

$$\begin{aligned} A(N) &= (a_1(N), \dots, a_m(N)), & \hat{A}(N) &= (\hat{a}_1(N), \dots, \hat{a}_m(N)), \\ B(N) &= (b_1(N), \dots, b_n(N)), & \hat{B}(N) &= (\hat{b}_1(N), \dots, \hat{b}_n(N)), \end{aligned}$$

а також вектори виходів $Y(N-1)$, $\hat{Y}(N-1)$ та керувань $U(N)$ описують повний стан

системи у момент часу N . Сукупність цих змінних утворює високовимірний простір, у якому відбувається динаміка об'єкта озонування, що є характерною ознакою нестационарних багатовимірних процесів.

2.3. Ідентифікація та керування технологічним процесом озонування з нестационарними параметрами

Ідентифікація технологічного процесу озонування характеризується специфічними особливостями, що зумовлені природою сировини та режимом її надходження. Незважаючи на те, що озонування відбувається безперервно, самі вхідні партії плодоовочевої продукції надходять дискретно, при цьому кожна партія формується різними товаровиробниками та відрізняється мікробіологічним станом. Концентрація мікроорганізмів, зокрема різних видів пліснявих грибів і бактерій, здатна суттєво варіювати, що створює істотну нестабільність параметрів процесу та ускладнює задачу побудови моделей динамічної поведінки об'єкта керування.

На рисунку 2.5 наведено схему адаптивної системи керування технологічним процесом озонування, яка працює в умовах нестационарних параметрів. Система орієнтована на керування багатовимірним і багатозв'язним об'єктом, для якого характерна змінність динаміки в часі. Подібний відхід від припущення стаціонарності, традиційного для класичних методів ідентифікації, обумовлений тим, що плодоовочева продукція, яка надходить на озонування, демонструє значні відмінності мікробіологічних характеристик навіть у межах найближчих за часом партій.

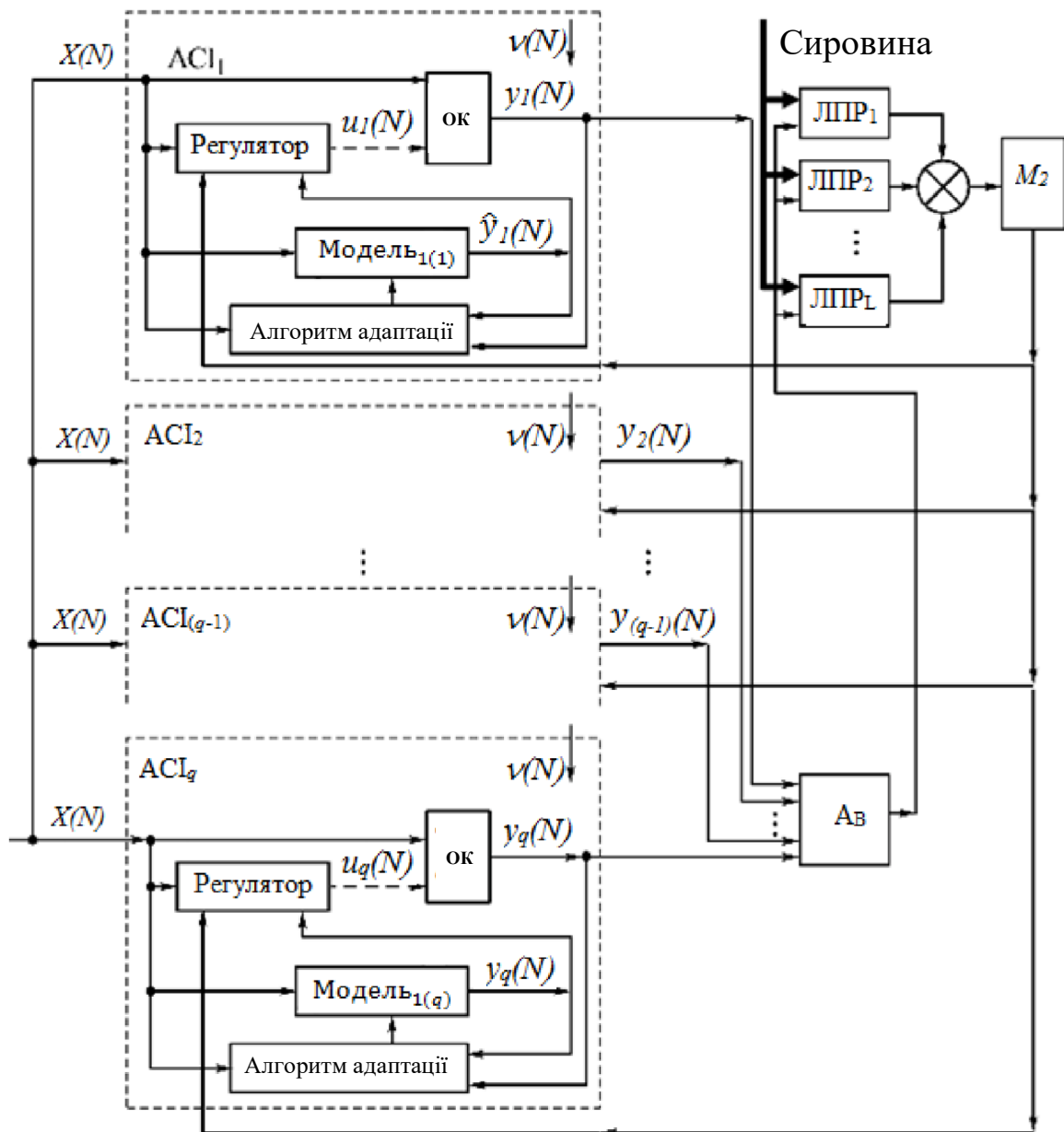


Рис. 2.5. Структурна схема двоконтурної адаптивної системи керування ТП озонування з нестационарними параметрами ОК

Нормативні вимоги державних стандартів регламентують допустимий рівень мікробіологічного зараження продукції. Це передбачає вимірювання певних характеристик, перелік яких подано у таблиці 2.1. Параметри, визначені ДСТУ, допускають певні відхилення, що, у свою чергу, трансформується у змінність рівнів мікроорганізмів на поверхні продукції. Саме ця варіабельність приводить до нестационарності параметрів об'єкта, що й уможливило застосування адаптивних методів моделювання та керування.

Таблиця 2.1

Вимірювані вхідні характеристики партії плодоовочевої продукції

Позначення	Рід (вид) мікроорганізму, що контамінує плодоовочеву продукцію	Одиниця вимірювання
a1	Microbacterium	Кількість/см ²
a2	Lactobacilli	Кількість/см ²
a3	Corynebacterium	Кількість/см ²
a4	Pseudomonas pitida	Кількість/см ²
a5	Pseudomonas sporum	Кількість/см ²
a6	Pseudomonas putrefa	Кількість/см ²
a7	Acinebobacter	Кількість/см ²
a8	Flavobacterium	Кількість/см ²

Таблиця 2.1 характеризує сукупність вимірюваних параметрів, що відображають мікробіологічний стан партії плодоовочевої продукції. Кожний параметр описує кількісну присутність певного роду або виду мікроорганізмів на одиниці площі, що дає змогу формувати первинне уявлення про біологічне навантаження на сировину перед початком технологічного процесу озонування. Позначення a1–a8 використовуються для формального опису величин, які відображають рівень контамінації продукції представниками Microbacterium, Lactobacilli, Corynebacterium, а також різними видами бактерій роду Pseudomonas, Acinebobacter та Flavobacterium. Кожен з цих показників вимірюється у перерахунку на кількість клітин мікроорганізмів на квадратний сантиметр поверхні продукту, що забезпечує уніфіковану основу для подальшої ідентифікації динамічних властивостей об'єкта керування. Значення таких характеристик виступають вихідними даними для побудови адаптивних прогнозуючих моделей озонування, оскільки відображають початковий рівень мікробіологічного навантаження, який суттєво впливає на змінність параметрів технологічного процесу та визначає необхідність адаптації керуючих дій під фактичний стан сировини.

З метою підвищення точності адаптивних прогнозувальних моделей система

може бути доповнена додатковими вимірюваними характеристиками, наведеними у таблиці 2.2. Ці характеристики не є безпосередньо фіксованими фізичними змінними, а являють собою статистичні функції від низки параметрів α_i та від функції $z(\omega)$, що відображає хімічні властивості конкретного виду плодоовочевої продукції, її сухість, екстрактивність та інші фізико-хімічні показники, пов'язані з наявністю і рівнем мікроорганізмів. Оскільки статистичні функції мають нелінійний характер, конкретна форма їх залежностей не є принциповою для адаптивного алгоритму, важливим залишається лише факт їх достатньої кореляційної інформативності щодо динаміки процесу.

Таблиця 2.2

Додатково вимірювані характеристики партії плодоовочевої продукції

Статистична функція	Рід (вид) мікроорганізма, що контамінує плодоовочеву продукцію
$x_1 = f_1(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Microbacterium
$x_2 = f_2(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Lactobacilli
$x_3 = f_3(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Corynebacterium
$x_4 = f_4(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Pseudomonas pitida
$x_5 = f_5(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Pseudomonas sporum
$x_6 = f_6(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Pseudomonas putrefa
$x_7 = f_7(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Acinebobacter
$x_8 = f_8(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Flavobacterium

Вхідні дії для кожної партії продукції є випадковими процесами, що складаються з повільних та швидких компонент, які задовільно описуються моделлю фільтра першого порядку. Така параметризація дозволяє відобразити реальну природу варіацій, спричинених як мікробіологічними, так і фізико-хімічними властивостями продукції.

Враховуючи значні міжпартійні відмінності, на першій стадії технологічного процесу здійснюється змішування продукції з різних поставок, унаслідок чого формується усереднена партія. Умовна однорідність цієї суміші дозволяє розглядати параметри $b_j(N)$ та $a_i(N)$ як змінні, що варіюють у вузькому діапазоні,

достатньо плавно переходячи від одного значення до іншого. Це створює основу для застосування швидких адаптивних алгоритмів, здатних оперативно коригувати параметри моделі при зміні характеристик партії продукції.

У цьому контексті адаптивна прогнозувальна модель технологічного процесу озонування може бути представлена у вигляді різницевого рівняння

$$\hat{y}(N) = \hat{a}_1(N)\hat{y}(N - 1) + \hat{a}_2(N)\hat{y}(N - 2) + \sum \hat{b}_j(N)x_j(N),$$

або, з урахуванням залежностей таблиці 2.2,

$$\hat{y}(N) = \hat{a}_1(N)\hat{y}(N - 1) + \hat{a}_2(N)\hat{y}(N - 2) + \sum \hat{b}_j(N)f_j(\alpha_1(N), \dots, \alpha_8(N), z(\omega)).$$

Клас моделей такого типу доцільно трактувати як клас адаптивних прогнозувальних гетерогенних моделей, що відображають неоднорідність параметрів у часі. Хоча сам технологічний процес озонування залишається стійким завдяки фізичній природі виробничого циклу, адаптивна модель, яка виконує прогнозування та формує керуючі впливи, може виходити за межі стійкості у моменти різких змін мікробіологічних характеристик продукції. Саме тому у системі керування необхідно застосовувати механізми контролю стійкості моделі та коригування параметрів адаптації, що забезпечує інваріантність до характеристик сировини та стабільне функціонування технологічного процесу.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було проведено аналіз процесу ідентифікації та управління технологічним процесом озонування плодоовочевої продукції з урахуванням нестационарності та багатовимірності об'єкта управління. Було обґрунтовано структуру адаптивної системи управління, яка включає два етапи: етап ідентифікації об'єкта управління та побудову адаптивної прогнозуючої моделі, а також етап керування на основі отриманих оцінок і поточних вимірювань вхідних та вихідних параметрів.

Було сформульовано математичні моделі як одноконтурної, так і двоконтурної адаптивної системи управління, де другий контур передбачає участь групи експертів-технологів для врахування якісних характеристик продукції та

внесення коригуючих впливів у сигнал управління. Математичне представлення системи включає рекурентні алгоритми оцінки змінних коефіцієнтів об'єкта, що дозволяє враховувати їхню стохастичну природу та забезпечує локально-оптимальну підстройку моделей під конкретні партії продукції.

Розглянуто особливості ідентифікації в умовах дискретного надходження партій плодоовочевої продукції з різним рівнем мікроорганізмів, що зумовлює необхідність використання адаптивних прогнозуючих моделей, інваріантних до змін вхідних характеристик продукції. У роботі проведено класифікацію вимірюваних параметрів, визначено статистичні та додаткові характеристики партій продукції, що забезпечує підвищення точності прогнозування та ефективності управління.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ

3.1. Розробка блоку автоматичного регулювання частоти генератора озону

Для забезпечення високої ефективності озонування та підтримання стабільної концентрації озону у замкнених об'ємах харчових продуктів було розроблено комплексну систему, що включає генератор високовольтних імпульсів, озонаторні осередки бар'єрного розряду та автоматизований блок регулювання концентрації озону. Система призначена для реалізації технологічно контрольованого процесу озонування, що враховує динамічні зміни параметрів повітряного середовища та об'єму приміщення.

Основним завданням розробки є створення пристрою, який здатен забезпечити автоматичне регулювання частоти імпульсів генератора озону на основі даних з озонometrів. Вихідний сигнал озонometrа, представленого у вигляді двополярного мікроамперметра, характеризується високим опором, що унеможливує пряме підключення до регулювального блоку без попереднього підсилення. Зміна струму мікроамперметра пропорційна зміні концентрації озону і, згідно з законом Ома, викликає відповідне приращення напруги на внутрішньому опорі приладу. Для отримання коректного сигналу керування необхідне попереднє електронне підсилення, що дозволяє трансформувати високоомний вихід озонometrа у сигнал, придатний для обробки мікропроцесором системи автоматичного регулювання.

В основі технології озонування лежить принцип бар'єрного розряду, при якому високовольтний імпульсний струм створює озон у газовому середовищі без утворення електричних дуг, що забезпечує безпечну роботу та високу ефективність процесу. Озонаторні осередки складаються з коронуючих голок та зовнішніх електродів, які формують стабільний електричний розряд, що генерує озон із

кисню повітря. Така конструкція дозволяє точково контролювати утворення озону та забезпечувати рівномірне розподілення його концентрації по всьому об'єму.

Для забезпечення автоматичного контролю концентрації озону у закритому об'ємі було запропоновано інтеграцію мікропроцесора (МП) із системою озонometrів. Кількість озонometrів визначається експериментально відповідно до об'єму приміщення та характеристик технологічного процесу, що дозволяє отримати репрезентативні дані щодо розподілу озону. Мікропроцесор обробляє багатоточкові входи від озонometrів, сумує та усереднює показники концентрації, і на основі програмованого алгоритму формує сигнал для блоку автоматичного регулювання частоти (БАРЧ) генератора високовольтних імпульсів.

Завдяки використанню імпульсного озонатора досягається можливість електронного регулювання виходу озону за частотою імпульсів, що забезпечує гнучке налаштування процесу озонування для різних режимів роботи та різних умов середовища. При цьому система враховує атмосферні фактори, такі як температура, тиск, вологість та запиленість повітря, що впливають на ефективність утворення озону. Впровадження балансної схеми вимірювання дозволяє значно знизити похибки контролю, викликані відмінностями електричних характеристик розрядних проміжків, та забезпечує стабільність роботи навіть у складних умовах експлуатації.

Програмна логіка мікропроцесора реалізує функцію адаптивного регулювання. Вона дозволяє підтримувати задану концентрацію озону протягом визначеного часу, автоматично коригуючи частоту імпульсів генератора відповідно до сигналів з озонometrів. Такий підхід створює замкнений контур управління, який поєднує функції вимірювання, аналізу та регулювання в одному циклі, що підвищує точність і надійність технологічного процесу озонування.

3.2. Концептуальна блок-схема роботи системи автоматичного регулювання генератора озону

Функціональна організація системи автоматичного регулювання

концентрації озону будується на взаємодії трьох основних компонентів: озонотрів, мікропроцесора та блоку автоматичного регулювання частоти генератора високовольтних імпульсів. Ця взаємодія забезпечує замкнений контур управління, де кожен елемент виконує чітко визначену функцію, а синхронізація роботи забезпечує стабільне підтримання заданої концентрації озону у закритому об'ємі (рис.3.1).

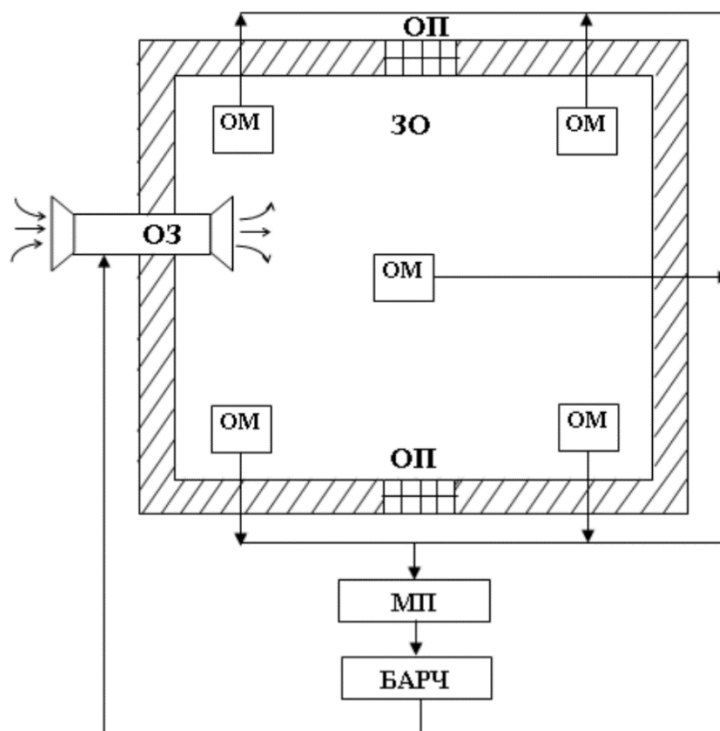


Рис. 3.1. Функціональна схема автоматичного регулювання концентрації озону

Озонотри виконують функцію первинного контролю концентрації озону. Вони розташовуються у ключових точках об'єму, що дозволяє оцінити рівномірність розподілу озону та отримати репрезентативні дані про стан газового середовища. Вихідні сигнали озонотрів мають високий опір та невеликі значення струму, що робить їх непридатними для прямого підключення до регулювальної системи. Для коректної обробки сигнали попередньо підсилюються і перетворюються у формат, придатний для багатоточкового входу мікропроцесора.

Мікропроцесор виконує функцію аналітичного центру системи. Він збирає дані з усіх озонотрів, виконує їх сумування та усереднення, аналізує динаміку

змін концентрації озону та визначає необхідні корективи у роботі генератора. Програмна логіка МП включає алгоритми підтримки заданого рівня озону протягом встановленого часу, а також адаптивні механізми реагування на зміни параметрів середовища, такі як температура, вологість, тиск та запиленість повітря.

На основі отриманих даних МП формує керуючий сигнал для блоку автоматичного регулювання частоти генератора високовольтних імпульсів (БАРЧ). Цей блок змінює частоту подачі імпульсів на озонаторні осередки бар'єрного розряду, що безпосередньо впливає на швидкість утворення озону. Високовольтні імпульси, генеровані блоком, забезпечують стабільний бар'єрний розряд без утворення електричної дуги, що гарантує безпечну та ефективну генерацію озону.

Завдяки такій інтеграції система забезпечує безперервне підтримання концентрації озону на заданому рівні, адаптується до змін умов середовища та дозволяє регулювати режим озонування для різних технологічних сценаріїв. Замкнений контур управління реалізує безперервний цикл вимірювання, аналізу та корекції, що підвищує точність та надійність процесу озонування.

Нижче наведено текстове описання блок-схеми роботи системи, яку можна використати для графічного зображення у науковій роботі:

1. Озонометри (ОМ)

- Розташовані у контрольних точках об'єму;
- Вимірюють концентрацію озону та передають сигнали у вигляді струму;
- Сигнали підсилюються перед подачею на МП.

2. Мікропроцесор (МП)

- Приймає дані від усіх озонометрів;
- Виконує усереднення та аналіз концентрації;
- Формує керуючий сигнал для регулювання частоти імпульсів генератора.

3. Блок автоматичного регулювання частоти (БАРЧ)

- Приймає сигнал від МП;
- Змінює частоту високовольтних імпульсів на озонаторі;

- Забезпечує стабільний бар'єрний розряд і відповідну генерацію озону.
4. Озонаторні осередки бар'єрного розряду

- Генерують озон у газовому середовищі;
- Створюють рівномірне розподілення озону по об'єму;
- Подають інформацію про концентрацію назад на озонметри, замкнувши контур управління.

Така архітектура системи дозволяє реалізувати високоточний контроль концентрації озону, гнучко регулювати процес озонування та автоматично підтримувати стабільні умови у замкненому об'ємі незалежно від зовнішніх факторів.

Варто зазначити, що дослідний зразок блоку автоматичного регулювання частоти високовольтних імпульсів (БАРЧ) виконаний у вигляді макета експериментального призначення. Основною його функцією є апробація різних режимів роботи генератора озону та озонметра, що дозволяє проводити дослідження ефективності управління концентрацією озону у замкненому об'ємі. Конструктивно пристрій виконано у модульному форматі, що забезпечує гнучкість у налаштуванні та зміні конфігурацій системи [6].

БАРЧ складається з п'яти взаємопов'язаних функціональних модулів, кожен з яких виконує чітко визначену роль у контурі автоматичного регулювання. Першим модулем є передусилювач, що підключається до мікроамперметра і служить вхідним каскадом БАРЧ. Він забезпечує попереднє підсилення сигналу від озонметра, приводячи його до рівня, придатного для подальшої обробки. Другий модуль – основний регульований підсилювач, який взаємодіє з генератором імпульсів, керованим напругою (ГУН). Він формує сигнал для генератора високовольтних імпульсів, забезпечуючи необхідну амплітуду та точність відтворення заданого режиму озонування.

Третій модуль реалізований на основі мікроконтролера ARDUINO UNO R3. Він оснащений вбудованим 10-розрядним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП), що перетворює повільно змінююче постійне напруження в цифровий код із TTL-рівнями (0 ÷ +5 В). Мікроконтролер також має вбудований цифровий вихід із

широотно-імпульсною модуляцією (ШІМ), який служить для формування керуючого сигналу, пропорційного необхідній частоті імпульсів генератора.

Четвертий модуль представляє цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), що перетворює цифровий сигнал ШІМ на аналогове постійне напруження. Цей сигнал подається на вхід генератора, керованого частотою (ГУН), і визначає параметри піджигаючих імпульсів високовольтного генератора. Таким чином забезпечується безперервне та точне регулювання частоти генератора у відповідності з вимогами контролю концентрації озону.

П'ятий модуль – це незалежне джерело вторинних напруг (+5 В, ± 15 В), яке живить інтегральні схеми та напівпровідникові прилади БАРЧ. Необхідність його використання обумовлена відмінністю потенціалів “землі” озонметра, модуля БАРЧ та генератора озону, що дозволяє уникнути помилок у вимірюваннях та стабільно підтримувати роботу електронних компонентів.

Продуктивність озонатора визначається частотою подачі імпульсів піджига тиристорного ключа, тому замість класичного регулювання високої напруги застосовується автоматичне регулювання частоти високовольтних імпульсів. У режимі підтримки сталої концентрації озону у закритому об'ємі встановлюється визначена частота генератора, яка відповідає заданому значенню вмісту озону. Будь-яке відхилення даних, отриманих від озонметрів, усереднюваних або сумарних, компенсується зміною скважності високовольтних імпульсів, що забезпечує точність підтримання концентрації озону незалежно від зовнішніх або внутрішніх змін умов середовища.

3.3. Експериментальне визначення продуктивності та питомого енергетичного виходу озону

При розробці озонаторів одним з основних критеріїв оцінки їх ефективності є питомий енергетичний вихід озону, який визначає масу озону, отриманого на одиницю спожитої електричної енергії, виражену у г/кВт·год. Цей показник служить головним орієнтиром при порівнянні озонаторів, що працюють за різними

формами газового розряду, оскільки він безпосередньо характеризує економічну ефективність установки. Другим важливим параметром є сумарна продуктивність по озону (г/год), яка визначається виходячи з технологічних потреб об'єкта та обсягу оброблюваного продукту. Вибір форми електричного розряду при генерації озону обумовлюється одночасно цими двома характеристиками: підвищення сумарної продуктивності вимагає збільшення питомого енергетичного виходу окремих озонаторних елементів [7].

Достовірність отриманих результатів у кінцевому рахунку визначається точністю методики проведення досліджень та надійністю вимірювальних приладів. Для проведення комплексних експериментальних досліджень було розроблено ряд спеціалізованих установок і вимірювальних пристроїв, а також конструкцій розрядних камер і електронної апаратури, що дозволило систематично вивчати характеристики уніполярної корони при різних тисках атмосферного повітря [8].

Початкова напруга займання коронного розряду визначалася за допомогою мікроамперметра МЗ1/А із чутливістю $1,5 \cdot 10^{-8}$ А/поділ. Напруга живлення поступово підвищувалася до моменту повного відхилення світлового індикатора мікроамперметра (0,075 мкА), після чого напруга знижувалася до зникнення струму корони, і фіксувалося значення початкового напруження. У окремих випадках для підвищення чутливості застосовувався цифровий вольтметр В7-23, що вимірював падіння напруги на навантажувальному опорі 1 кОм у колі розряду. У мікрвольтовому діапазоні точність вимірювань досягала 10^{-10} А/поділ.

Для живлення розрядних камер використовувалися високовольтні стабілізовані джерела напруги типів ВС-22, ВС-23 та УПУ-1М, які забезпечують стабільність вихідної напруги у діапазоні 4–10 кВ з точністю (0,01–0,5) %. Для підвищення точності вимірювань напруги застосовувався омний шунт, виготовлений з мікропроволочних опорів МВСГ (клас точності 0,05). Похибка вимірювань напруги за допомогою цифрових вольтметрів В7-23 або ВЗ-38 не перевищувала 0,1 % [8].

Суттєва неоднорідність електричного поля викликає різну поведінку струму коронного розряду у внутрішніх та зовнішніх областях корони. Внутрішній

коронуючий шар визначає основні характеристики розряду, оскільки іонізаційні процеси відбуваються біля електродів з малим радіусом кривизни. Присутність вимірювального зонду у цій області може значно порушити розподіл напруженості поля та об'ємних зарядів, тому параметри розряду зазвичай оцінюються за зовнішніми електричними характеристиками, початковою напруженістю поля або по структурі світіння корони [8].

Одним із ефективних підходів до дослідження коронного розряду є застосування одночасного високовольтного постійного та малих змінних ВЧ-напряжень. Зондуючи розряд змінним високочастотним напруженням малої амплітуди, можна визначити динамічні характеристики коронного проміжку та залежність його ВЧ-провідності від частоти. У цьому випадку на розрядну камеру подається синусоїдальна змінна напруга від генератора ГС-100І з частотою від 200 Гц до 1,5 МГц, тоді як високовольтне живлення подається від джерела типу В. Вихідна змінна напруга вимірюється на навантаженні 1 кОм за допомогою осцилографа ДЕСО-2, лампового вольтметра ВЗ-2А та частотоміра ЧЗ-22.

Такий комплекс електронних вимірювальних приладів дозволяє проводити дослідження широкого спектру електричних параметрів: визначати початкову напруженість корони, будувати вольт-амперні характеристики, вимірювати струм розряду у вигляді високовольтних імпульсів, а також фіксувати тривалість фронтів імпульсів та їх частоту.

Для експериментального дослідження параметрів озонування повітря у виробничих приміщеннях можливо розробити спеціальну установку, схема якої представлена на рисунку 3.2. Вона дозволяє комплексно оцінювати продуктивність озонатора, питомий енергетичний вихід та характер розподілу озону у замкненому об'ємі, що є необхідною умовою для подальшого вдосконалення технологій озонування.

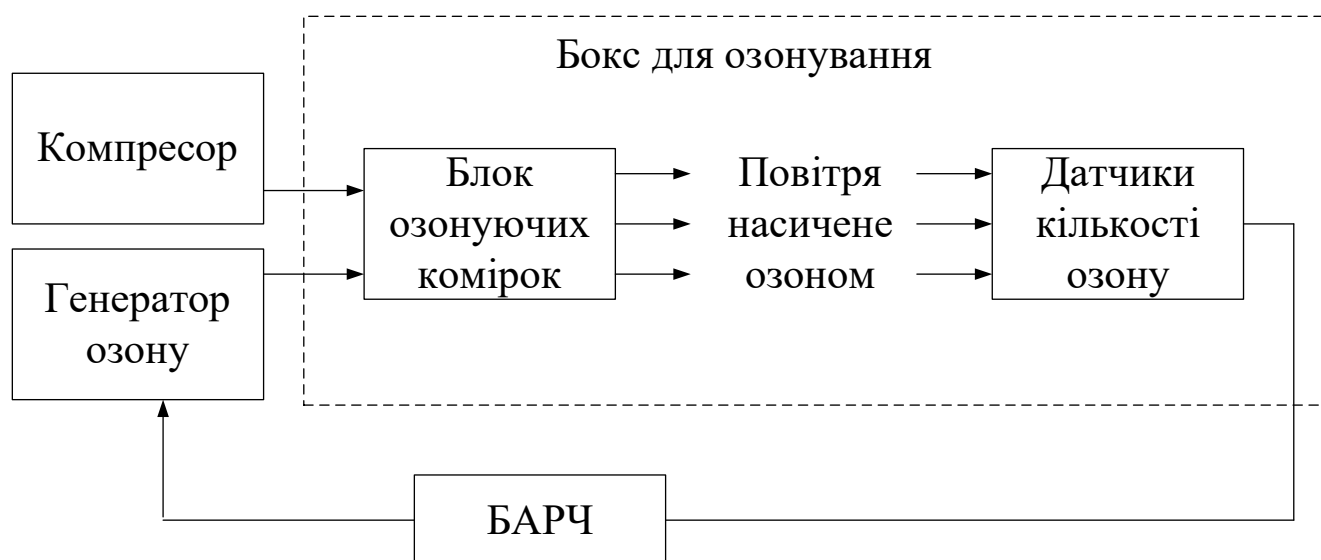


Рис. 3.2. Установка для автоматичного регулювання концентрації озону

Питомий енергетичний вихід озону η визначає ефективність перетворення електричної енергії у масу озону та виражається у грамах озону на кіловат-годину спожитої енергії. Його значення розраховується за наступною формулою:

$$\eta = \frac{m_{O_3}}{P \cdot t},$$

де m_{O_3} – маса озону, утвореного за час t (г), P – середня потужність споживана генератором озону (кВт), t – час роботи озонатора (год).

Сумарна продуктивність озонатора Q_{O_3} визначається як маса озону, вироблена за одиницю часу:

$$Q_{O_3} = \frac{m_{O_3}}{t} \quad (\text{г/год}).$$

Ця величина безпосередньо залежить від частоти високовольтних імпульсів та форми електричного розряду у бар'єрних осередках озонатора. Підвищення частоти імпульсів дозволяє збільшити сумарну продуктивність озону, проте вимагає відповідного збільшення питомого енергетичного виходу кожної окремої осередки.

Для оцінки ефективності генератора озону у різних режимах експериментально визначають:

1. Початкове напруження займання коронного розряду U_0 , яке встановлює нижню межу робочого діапазону генератора;

2. Середній струм розряду III, що дозволяє визначити електричну потужність у розрядному проміжку $P=U_{\text{cp}} \cdot I_{\text{cp}}$, де U_{cp} – середнє напруження під час імпульсу;
3. Тривалість та частоту імпульсів високовольтного генератора, які визначають енергетичне навантаження на розрядні камери;
4. Температуру та вологість повітря у закритому об'ємі, оскільки вони впливають на хімічну стабільність озону та його поглинання поверхнею продукту.

Експериментально визначена маса озону m_{O_3} розраховується за концентрацією озону C_{O_3} , об'ємом приміщення V та часом озонування t :

$$m_{\text{O}_3} = C_{\text{O}_3} \cdot V \cdot \rho_{\text{газ}}$$

де $\rho_{\text{газ}}$ – густина газової суміші, що враховує температуру та тиск.

Після отримання цих експериментальних величин розраховують питомий енергетичний вихід та сумарну продуктивність, що дозволяє побудувати залежність $\eta(Q_{\text{O}_3})$. На основі цієї залежності приймаються рішення щодо вибору режиму озонування:

- Для високої продуктивності озону Q_{O_3} необхідно збільшити частоту імпульсів та підтримувати стабільний середній струм розряду, що забезпечує відповідний питомий енергетичний вихід;
- У режимах тривалого зберігання продукції концентрація озону підтримується нижче критичних значень, щоб уникнути надмірного окислення продукту, при цьому питомий енергетичний вихід оптимізується для економії електроенергії;
- В адаптивних режимах керування параметри частоти імпульсів і струму розряду коригуються у реальному часі за даними озонometrів, що дозволяє компенсувати коливання температури, вологості та змін обсягу приміщення.

Таким чином, інтеграція експериментально визначених характеристик розряду з математичною моделлю адаптивного контролера дозволяє оптимізувати режими озонування як з точки зору ефективності генерації озону, так і з точки зору

енергоспоживання. Такий підхід забезпечує надійний контроль концентрації озону у замкненому об'ємі, дозволяючи реалізувати як промислові, так і експериментальні сценарії зберігання сільськогосподарської продукції.

3.4. Модель адаптивного керування процесом зберігання при озонуванні сільськогосподарської продукції у MATLAB

Адаптивне керування процесом озонування сільськогосподарської продукції у замкненому об'ємі передбачає підтримку заданої концентрації озону в умовах змінних параметрів середовища та фізико-хімічних характеристик продукту. У даному випадку система керування повинна враховувати динамічні зміни температури, вологості, об'єму приміщення та природні коливання концентрації озону, що виникають через поглинання озону поверхнею продукту та реакції з компонентами повітря.

Ідентифікація нестационарного динамічного об'єкта розглядається як поетапний процес визначення математичного опису, який найбільш адекватно відтворює реальну поведінку системи на основі доступних вимірювань. Зміна властивостей об'єкта з часом, характерна для процесів озонування сільськогосподарської продукції, обумовлює потребу в адаптивних методах, що дозволяють оновлювати модель відповідно до нових даних. Формування такого опису ґрунтується на спостереженнях за вхідними сигналами та реакцією об'єкта, що створює інформаційне підґрунтя для побудови моделі, здатної відстежувати динаміку об'єкта і коригувати свої параметри у процесі експлуатації.

Першим етапом є структурна ідентифікація, яка полягає у визначенні форми математичної моделі на основі аналізу технологічного процесу, його фізичних закономірностей і попереднього досвіду дослідження подібних систем. На цьому етапі встановлюється порядок системи, тип її рівнянь та характер залежностей між змінними. У контексті процесу озонування обґрунтованим є використання дискретної моделі другого порядку, яка достатньо точно відображає інерційні властивості цього технологічного процесу та чутливість концентраційних

характеристик до змін інтенсивності озонування.

Після визначення структури обирається метод параметричної ідентифікації. Для оцінювання параметрів моделі застосовується метод найменших квадратів, а також його адаптивні модифікації, серед яких рекурентний та розширений рекурентний методи. Метод найменших квадратів розглядається як універсальний інструмент оцінювання параметрів, що базується на мінімізації розбіжності між вимірним виходом об'єкта та прогнозованим значенням, яке обчислюється за поточною моделлю. Ця розбіжність характеризується функцією втрат, яка визначається квадратом похибки прогнозування у вигляді $F(e(N)) = e^2(N)$, де $e(N)$ є різницею між експериментальним значенням вихідної величини та оцінкою моделі.

Для демонстрації застосування МНК до лінійного дискретного об'єкта другого порядку розглядається динамічна модель, у якій поточне значення вихідної координати описується через попередні значення виходу та входу. Така модель має вигляд

$$y(N) = -a_1y(N-1) - a_2y(N-2) + b_1u(N-1) + b_2u(N-2) + v(N). \quad (3.1)$$

Вибір саме цієї моделі зумовлений тим, що при низькому відношенні шуму до корисного сигналу вона достатньо точно відтворює динаміку об'єкта та дозволяє здійснювати ефективне оцінювання параметрів. З огляду на це прогнозоване значення вихідної величини формується шляхом нехтування шумовою складовою, що дає можливість записати модель у спрощеному вигляді

$$\hat{y}(N) = -a_1y(N-1) - a_2y(N-2) + b_1u(N-1) + b_2u(N-2). \quad (3.2)$$

Таке подання є вихідним для обчислення оцінок параметрів, на основі яких побудована модель наближається до реального динамічного процесу. За умов активної ідентифікації, коли на об'єкт подаються спеціально сформовані тестові дії для покращення збудження динаміки, точність оцінювання параметрів зростає, а модель набуває більш адекватних властивостей навіть у ситуаціях, коли об'єкт змінює свій стан внаслідок біологічних, фізико-хімічних або технологічних процесів, характерних для озонування сільськогосподарської продукції.

Модель, розроблена в середовищі MATLAB/Simulink, включає наступні функціональні блоки:

1. Блок озонування (ОЗ). Він відтворює генератор високовольтних імпульсів та бар'єрний розряд озонатора. Основним керованим параметром є частота імпульсів подачі на озонатор, яка безпосередньо визначає продуктивність озонатора та швидкість генерації озону у замкненому об'ємі. Блок дозволяє задавати режим подачі імпульсів у реальному часі та отримувати вихідні значення концентрації озону.
2. Блок озонometrів (ОМ). Моделює вимірювальні канали, що реєструють поточну концентрацію озону у різних точках приміщення. Для підвищення точності моделі враховано ефект неоднорідності концентрації озону та затримки сигналу датчиків.
3. Адаптивний контролер (МП). Включає алгоритм регулювання, реалізований на принципах ПІ/ПІД-регулювання з можливістю адаптації параметрів у реальному часі залежно від поточних вимірювань концентрації озону. Мікропроцесорна модель аналізує дані від озонometrів, усереднює та коригує частоту імпульсів генератора для підтримання стабільного рівня озону. Адаптивна функція дозволяє змінювати коефіцієнти регулятора під час коливань параметрів середовища, що забезпечує стійкість та ефективність процесу.
4. Блок середовища (С). Моделює фізико-хімічні процеси у замкненому об'ємі: дифузю озону, взаємодію з поверхнею продукту, поглинання озону компонентами повітря та зміни температури і вологості. Цей блок дозволяє отримати більш реалістичну динаміку процесу та перевіряти ефективність адаптивного керування у різних сценаріях.
5. Блок моніторингу та візуалізації. Відповідає за графічне представлення динаміки концентрації озону, частоти імпульсів генератора, сумарної продуктивності озонатора та помилок регулювання. Це дозволяє оцінювати ефективність адаптивного контролера та проводити корекцію параметрів

моделі.

Модель у MATLAB/Simulink побудована за принципом замкнутого контуру управління: сигнал від ознометрів подається на адаптивний контролер, який обчислює необхідну частоту імпульсів для генератора озону, що, у свою чергу, впливає на концентрацію озону у приміщенні. Циклічне повторення цього процесу дозволяє підтримувати стабільний режим озонування у реальному часі.

Для підвищення точності моделі враховуються такі фактори: затримка реакції датчиків, нелінійність процесу генерації озону, залежність швидкості утворення озону від температури та вологості, а також розподіл озону у приміщенні. Використання адаптивного контролера дозволяє компенсувати ці фактори та забезпечити стабільну концентрацію озону навіть при значних коливаннях умов середовища або зміні обсягу приміщення.

Модель дозволяє оцінити динаміку зміни концентрації озону та прогнозувати реакцію продукту на зміну режимів роботи озонатора.

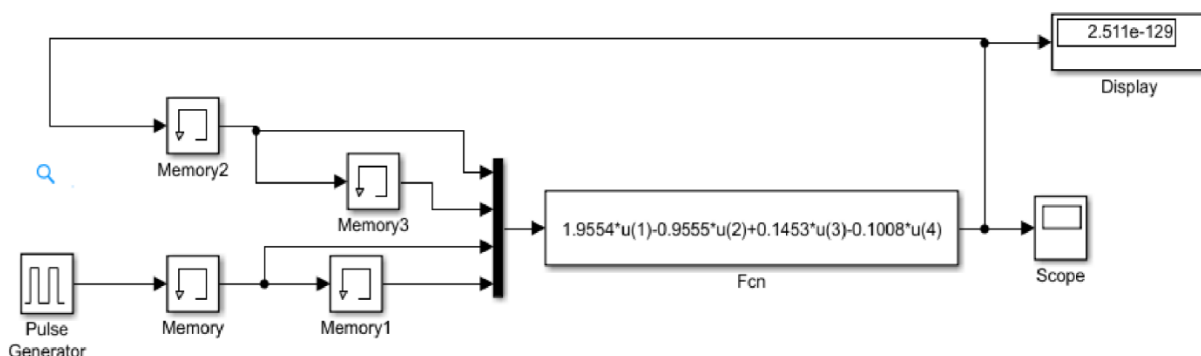


Рис. 3.3 Модель адаптивного керування процесом зберігання сільськогосподарської продукції під час озонування у замкнутому об'ємі, реалізована в середовищі MATLAB/Simulink.

Для опису процесу озонування картоплі застосована модель другого порядку (3.1), параметри якої були визначені експериментально шляхом апроксимації кривої вимірювань (крива 1) апроксимуючою кривою (крива 2) (рис.3.4). Це дозволяє точніше оцінити коефіцієнти моделі, що відображають динаміку системи:

$$a_1=-1,9554, a_2=-0,9555, b_1=0,1453, b_2=0,1008.$$

На основі цих параметрів модель другого порядку (рис.3.3) після ідентифікації у режимі off-line набуває вигляду:

$$y(N) = 1,9554 y(N - 1) - 0,9555 y(N - 2) + 0,1453 u(N - 1) - 0,1008 u(N - 2) + v(N), (4.3)$$

де $y(N)$ – вихідна величина, що характеризує концентрацію озону у замкненому об’ємі на дискретному кроці N , $u(N)$ – керуючий вплив генератора озону (частота імпульсів або сигнал управління подачею озону), а $v(N)$ – шум або завада, яка у даній моделі розглядається як незначна або непередбачувана і відкидається для спрощення моделі.

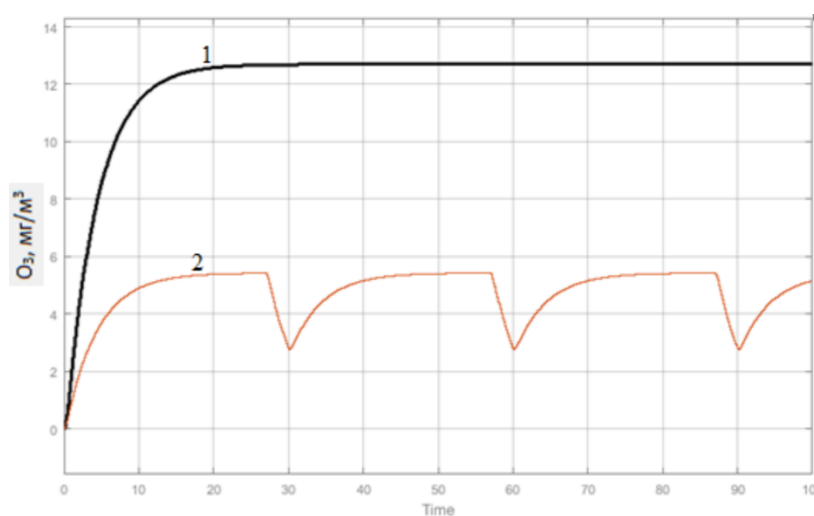


Рис. 3.4. Процес озонування овочів

Рисунок 3.4 ілюструє процес озонування овочів, у якому крива 1 відображає експериментально отриману залежність, сформовану на основі прямих вимірювань у реальних умовах обробки продукту озонованим середовищем. Крива 2 представляє апроксимацію цієї залежності за допомогою математичної моделі, що узагальнює емпіричні дані та відтворює характерні закономірності перебігу процесу озонування. Такий підхід забезпечує можливість аналітичної інтерпретації поведінки об’єкта та створює основу для подальшої оптимізації технологічних режимів.

Відкидання терміну $v(N)$ дозволяє отримати чисту дискретну модель другого порядку, що описує основну динаміку процесу озонування картоплі, без урахування випадкових коливань. Ця модель дає змогу:

1. Виконувати симуляцію реакції системи на зміну режимів роботи озонатора;

2. Розробляти алгоритми адаптивного керування, що автоматично підбирають частоту подачі озону для підтримання заданої концентрації;
3. Проводити прогнозування динаміки концентрації озону у закритому об'ємі для різних сценаріїв зберігання продукції.

Коефіцієнти a_1 та a_2 характеризують внутрішню динаміку системи, тобто спадковість вихідного сигналу у часі, а коефіцієнти b_1 та b_2 відображають вплив керуючого сигналу на зміну концентрації озону. Завдяки високій точності представлення до четвертого знаку після коми модель дозволяє відтворити експериментальні криві із мінімальною похибкою.

Отримані внаслідок апроксимації експериментальних даних коефіцієнти дискретної моделі другого порядку дають змогу відтворити динаміку процесу озонування овочів у замкненому середовищі, що забезпечує відображення як інерційних властивостей технологічного процесу, так і залежності вихідної концентрації озону від попередніх значень вхідних параметрів. Результати ідентифікації для першої групи овочів подано у вигляді розностного рівняння

$$y(N) = 1,9554y(N - 1) - 0,9555y(N - 2) + 0,1453u(N - 1) - 0,1008u(N - 2), \quad (3.4)$$

де параметри моделі демонструють інерційний характер зміни концентрації озону під впливом режимів подачі озонірованого повітряної суміші.

Аналогічна процедура апроксимації застосована до експериментальної кривої, що характеризує процес озонування іншої овочевої продукції, зокрема моркви. На підставі аналізу кривої відгуку отримано оцінки параметрів дискретної моделі

$$a_1 = -1,9321; a_2 = 0,9325; b_1 = 0,1541; b_2 = 0,0069,$$

які дають змогу побудувати рівняння другого порядку у вигляді

$$y(N) = 1,9321y(N - 1) - 0,9325y(N - 2) + 0,1541u(N - 1) + 0,0069u(N - 2), \quad (3.4).$$

Параметри моделі подано з точністю до четвертого десяткового знака, що відповідає вимогам до інженерних розрахунків та забезпечує коректність подальшого використання моделі в адаптивних алгоритмах прогнозування.

Встановлена структура рівняння відображає залежність зміни озонної концентрації від попередніх станів системи, що є типовим для технологічних процесів, у яких озон взаємодіє з поверхнею овочевої сировини, змінюючи свій розподіл у замкненому просторі камери зберігання.

Результати моделювання функціонування адаптивної системи керування процесами озонування в умовах нестационарності підтвердили здатність запропонованої структури забезпечувати стабільний технологічний режим під впливом змінних властивостей середовища. Використання ідентифікованих моделей другого порядку для різних видів овочевої продукції дозволило дослідити динаміку реакції на зміни керуючої дії та продемонструвати відмінності між об'єктами з різними фізіологічними характеристиками. Моделі, сформовані на основі апроксимації експериментальних даних, забезпечили адекватне узгодження з реальними процесами, що дало змогу здійснити алгоритмізацію адаптивного керування з урахуванням непередбачуваних змін концентрації озону, температурно-вологісного стану камери та біологічної активності сировини.

Побудова ієрархічної розподіленої системи автоматизованого керування процесом озонування створила можливість реалізувати багаторівневу структуру прийняття рішень, у якій взаємодія між контуром стабілізації концентрації озону та контуром прогнозування сприяла формуванню динамічно узгоджених керуючих дій. Візуалізація функціонування адаптивного алгоритму у середовищі MATLAB дала можливість простежити взаємозв'язок між фактичним станом середовища і прогнозованим відхиленням параметрів технологічного процесу, що стало основою для аналізу режимів роботи системи в умовах зміни спектра мікробіологічного забруднення повітря.

Графічні результати симуляції дозволяють виділити усталені та перехідні режими системи, а також оцінити чутливість моделі до збурень. На графіку, що відтворює залежність режимів озонування від концентрації мікроорганізмів у повітрі камери (рис.3.5), спостерігається плавне відстеження заданого рівня як у зниженому, так і у підвищеному діапазонах концентрацій, що свідчить про ефективність адаптивного механізму компенсації. При підвищенні

мікробіологічного навантаження система автоматично збільшує інтенсивність озонування, тоді як зниження рівня забруднення поступово сприяє переходу до енергозберігаючих режимів.

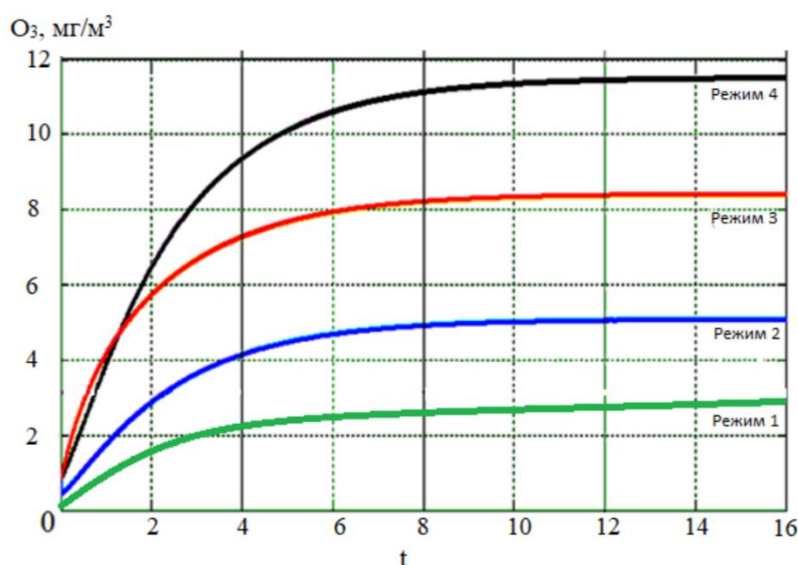


Рис. 3.5. Графіки залежності режимів озонування від концентрації мікроорганізмів у повітряному середовищі

Узагальнення результатів дослідження може бути подане у вигляді інтегрованої таблиці, де для кожного виду овочевої продукції наведено ідентифіковані коефіцієнти моделі, характеристики перехідних процесів, час виходу на усталений режим, фактичний рівень енергоспоживання та показники мікробіологічної ефективності. Таке порівняння дає змогу визначити відмінності в поведінці системи й аргументовано обґрунтувати параметри оптимальних режимів озонування для різних умов. Подані дані також демонструють, що моделі з більш вираженою інерційністю потребують точнішого налаштування адаптивних алгоритмів, тоді як об'єкти з низькою інерційністю характеризуються швидшими реакціями та більшою чутливістю до збурень.

Використання адаптивної ідентифікації у режимі реального часу створює можливість формувати керуючі впливи з урахуванням змінних властивостей овочевої продукції та умов зберігання, що унеможливорює виникнення довготривалих відхилень концентрації озону від необхідного рівня. Такий підхід забезпечує стабільне мікробіологічне середовище, мінімізує енерговитрати й

підвищує тривалість зберігання продукції без втрати якості. Завершальний етап моделювання продемонстрував, що реалізована структура адаптивної системи може застосовуватися для широкого спектра технологічних завдань, пов'язаних із зберіганням овочевої продукції, а також легко масштабуватися для промислових озонаторних комплексів різної потужності.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі було здійснено комплексне дослідження процесів озонування сільськогосподарської продукції в умовах закритих приміщень з використанням адаптивних методів ідентифікації та математичного моделювання. Розглянута динаміка формування озонної концентрації у повітряному середовищі та її взаємодія з біологічними об'єктами дозволила сформулювати узагальнену модель технологічного процесу, здатну відображати ключові особливості нестационарних умов озонування. Детальна апроксимація експериментальних кривих дала змогу отримати параметри розностних моделей другого порядку для різних типів овочевої продукції, що продемонструвало суттєву залежність характеру реакції продукції від її фізико-хімічних властивостей.

Застосування методів активної ідентифікації, зокрема алгоритму найменших квадратів, забезпечило можливість оперативного визначення параметрів моделі у ситуаціях, коли інтенсивність збурень змінюється в часі. Це підвищує достовірність прогнозування концентрації озону та дозволяє встановити оптимальні режими озонування для підтримання стабільного та рівномірного впливу на об'єкт. Отримані математичні моделі дали змогу сформулювати основу для побудови адаптивної системи керування, у якій структури та коефіцієнти регуляторів змінюються відповідно до поточного стану повітряного середовища та реакції продукції на озонний вплив.

Моделювання функціонування системи в середовищі MATLAB підтвердило ефективність використання адаптивного підходу при регулюванні технологічних процесів озонування. Чутливість моделі до параметричних змін забезпечує точне

відтворення реальних технологічних умов, а формування прогнозних значень дає змогу завчасно компенсувати небажані відхилення у роботі озонатора. Візуалізація процесів озонування у вигляді часових залежностей і структурних схем створила інструмент для аналітичного оцінювання режимів роботи та обґрунтування необхідності переходу до адаптивних стратегій керування.

Загальний аналіз досліджень свідчить, що використання озонування як технологічного методу забезпечення біологічної безпеки продукції потребує точного керування концентрацією озону з урахуванням мінливості технологічних параметрів. Розроблена адаптивна система керування, здатна до постійного коригування власних характеристик, демонструє стійкість, підвищену точність і зменшення енергетичних витрат при формуванні необхідного рівня озонної концентрації. Отримані результати формують наукове підґрунтя для впровадження інтелектуальних систем керування у процеси зберігання та обробки сільськогосподарської продукції, забезпечуючи підвищення їх ефективності та прогнозованості в умовах реального виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі досліджено та проаналізовано фізичні та математичні аспекти функціонування озонувального елемента та процесів управління технологією озонування плодоовочевої продукції. Отримані результати дозволяють узагальнити основні закономірності формування електричного поля, коронного розряду та інтенсивності озонування, а також визначити ефективність адаптивних систем управління з урахуванням багатовимірності та нестационарності об'єкта.

У першому розділі магістерської роботи було розкрито фізичні процеси, що визначають роботу озонувального елемента з голчасто-сітчастою електродною системою. Аналіз явищ, пов'язаних із виникненням та розвитком коронного розряду, продемонстрував складність електрофізичних механізмів у зоні значної неоднорідності електричного поля, яка формується біля кончика коронуючого електрода. Показано, що саме радіус кривизни поверхні електрода визначає інтенсивність локального поля і задає умови для початкової іонізації газового середовища. Установлено, що збільшення прикладеної напруги спричинює поступове розширення активної коронної зони, яка на ранніх етапах локалізується поблизу найменшого радіуса кривизни, а з підвищенням потенціалу охоплює периферійні ділянки поверхні електрода. Такий характер поведінки електричного поля свідчить про самоорганізацію просторового заряду, що водночас визначає форму і динаміку коронного об'єму. Розгляд моделей, що описують структуру уніполярного коронного розряду, дав змогу сформулювати математичний підхід до оцінювання параметрів поля у зовнішній області розряду. Використання припущень щодо однорідності й малої товщини іонізаційного шару, а також стабілізації напруженості біля поверхні електрода на рівні початкового значення створює основу для спрощеного, але фізично узгодженого опису процесу. У такому контексті швидкість руху іонів може бути подана у вигляді пропорційної залежності від напруженості поля, що дозволяє надалі враховувати вплив іонного струму на формування концентрації озону в робочому проміжку. У межах

системного аналізу електродної конфігурації типу «голка-сітка» було показано, що геометричні параметри, включно з діаметром корпусу, діаметром коронуючого електрода, радіусом заокруглення кончика голки та відстанню між електродами, відіграють визначальну роль у формуванні розподілу електричного поля. Саме від них залежить ефективність запуску коронного розряду, величина робочого струму, стабільність коронної зони та інтенсивність озонування. Ці положення створюють методологічну базу для аналітичних і чисельних розрахунків, необхідних у наступних розділах для конструювання озонувального елемента та оптимізації його геометричних і електричних характеристик.

У другому розділі магістерської роботи проведено аналіз процесу ідентифікації та управління технологічним процесом озонування плодоовочевої продукції з урахуванням нестаціонарності та багатовимірності об'єкта управління. Було обґрунтовано структуру адаптивної системи управління, яка включає два етапи: етап ідентифікації об'єкта управління та побудову адаптивної прогнозуючої моделі, а також етап керування на основі отриманих оцінок і поточних вимірювань вхідних та вихідних параметрів. Було сформульовано математичні моделі як одноконтурної, так і двоконтурної адаптивної системи управління, де другий контур передбачає участь групи експертів-технологів для врахування якісних характеристик продукції та внесення коригуючих впливів у сигнал управління. Математичне представлення системи включає рекурентні алгоритми оцінки змінних коефіцієнтів об'єкта, що дозволяє враховувати їхню стохастичну природу та забезпечує локально-оптимальну підстройку моделей під конкретні партії продукції. Розглянуто особливості ідентифікації в умовах дискретного надходження партій плодоовочевої продукції з різним рівнем мікроорганізмів, що зумовлює необхідність використання адаптивних прогнозуючих моделей, інваріантних до змін вхідних характеристик продукції. У роботі проведено класифікацію вимірюваних параметрів, визначено статистичні та додаткові характеристики партій продукції, що забезпечує підвищення точності прогнозування та ефективності управління.

У третьому розділі магістерської роботи проведено аналіз процесу ідентифікації та управління технологічним процесом озонування плодоовочевої продукції з урахуванням нестаціонарності та багатовимірності об'єкта управління. Було обґрунтовано структуру адаптивної системи управління, яка включає два етапи: етап ідентифікації об'єкта управління та побудову адаптивної прогнозуючої моделі, а також етап керування на основі отриманих оцінок і поточних вимірювань вхідних та вихідних параметрів. Було сформульовано математичні моделі як одноконтурної, так і двоконтурної адаптивної системи управління, де другий контур передбачає участь групи експертів-технологів для врахування якісних характеристик продукції та внесення коригуючих впливів у сигнал управління. Математичне представлення системи включає рекурентні алгоритми оцінки змінних коефіцієнтів об'єкта, що дозволяє враховувати їхню стохастичну природу та забезпечує локально-оптимальну підстройку моделей під конкретні партії продукції. Розглянуто особливості ідентифікації в умовах дискретного надходження партій плодоовочевої продукції з різним рівнем мікроорганізмів, що зумовлює необхідність використання адаптивних прогнозуючих моделей, інваріантних до змін вхідних характеристик продукції. У роботі проведено класифікацію вимірюваних параметрів, визначено статистичні та додаткові характеристики партій продукції, що забезпечує підвищення точності прогнозування та ефективності управління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Caprio V., lignola P.G., insole A. Gas phase ozone evaluation by thermal decomposition technique// *Analytical Chemistry*. 1980. Vol/ 52. N 7. – P. 1123-1125.
2. Hocgeson J.A., Baumgardner R.E., Martin B.E., Rehme K.A. Stoichiometry in the neutral iodometric procedure for ozone by Gas-Phase Titration with Nitric Oxide// *Analytical Chemistry*. 1971. Vol. 43. N 8. – P. 1123-1126.
3. Friedrich Zúrn. Flaschensterilisation mit Ozon// *Neinwirtschaft*. 1982. Vol. 118. N 30. – P. 793-794; 796-797; 800.
4. Lanting R.W. Modification of potassium iodide procedure for improved stoichiometry// *Atmospheric Environment*. 1979. Vol. 13. N 4. – P.553-554.
5. Бахтаєв Ш.А., Тойгожинова А.Ж., Коджабергенова А.К. Фізика процесів утворення та втрат озону у негативному коронному розряді. Вісник Національної академії наук Республіки Казахстан, №4, Алмати, 2014. – С. 36–41.
6. Sattari P., Adamiak K. Numerical Simulation of Trichel Pulses in a Negative Corona Discharge in Air // *IEEE. Transactions on Industry Applications*. 2010. Vol. 47. – P. 1935-1943.
7. A. Toigozhinova, G. Yussupova. Mathematical modeling of processes in the zone of corona discharge ionization. *Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym. Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference. Lublin. 11 – 13 Czerwca 2016. ISBN 978-83-60617-45-8. – P. 219-220.*
8. Sh. A. Bakhtayev, Sh.K. Koshimbaev, A.Zh. Toygozhinova. Research and Development of system elements of automatic control and regulation of ozone 139 concentration in enclosed space. *Research Journal of applied Sciences* 10(12): 2015, *Medwell Journals*. – P. 947-955.