

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

_____ Микола СІДЕЛЄВ

« ____ » _____ 2026 р

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

**Автоматизована система управління мікрокліматом для
камер сушки лікарських рослин на основі інноваційних засобів**

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

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка»

Здобувач

_____ **Євген СОПІЛЬНЯК**

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

к.т.н, доцент

_____ **Олег ЩЕСІЮК**

« ____ » _____ 2026 р.

Консультант

докт. біол. наук, професор

_____ **Людмила ГРИГОР'ЄВА**

« ____ » _____ 2026 р.

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
 інноваційних засобів

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет	Комп'ютерних наук
Кафедра	Автоматизації та комп'ютерноінтегрованих технологій
Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Освітній ступінь	Магістр
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерноінтегровані технології та робототехніка
Освітня програма	Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Сіделєв М. І. _____

“ ____ ” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну магістерську роботу здобувача

Сопільняк Євген Миколайович

1. Тема кваліфікаційної роботи «Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі інноваційних засобів» затверджена наказом ректора ЧНУ ім. Петра Могили № 265 від «05» листопада 2025р.
2. Строк представлення кваліфікаційної роботи «18» червня 2026 р.
3. Очікуваний результат роботи та початкові дані: Програмно-апаратний комплекс автоматизованої системи керування процесом сушіння рослинної сировини на базі підвісної мобільної робототехнічної системи із безконтактним індуктивним живленням , математичні моделі тепломасообмінних та електромагнітних процесів , прецизійні алгоритми адаптивного керування мікрокліматом на основі динамічної 3D-карти середовища та людино-машинний інтерфейс візуалізації. Матеріали

магістерського дослідження, патентні та науково-технічні відомості про системи індуктивної передачі енергії та траєкторного сканування простору, технічні характеристики заводських цифрових сенсорів і промислових логічних контролерів, структура та програмна реалізація логіки PID-регулювання, а також НМІ-інтерфейс Smart-моніторингу стану енергосистеми та параметрів мікроклімату камери сушки.

4. Перелік питань, що підлягають розробці: Аналіз сучасного стану та проблем автоматизації процесів сушіння рослинної сировини; дослідження фізико-технічних характеристик об'єкта сушіння та режимів мікроклімату; порівняльний аналіз та патентний огляд інноваційних систем безконтактної передачі енергії та підвісних робототехнічних комплексів; формування технічних вимог до автоматизованої системи керування; розробка структурної, функціональної та принципової схем комплексу; математичне моделювання тепломасообмінних процесів у камері сушіння та електромагнітних процесів у трактах ІРТ; проектування алгоритмів адаптивного керування мікрокліматом та траєкторного сканування простору; UML-моделювання поведінки та взаємодії компонентів робототехнічної системи; програмна реалізація логіки керування на базі промислового контролера та людино-машинного інтерфейсу; експериментальне тестування, аналіз заводостійкості та оцінка ефективності розроблених моделей; питання охорони праці, виробничої санітарії та безпеки в аварійних ситуаціях.

5. Перелік графічних матеріалів: Схема розподілу зон нерівномірності параметрів середовища в камері сушіння; криві кінетики сушіння та зміна температури рослинної сировини; залежність ресурсу акумуляторних елементів від температури експлуатації; функціональна структура та схема ІРТ-системи з елементами електромагнітного захисту; частотні характеристики вихідної напруги на навантаженні та струмів у контурах; залежність потужності, ККД та напруги від зміщення пікапа; графіки кінематичних параметрів (переміщення, швидкості та прискорення) мобільного модуля; залежність коефіцієнта магнітного зв'язку від часу при русі; блок-схема алгоритму адаптивного керування мікрокліматом; графіки перехідних процесів температури, вологості та керуючих сигналів PID-регуляторів під дією зовнішніх збурень; моніторинг напруги ІРТ-живлення та якості бездротового зв'язку; журнал аварійних і попереджувальних подій;

загальна функціональна структура АСК сушильної камери; архітектура та структура мобільного моніторингового модуля; логіка взаємодії сенсорів, контролера та виконавчих механізмів; UML-моделювання роботи та взаємодії компонентів системи; людино-машинний інтерфейс оператора: головний екран моніторингу, графіки параметрів мікроклімату та стану енергосистеми в реальному часі; архів останніх вимірювань та журнал аварійних повідомлень; схема пожежонебезпечних та шкідливих виробничих факторів при експлуатації ІРТ-комплексу.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи
Щесюк О.В.	Автоматизація та КІТ	1 - 3 розділи
Григор'єва Л.І.	Екологія	4 розділ

7. Дата видачі завдання «05» листопада 2025 р.

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
 інноваційних засобів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1.	Розробка та затвердження завдання на виконання КМР	09.09.2025	05.11.2025	Виконано
2.	Огляд літератури за темою роботи	06.11.2025	20.11.2025	Виконано
3.	Складання календарного плану КМР	21.11.2025	22.11.2025	Виконано
4.	Аналіз предметної області	24.11.2025	22.12.2025	Виконано
5.	Розробка проектних рішень	23.12.2025	26.02.2026	Виконано
6.	Моделювання, конструювання та програмування СА та РТС	02.03.2026	17.04.2026	Виконано
7.	Дослідження СА та РТС, аналіз результатів	20.04.2026	11.05.2026	Виконано
8.	Попередній захист	12.05.2026	12.05.2026	Виконано
9.	Робота над розділом з охорони праці	17.04.2026	20.05.2026	Виконано
10.	Відгук керівника КМР	21.05.2026	22.05.2026	Виконано
11.	Оформлення КМР та презентації	25.05.2026	04.06.2026	Виконано
12.	Рецензування	05.06.2026	16.06.2026	Виконано
13.	Завершення оформлення КМР та презентації	17.06.2026	18.06.2026	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи	25.06.2026	25.06.2026	Виконано

Здобувач

Євген СОПІЛЬНЯК

«__» _____ 202__ р.

Керівник роботи

к. т. н. , доцент

Олег ЩЕСЮК

«__» _____ 202__ р.

АНОТАЦІЯ

Сопільняк Є.М. Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі інноваційних засобів.

Кваліфікаційна магістерська робота зі спеціальності 174

«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

– Миколаїв, ЧНУ ім. Петра Могили, 2026. – 135 сторінок, 32 рисунків, 11 таблиць, 16 джерел посилання.

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена розробленню програмно-апаратного комплексу автоматизованої системи керування процесом сушіння рослинної сировини на базі підвісної мобільної робототехнічної системи. Актуальність роботи зумовлена потребою підвищення енергоефективності, завадостійкості та точності контролю параметрів мікроклімату в промислових сушильних камерах шляхом впровадження безконтактного індуктивного живлення та мобільних засобів сканування простору.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого керування температурно-вологісними режимами середовища сушильної камери. Предметом дослідження є математичні моделі тепломасообмінних та електромагнітних процесів, алгоритми адаптивного PID-регулювання та програмно-апаратні засоби мобільного моніторингового комплексу.

Метою роботи є розроблення комплексної системи, що забезпечує безконтактне енергозабезпечення робота під час руху, прецизійне вимірювання параметрів мікроклімату, формування керуючих рішень для виконавчих механізмів та візуалізацію стану енергосистеми й камери в реальному часі.

У роботі проаналізовано сучасний стан автоматизації сушильних процесів, виконано порівняльний та патентний огляд бездротових систем передачі енергії. Розроблено функціональну архітектуру АСК, математичну модель тракту ІРТ у MATLAB, алгоритми адаптивного керування, UML-моделі взаємодії компонентів, а також програмну логіку для промислового контролера та людино-машинний інтерфейс. Тестування та аналіз перехідних процесів показали високу завадостійкість і коректну реакцію системи на зовнішні температурні та координатні збурення. Також розглянуто питання охорони праці, виробничої санітарії та безпеки використання розробленого комплексу.

Ключові слова: автоматизована система управління, мікроклімат, сушильна камера, індуктивна передача енергії, мобільний моніторинговий модуль, алгоритм адаптивного керування, PID-регулятор, людино-машинний інтерфейс, журнал аварійних подій.

ANNOTATION

Sopilniak Ye.M. Automated microclimate control system for medicinal plant drying chambers based on innovative tools. Qualification master's thesis in specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics". – Mykolaiv, Petro Mohyla Black Sea State University, 2026. – 135 pages, 32 figures, 11 tables, 16 references.

The qualification master's thesis is devoted to the development of a software and hardware complex of an automated control system for the drying process of plant raw materials based on a suspended mobile robotic system. The relevance of the work is driven by the need to increase energy efficiency, noise immunity, and the accuracy of microclimate parameters control in industrial drying chambers through the implementation of inductive power transfer and mobile spatial scanning tools.

The object of research is the process of automated control of temperature and humidity regimes in the drying chamber environment. The subject of research is mathematical models of heat-and-mass transfer and electromagnetic processes, adaptive PID-control algorithms, and software and hardware components of the mobile monitoring complex.

The purpose of the work is to develop a comprehensive system that provides contactless energy supply to the robot during movement, precision measurement of microclimate parameters, generation of control decisions for actuators, and real-time visualization of the energy system and drying chamber status.

The thesis analyzes the current state of automation in drying processes and provides a comparative and patent review of wireless power transfer systems. The functional architecture of the automated control system, a mathematical model of the IPT path in MATLAB, adaptive control algorithms, UML models of component interaction, as well as software logic for a programmable logic controller and a

human-machine interface have been developed. Testing and analysis of transient processes demonstrated high noise immunity and correct system response to external temperature and coordinate disturbances. The issues of occupational health and safety, industrial sanitation, and the safe operation of the developed complex are also considered.

Keywords: automated control system, microclimate, drying chamber, inductive power transfer (IPT), mobile monitoring module, adaptive control algorithm, PID controller, human-machine interface (HMI), alarm log.

ЗМІСТ

ВСТУП

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПАТЕНТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Сучасний стан та проблеми автоматизації процесів сушіння рослинної сировини.

1.2. Дослідження фізико-технічних характеристик об'єкта сушіння та вимог до режимів мікроклімату.

1.3. Порівняльний аналіз систем енергозабезпечення мобільних робототехнічних комплексів (акумуляторні, тролейні та індуктивні системи).

1.3.1. Акумуляторні системи живлення: особливості застосування та обмеження в умовах підвищених температур.

1.3.2. Тролейні (контактні) системи енергопостачання: аналіз технічних ризиків та пожежної безпеки.

1.3.3. Індуктивні системи безконтактної передачі енергії (ІРТ) як основа енергозабезпечення інноваційних РТС.

1.4. Огляд та аналіз інноваційних методів безконтактної передачі енергії (ІРТ) для промислових систем.

1.5. Патентний огляд підвісних робототехнічних систем моніторингу та засобів безконтактного живлення.

1.6. Обґрунтування структури системи на базі монорейкового робота з індуктивним каналом передачі енергії.

1.7. Перспективи та стратегія впровадження інноваційних систем моніторингу в цифровізоване виробництво

1.8 Постановка задач дослідження

Висновки до розділу 1

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ

2.1. Математична модель камери сушки як об'єкта керування з динамічними параметрами.

2.2. Математичне моделювання процесу індуктивної передачі енергії в системі «первинний контур – пікап».

2.3. Дослідження динаміки руху робота на монорейці при живленні від магнітного поля.

2.4. Синтез алгоритмів адаптивного керування мікрокліматом на основі безперервного сканування середовища.

Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІННОВАЦІЙНОЇ АСК

3.1. Розробка функціональної схеми АСК з інтегрованою ІРТ-системою та мобільним модулем.

3.2. Обґрунтування вибору апаратної бази: високочастотний інвертор, контролери, приводи та заводостійкі сенсори.

3.3. Розробка принципів електричних схем бортового випрямляча, стабілізатора та вузла керування роботом.

3.4. Програмна реалізація логіки PID-регулювання та алгоритмів бездротового обміну даними.

3.5. Створення людино-машинного інтерфейсу (НМІ) для візуалізації параметрів мікроклімату та стану енергосистеми.

Висновки до розділу 3

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Аналіз небезпечних факторів при експлуатації камер сушки та високовольтних ІРТ-інверторів.

4.2. Технічні заходи з електромагнітної безпеки та захисту від ураження струмом.

4.3. Розрахунок захисного заземлення та параметрів вентиляції.

4.4. Заходи з пожежної безпеки та план дій у надзвичайних ситуаціях.

Висновки до розділу 4

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

ВСТУП

Актуальність теми: Процес сушіння лікарських рослин (далі - рослинна сировина) є одним із найбільш енергоємних етапів у агропромисловому комплексі. Якість кінцевого продукту критично залежить від прецизійного дотримання температурно-вологісних режимів. Традиційні АСК використовують мережу стаціонарних датчиків, що призводить до появи «сліпих зон» та нерівномірного висихання сировини через градієнти температур у великих об'ємах камер.

Впровадження інноваційної робототехнічної системи (РТС) на базі монорейкового підвісного модуля з індуктивною передачею енергії (ІРТ — Inductive Power Transfer) дозволяє реалізувати безперервне динамічне сканування всього об'єму камери. Це забезпечує отримання точної 3D-карти розподілу вологості та температури без необхідності зупинок на підзарядку. Використання ІРТ усуває ризики іскроутворення та зносу контактних груп у вологому середовищі, що є критично важливим для реалізації адаптивних алгоритмів керування та мінімізації питомих витрат енергії.

Мета: Підвищення ефективності управління мікрокліматом у камерах сушки рослин шляхом розробки та впровадження автоматизованої системи з мобільним робототехнічним модулем, що працює на основі безконтактної передачі енергії.

Об'єкт: Об'єктом дослідження є технологічний процес керування параметрами мікроклімату в камерах сушки рослинної сировини.

Предмет: Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматизації контролю та регулювання середовища на основі мобільної робототехнічної системи з індуктивним живленням.

Методи дослідження: Для розв'язання поставлених задач використовуються методи теорії автоматичного керування (ТАК), математичне моделювання на базі диференціальних рівнянь тепломасообміну, теорія електромагнітного поля (для розрахунку IPT-контурів), методи об'єктно-орієнтованого програмування для PLC та проектування мехатронних систем.

Постановка задачі:

1. Аналіз технічної і патентної інформації та сучасних технологій:
 - Провести огляд патентів на конструкції підвісних робототехнічних систем та методів безконтактного енергозабезпечення (IPT).
 - Виконати порівняльний аналіз існуючих методів автоматизованого сушіння (стаціонарні АСК vs мобільні РТС із безперервним живленням).
2. Розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА):
 - Спроекувати структуру взаємодії центрального контролера (PLC) з високочастотним інвертором живлення та мобільним роботом.
 - Визначити контури регулювання мікроклімату з урахуванням безперервного потоку даних від мобільного модуля.
3. Дослідження та обґрунтування сенсорної мережі:
 - Проаналізувати та вибрати заводостійкі цифрові датчики, здатні функціонувати в умовах електромагнітного поля IPT-системи.

- Визначити необхідні датчики для позиціонування та безпечного руху робота вздовж монорейки.
4. Математичне моделювання та розробка алгоритмів:
- Сформувати математичну модель тепло- та вологообміну в камері сушки.
 - Розробити математичну модель передачі енергії в системі «первинний кабель — приймальна котушка» для забезпечення стабільної роботи бортової електроніки.
5. Програмна реалізація системи керування:
- Розробити прикладне програмне забезпечення для реалізації прецизійного PID-регулювання на основі динамічної "теплової карти".
 - Створити НМІ-інтерфейс для візуалізації процесу сушіння та діагностики стану ІРТ-системи.
6. Аналіз техніко-економічної ефективності та безпеки:
- Дослідити вплив безперервного моніторингу на енергоефективність процесу.
 - Оцінити електромагнітну сумісність компонентів та розробити заходи з охорони праці при роботі з обладнанням високої частоти.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЦП** — аналого-цифровий перетворювач
- АКБ** — акумуляторна батарея
- АСК** — автоматизована система керування
- ЕРС** — електрорушійна сила
- ККД** — коефіцієнт корисної дії
- НАУ** — нагрівальний апарат/елемент усередненої камери (в контексті теплофізичних моделей)
- ПЗВ** — пристрій захисного відключення
- ПЛК (PLC)** — промисловий логічний контролер (Programmable Logic Controller)
- РТС** — робототехнічна система
- ЧМІ (НМІ)** — людино-машинний інтерфейс (Human-Machine Interface)
- ЕМС (Electromagnetic Compatibility)** — електромагнітна сумісність (ЕМС)
- ЕМІ (Electromagnetic Interference)** — електромагнітна завада
- ІРТ (Inductive Power Transfer)** — індуктивна (безконтактна) передача енергії
- ЛСС** — індуктивно-ємнісна топологія резонансної компенсації (котушка-конденсатор-конденсатор)
- РІД (ПІД)** — пропорційно-інтегрально-диференціальний (тип алгоритму регулювання)
- SoC (State of Charge)** — рівень заряду акумуляторної батареї

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПАТЕНТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Сучасний стан та проблеми автоматизації процесів сушіння рослинної сировини

Технологічний процес сушіння рослинної сировини є одним із найбільш енергоємних та складних етапів переробки в агропромисловому комплексі. Основною метою автоматизації даного процесу є забезпечення високої якості кінцевого продукту шляхом точного підтримання температурно-вологісних режимів при мінімальних витратах енергоресурсів [1].

На сучасному етапі більшість промислових камер сушіння оснащені автоматизованими системами керування (АСК), побудованими на базі промислових логічних контролерів (ПЛК). Типова структура такої системи передбачає збір даних від стаціонарно встановлених первинних вимірювальних перетворювачів температури та відносної вологості повітря. Проте аналіз експлуатації таких систем виявляє суттєві технічні недоліки, пов'язані з нерівномірністю розподілу параметрів мікроклімату в об'ємі камери.

Оскільки датчики фіксуються в обмеженій кількості точок (зазвичай на стінах камери або в зоні подачі теплоносія), система не здатна оперативно реагувати на зміни стану сировини в центральних зонах або в товщі шару. Це призводить до виникнення значних температурних градієнтів та утворення зон застою вологи, як показано на рисунку 1.1.

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
 інноваційних засобів

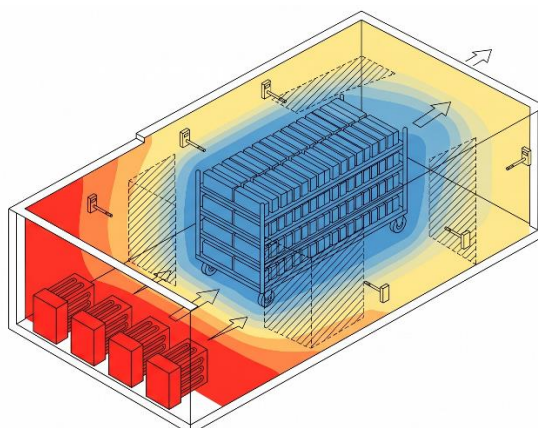


Рисунок 1.1 – Схема розподілу зон нерівномірності параметрів середовища в камері сушіння

Нерівномірність сушіння спричиняє деградацію термічно лабільних сполук у рослинах, що знижує їхню фармакологічну або поживну цінність. Стационарні АСК ТП, попри високий рівень автоматизації окремих вузлів, мають обмежені можливості адаптації до динамічної зміни характеристик об'єкта. Порівняльні характеристики існуючих підходів до автоматизації наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики існуючих систем автоматизації процесів сушіння

Показник порівняння	Системи з ручним керуванням	Стационарні АСК	Робототехнічні системи моніторингу
Точність контролю параметрів	Низька	Середня	Висока
Гнучкість налаштування режимів	Мінімальна	Обмежена	Повна

Охоплення об'єму камери	Дискретне	Часткове	Суцільне (динамічне)
Вплив людського фактора	Високий	Середній	Мінімальний

Проблема інерційності вимірювань та наявності «сліпих зон» може бути вирішена шляхом впровадження мобільної робототехнічної системи (РТС), що здійснює траєкторне сканування робочого простору. Проте, експлуатація мобільних модулів усередині сушильних камер пов'язана з агресивним середовищем (висока температура та вологість до 95%). Використання традиційних акумуляторів є недоцільним через обмежений ресурс та необхідність простоїв на зарядку, а контактні тролєї створюють ризик іскроутворення та пожежі [2].

Отже, для створення інноваційної АСК виникає потреба в обґрунтуванні безконтактного методу енергопостачання, що забезпечить безперервність роботи РТС в герметичному виконанні, виключаючи механічний знос контактів.

1.2. Дослідження фізико-технічних характеристик об'єкта сушіння та вимог до режимів мікроклімату

Об'єктом автоматизованого керування у даному дослідженні виступає процес видалення вологи з рослинної сировини, яка за своєю фізичною природою є складним капілярно-пористим колоїдним тілом. Для проектування ефективної АСК необхідно враховувати специфічні властивості різних груп рослин (лікарські трави, зернові культури, ефіроолійні рослини), так як кожна з них має індивідуальні обмеження щодо термолабільності – чутливості біологічно активних речовин до теплового впливу.

Фізико-технічні характеристики сировини визначають динаміку вологовіддачі. Початкова вологість свіжозібраних рослин може сягати 60–85%, тоді як кінцева вологість для тривалого зберігання повинна становити 8–14%. Процес сушіння характеризується трьома основними формами зв'язку вологи з матеріалом: хімічною, фізико-хімічною (адсорбційною та осмотичною) та механічною. Найбільш енергоємним є видалення адсорбційної вологи на фінальних етапах сушіння. Кінетика процесу сушіння та типові зміни параметрів стану сировини в часі наведені на рисунку 1.2.

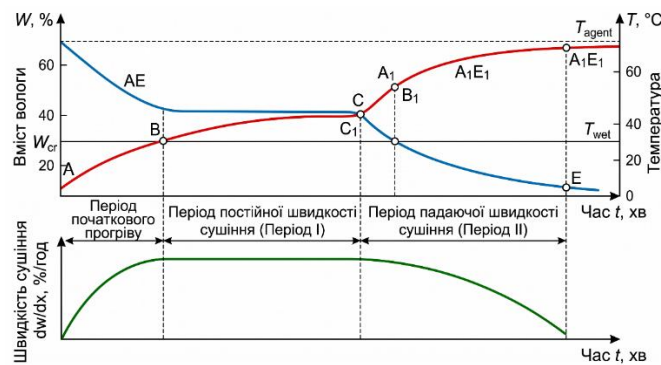


Рисунок 1.2 – Криві кінетики сушіння та зміна температури рослинної сировини

На наведеній візуалізації представлено комплексний аналіз процесу конвективного сушіння у часовому вимірі (t , min). Схема синхронізує зміну параметрів стану матеріалу (верхній графік) зі швидкістю видалення вологи (нижній графік).

Ключові технічні аспекти, відображені на схемі:

Верхній графік:

- Крива АЕ ($W, \%$): Крива вологості матеріалу. Показує нелінійне (близьке до експоненціального) зниження вологості від початкового значення А до рівноважного Е. Виражена лінійна ділянка ВС відповідає періоду сталої швидкості.
- Крива А1Е1 ($T, ^\circ C$): Крива температури сировини. Процес починається з прогріву (А1), потім стабілізується на ділянці В1С1 на рівні температури мокрого термометра (T_{wet}), що критично важливо для збереження термолабільних компонентів. Після критичної точки С температура стрімко зростає до температури сушильного агента (T_{agent}), що створює ризик перегріву.

Нижній графік :

- Крива швидкості сушіння (dw/dt): Ця крива є графічним диференціалом кривої вологості.
- Період прогріву: Швидкість зростає до максимуму.
- Період I (стала швидкість): Горизонтальна ділянка, де швидкість максимальна та постійна. Видаляється вільна волога з поверхні.
- Період II (падаюча швидкість): Після критичної точки С швидкість різко падає. Це фаза видалення зв'язаної вологи, де швидкість лімітується внутрішньою дифузією.

Основними параметрами мікроклімату, якими має оперувати система управління, є температура повітря, його відносна вологість та швидкість руху теплоносія через шар продукту. Перевищення допустимої температури

призводить до окислення ефірних олій та руйнування вітамінів, що нівелює цінність продукту. Технологічні вимоги до параметрів мікроклімату для різних груп рослинної сировини представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Оптимальні режими мікроклімату для камер сушки

Група сировини	Приклади рослин	Макс. допустима темп., °С	Кінцева вологість, %	Рекомендована швидкість повітря, м/с
Ефіроолійна сировина	М'ята, лаванда, чебрець	30 – 35	10 – 12	0,2 – 0,5
Трав'яниста сировина	Кропива, шавлія, полин	40 – 50	12 – 14	0,5 – 0,8
Плоди та ягоди	Шипшина, горобина	60 – 70	14 – 16	1,0 – 1,5
Зернові культури	Пшениця, кукурудза	45 – 55	13 – 14	2,0 – 4,0

Дослідження показують, що для забезпечення рівномірності сушіння в камері необхідно підтримувати вологість теплоносія на рівні, що забезпечує необхідний градієнт вологопереносу. Використання мобільної РТС дозволяє реалізувати стратегію «м'якого сушіння», коли інтенсивність нагріву коригується в реальному часі залежно від поточної вологості найменш просушених зон, виявлених роботом під час сканування [3]. Таким чином, мікроклімат стає адаптивним до поточної фази сушіння, що мінімізує термічне напруження всередині рослинної тканини.

1.3. Порівняльний аналіз систем енергозабезпечення мобільних робототехнічних комплексів

Енергозабезпечення мобільного робототехнічного комплексу (РТС) є одним із ключових чинників, що визначають надійність, автономність та точність функціонування всієї АСК у процесі сушіння. Для специфічних умов сушильних камер, де спостерігаються підвищена вологість (до 95 %), робоча температура (до 70 °С) та висока концентрація органічного пилу, вибір методу передачі електроенергії до рухомого модуля стає складним інженерним завданням.

Ефективність системи енергопостачання безпосередньо впливає на можливість реалізації безперервного траєкторного моніторингу. Будь-які обмеження, пов'язані з необхідністю зупинок для відновлення енергетичного ресурсу або нестабільністю електричного контакту, вносять похибки у формування динамічної «теплової карти» об'єкта сушіння. Це, в свою чергу, знижує ефективність роботи алгоритмів адаптивного керування мікрокліматом.

В цілому, тут порівняльний аналіз трьох основних архітектурних підходів до електрозабезпечення рухомих систем: автономних акумуляторних блоків, контактних тролейних ліній та систем індуктивної передачі енергії (ІРТ). Оцінка кожного методу здійснюється за критеріями надійності, пожежобезпечності та здатності до стабільної роботи в агресивному середовищі сушильної камери [4].

Акумуляторні системи є стандартним рішенням для забезпечення енергетичної автономності мобільних робототехнічних комплексів. У промисловій автоматизації найчастіше застосовуються літій-іонні (Li-ion) та

літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) накопичувачі через їхню високу питому енергоємність та здатність віддавати великі струми для приводів руху.

Експлуатація РТС у камерах сушки передбачає постійний вплив температур у діапазоні від 40 °С до 70 °С. Підвищена температура інтенсифікує деградацію активних матеріалів електродів та прискорює зростання внутрішнього опору акумулятора. Це призводить до стрімкого зниження ємності та скорочення життєвого циклу накопичувача. Залежність терміну служби акумулятора від робочої температури представлена на рис. 1.3.

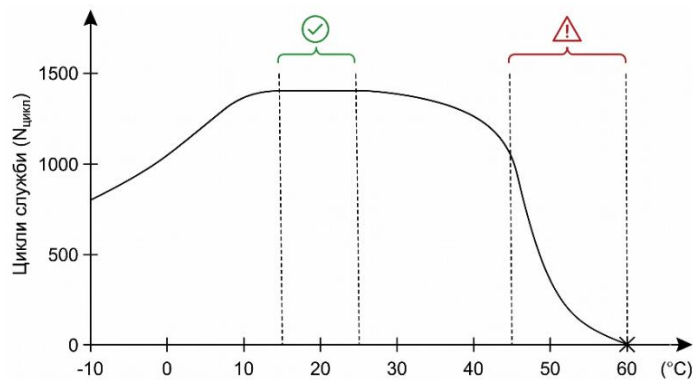


Рисунок 1.3 – Залежність ресурсу акумуляторних елементів від температури експлуатації

З точки зору архітектури АСК, використання акумуляторів накладає обмеження на логіку функціонування системи. Для забезпечення безперебійної роботи необхідно впроваджувати складні алгоритми моніторингу стану заряду (State of Charge – SoC) та передбачати автоматизовані зони підзарядки. Порівняльні характеристики акумуляторних систем за різних умов наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Вплив умов сушильної камери на характеристики акумуляторних систем

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
 інноваційних засобів

Параметр	Умови (Т = 20 °С)	Умови (Т = 60 °С, вологість 85%)	Наслідки для РТС
Саморозряд (% на місяць)	2–3	10–15	Втрата енергії під час простою
Ефективність заряду	95–98%	< 85%	Перегрів при зарядці
Ризик термічного розгону	Мінімальний	Високий	Загроза пожежі в камері
Термін служби (циклів)	2000–3000	500–800	Необхідність частої заміни АКБ

Загалом, використання акумуляторних систем у камерах сушіння рослин призводить до зниження загальної надійності АСК та підвищення експлуатаційних витрат через швидку втрату ресурсу накопичувачів та інерційність моніторингу.

Щодо тролейних систем енергопостачання, вони є класичним рішенням для живлення рухомих промислових об'єктів, таких як мостові крани та підвісні конвеєрні лінії. Принцип їх роботи базується на безпосередньому механічному контакті між нерухомими струмопровідними шинами (тролеями) та ковзними, або роликowymi струмознімачами, встановленими на борту мобільного робота. Але аналіз експлуатації таких систем у специфічних

умовах камер сушки рослинної сировини вказує на наявність критичних технічних та безпекових ризиків.

Основним технічним ризиком є інтенсивне окислення контактних поверхонь. У камерах сушки підтримується високий рівень відносної вологості (до 95 % на початкових етапах циклу), що в поєднанні з підвищеною температурою (40–70 °С) створює агресивне середовище. Окислення мідних або алюмінієвих шин призводить до різкого зростання перехідного опору в зоні контакту, що спричиняє нестабільність напруги живлення бортового ПЛК та помилки в роботі цифрових інтерфейсів зв'язку.

Найбільш вагомим фактором, що обмежує застосування тролейних ліній, є низький рівень пожежної безпеки. Під час переміщення робота по монорейці неминуче виникає мікроіскріння між шиною та щіткою струмознімача через мікронерівності поверхонь та вібрації. В умовах сушильної камери, де в повітрі присутня дрібнодисперсна фракція сухого рослинного пилу, такі іскри можуть стати джерелом займання, або детонації пилоповітряної суміші.

Експлуатаційні недоліки контактних систем, виявлені в ході дослідження, систематизовані та наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Аналіз технічних ризиків експлуатації тролейних систем у камерах сушки

Фактор впливу	Технічний наслідок	Вплив на систему автоматизації
Висока вологість	Електрохімічна корозія шин	Нестабільність живлення контролера
Рослинний пил	Забруднення контактних груп	Збільшення енерговтрат на нагрів
Механічне тертя	Знос графітових щіток	Необхідність частих регламентних робіт
Іскроутворення	Електромагнітні завади	Збої в передачі даних датчиків
Теплове розширення	Деформація напрямних	Ризик заклинювання приводу руху

Як показано в таблиці 1.4, контактний метод передачі енергії вимагає постійного технічного обслуговування, що складно реалізувати всередині герметичних камер сушки без порушення технологічного циклу. Більше того, ризик виникнення пожежі при сушінні легкозаймистої сировини (наприклад, суцвіть чи листя) робить тролейні системи неприпустимими для використання в інноваційних АСК [6].

Таким чином, для забезпечення безперервного моніторингу та високого рівня промислової безпеки необхідним є перехід до безконтактних методів енергопостачання, які повністю виключають механічне тертя та іскріння.

Технологія індуктивної передачі енергії (Inductive Power Transfer – IPT) базується на принципі електромагнітного зв'язку між двома гальванічно розв'язаними контурами. Для мобільної РТС, що функціонує в агресивному

середовищі сушильної камери, дана система є найбільш технічно досконалим рішенням, оскільки вона дозволяє повністю відокремити силову мережу від рухомого модуля, забезпечуючи безперервний режим роботи та високий рівень промислової безпеки.

Основними компонентами системи ІРТ є високочастотний інвертор, що живить первинний контур (Litz-кабель), прокладений вздовж монорейки, та вторинний контур (пікап), встановлений на борту робота. Передача енергії відбувається за рахунок змінного магнітного поля високої частоти (20–25 кГц). Проте використання потужних електромагнітних полів висуває особливі вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС). Оскільки змінне поле здатне наводити паразитарну ЕРС у сигнальних лініях, проектування РТС потребує застосування засобів екранування та диференціальної передачі сигналів для захисту чутливих датчиків вологості та температури. Структурна схема системи з урахуванням контурів захисту наведена на рисунку 1.4.

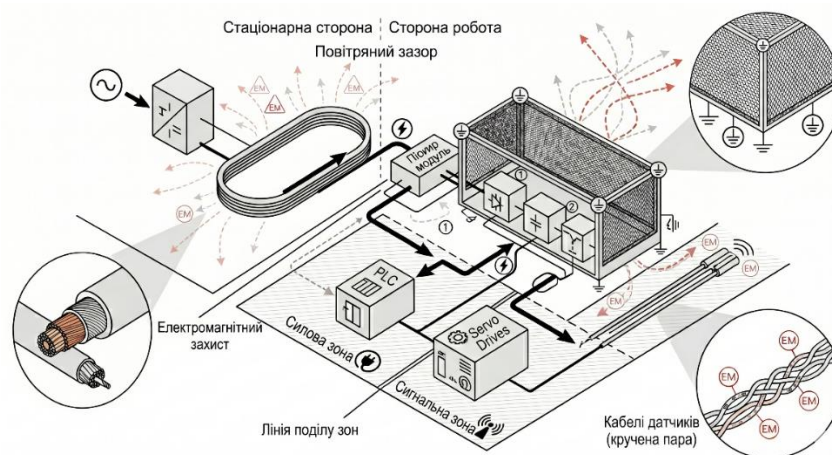


Рисунок 1.4 – Структурна схема ІРТ-системи з елементами електромагнітного захисту

Застосування ІРТ дозволяє нівелювати головний недолік акумуляторних систем – обмежену тривалість роботи. Завдяки безперервному надходженню

енергії РТС може здійснювати сканування камери в режимі 24/7, що дозволяє будувати прецизійні динамічні «теплові карти». Разом із тим, вибір ІРТ зумовлює перехід від стандартних інтерфейсів (наприклад, I2C або аналогових сигналів) до завадостійких протоколів передачі даних (RS-485/Modbus), що забезпечує стабільність АСК в умовах інтенсивних полів. Технічні характеристики та особливості впровадження ІРТ порівняно з традиційними методами наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльний аналіз технічних переваг та викликів впровадження ІРТ

Технічний показник	Перевага ІРТ для АСК ТП	Технічний виклик (ЕМІ фактор)
Відсутність контактів	Повна іскробезпека та захист від корозії	Наявність магнітних завад (20–25 кГц)
Ступінь захисту (IP67)	Робота при вологості до 95 % без збоїв	Необхідність екранування борт-контролера
Безперервність роботи	Моніторинг 24/7 без зупинок на зарядку	Потреба у завадостійких протоколах (RS-485)
Гальванічна розв'язка	Високий рівень електробезпеки персоналу	Застосування фільтрів на лініях живлення
Маса модуля	Зменшення ваги за рахунок відсутності АКБ	Складність проектування антенної частини

Дані таблиці 1.5 підтверджують, що попри необхідність вирішення задач електромагнітної сумісності, індуктивна передача енергії є єдиним методом, що забезпечує необхідну надійність для інноваційних систем сушіння.

Підсумовуючи результати аналітичного огляду, можна стверджувати, що перехід від стаціонарних АСК до мобільних робототехнічних комплексів моніторингу є об'єктивною необхідністю для досягнення прецизійної якості сушіння термолабільної рослинної сировини. Проведений порівняльний аналіз архітектур енергозабезпечення дозволив ідентифікувати системи індуктивної передачі енергії (ІРТ) як єдино можливе технічне рішення, що одночасно задовольняє вимогам повної іскробезпеки, герметичності виконання (ІР67) та безперервності технологічного циклу моніторингу 24/7.

Вибір даної технології, попри виклики у сфері електромагнітної сумісності (ЕМС) та необхідність впровадження завадостійких диференціальних інтерфейсів передачі даних, створює фундаментальну базу для реалізації динамічного 3D-картування параметрів мікроклімату. Це, в свою чергу, дозволяє відійти від інерційних статичних моделей керування на користь адаптивних алгоритмів, що базуються на реальному розподілі вологості в об'ємі камери. Загалом, результати аналізу фізико-технічних характеристик об'єкта та існуючих засобів автоматизації формують технічний базис для подальшого математичного моделювання електромагнітних контурів системи ІРТ та розробки функціональної структури АСК .

1.4. Огляд та аналіз інноваційних методів безконтактної передачі енергії (ІРТ) для промислових систем.

Технологія індуктивної передачі енергії на сучасному етапі розвитку промислової автоматизації розглядається як найбільш ефективна альтернатива дротовим та контактним системам живлення рухомих об'єктів. В основі ІРТ лежить явище змінного магнітного зв'язку між двома резонансними контурами, що дозволяє передавати електричну потужність через повітряний зазор без механічного контакту. Для систем, що функціонують у складі мобільних робототехнічних комплексів, вибір архітектури ІРТ визначає енергетичну ефективність та завадостійкість всієї АСК.

За конструктивним виконанням первинного контуру системи ІРТ поділяються на точкові (Point-to-Point) та лінійні (Track-based). У контексті розробки автоматизованої системи для камер сушки, де робот має безперервно переміщуватися вздовж монорейки, найбільш доцільним є використання лінійної архітектури. В такій системі первинний провідник утворює довгу петлю (трек), що охоплює всю траєкторію руху, а вторинний модуль (пікап) знімає енергію в будь-якій точці маршруту.

Ключовим фактором інноваційності сучасних ІРТ-систем є використання резонансних топологій компенсації, які дозволяють нівелювати вплив індуктивності розсіювання та забезпечити високий коефіцієнт потужності. Найбільш поширені топології та їхні характеристики наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Порівняльний аналіз топологій резонансної компенсації ІРТ-систем

Топологія	Тип з'єднання (первинне/вторинне)	Стабільність вихідної напруги	Чутливість до зміни зазору	Сфера застосування
SS (Series-Series)	Послідовне / Послідовне	Висока при резонансі	Низька	Малопотужні РТС
SP (Series-Parallel)	Послідовне / Паралельне	Залежить від навантаження	Середня	Зарядні станції АКБ
LCC	Комбіноване (індуктивно-ємнісне)	Максимальна стабільність	Мінімальна	Потужні промислові РТС

Технічні дані, наведені в таблиці 1.6, вказують на те, що для мобільних РТС, де повітряний зазор може коливатися через вібрації монорейки, топологія LCC або SS є пріоритетною, оскільки вона забезпечує стабільність параметрів живлення борт-контролера.

Для підвищення ефективності передачі енергії в інноваційних ІРТ-системах використовується феритове екранування та спеціальні конфігурації котушок (наприклад, DD-катушки), що дозволяють концентрувати магнітний потік у робочому зазорі.

Важливим аспектом аналізу є частотний діапазон роботи системи. Сучасні промислові ІРТ-системи працюють на частотах 20–85 кГц. Вибір вищої частоти дозволяє зменшити габарити приймального модуля, проте збільшує втрати у міді через скін-ефект та вимагає використання спеціального дроту – літцендрату [8].

В цілому, аналіз інноваційних методів ІРТ показує, що поєднання лінійної архітектури треку з резонансною компенсацією типу LCC та

інтелектуальним керуванням інвертором дозволяє створити надійну енергетичну основу для мобільної РТС у камерах сушки. Це забезпечує повну гальванічну розв'язку та відсутність зносу контактних частин, що є критично важливим для довгострокової експлуатації в агресивних середовищах.

1.5. Патентний огляд підвісних робототехнічних систем моніторингу та засобів безконтактного живлення

Патентний аналіз є критично важливим етапом розробки інноваційної АСК, оскільки він дозволяє визначити технологічні межі (State of the Art) у сфері підвісної робототехніки та безконтактного енергозабезпечення. Дослідження світових патентних фондів (USPTO, EPO, Укрпатент) свідчить про активну розробку систем, що поєднують мобільність із високим ступенем захисту від агресивних середовищ. Для обґрунтування технічних рішень у межах даної роботи було проведено детальний розбір ключових патентів.

Першим значущим рішенням є патент компанії Conductix-Wampfler (US 9,120,401 B2), що описує систему індуктивного живлення із сегментованим треком [10]. Автори пропонують розділити первинний провідник на окремі ділянки, які активуються лише при знаходженні над ними приймального модуля робота. Це дозволяє радикально знизити втрати енергії в довгих лініях та мінімізувати рівень електромагнітних завад вздовж монорейки. Для камер сушки рослин це рішення є перспективним, оскільки дозволяє локалізувати магнітне поле лише в зоні проведення замірів.

Другим об'єктом аналізу є патент корпорації Daifuku Co., Ltd. (EP 2,348,599 B1), присвячений інтеграції IPT-каналів безпосередньо в конструкцію несучого алюмінієвого профілю [11]. У даній розробці шинопровід виконує роль не тільки напрямної для коліс робота, але й екрану

для індуктивних кабелів. Таке компонування забезпечує фіксований повітряний зазор між контурами навіть при високих швидкостях переміщення, що гарантує стабільність напруги живлення бортової вимірювальної системи.

У патенті компанії Siemens AG (US 10,543,755 B2) розглядається метод адаптивного керування резонансною частотою інвертора для компенсації температурних деформацій [12]. Так як в камерах сушіння спостерігаються значні температурні коливання (до 70 °C), геометричні параметри первинної петлі та індуктивність системи можуть змінюватися. Алгоритм Siemens автоматично підлаштовує частоту генерації, що дозволяє підтримувати максимальний ККД передачі енергії незалежно від теплового розширення компонентів системи.

Окрему увагу заслуговує вітчизняний патент UA 134560 (Укрпатент), який описує мобільну систему моніторингу параметрів газового середовища [13]. Розробка пропонує унікальну конструкцію підвісної голови з виносними сенсорами на пантографі, що дозволяє проводити заміри безпосередньо в товщі сировини. Комбінація такого механічного підходу з безконтактним живленням дозволяє усунути обмеження щодо автономності датчиків та реалізувати концепцію динамічного 3D- картування.

Завершує огляд патент компанії Vahle KG (EP 3,121,918 B1), що стосується системи високочастотної стабілізації живлення та екранування гармонік у приймальному модулі [14]. Використання багаточарових феритових екранів у конструкції пікапа дозволяє локалізувати магнітний потік виключно в межах перетворювача енергії. Це рішення є критично важливим для нашої роботи, оскільки забезпечує захист чутливих датчиків вологості від електромагнітних наведень. Порівняльний аналіз патентних рішень наведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Порівняльний аналіз патентних рішень у сфері ІРТ та РТС

Заявник / Номер	Ключове рішення	Перевага для камер сушки
Conductix-Wampfler / US 9,120,401	Сегментація треку	Мінімізація ЕМІ-завад
Daifuku Co. / EP 2,348,599	Інтегрований профіль	Стійкість до вібрацій монорейки
Siemens AG / US 10,543,755	Частотна адаптація	Стабільність при T = 70 °C
НТУУ "КПІ" / UA 134560	Пантограф датчиків	Глибоке сканування сировини
Vahle KG / EP 3,121,918	Феритове екранування	Захист вимірювальних каналів

Узагальнення результатів патентного огляду дозволяє стверджувати, що найбільш перспективним технічним рішенням для реалізації системи моніторингу в камерах сушіння є поєднання лінійної індуктивної передачі енергії з резонансною компенсацією та багаторівневим екрануванням вимірювальних вузлів. Аналіз світового досвіду (зокрема рішень від Conductix-Wampfler та Siemens AG) вказує на те, що для досягнення стабільності живлення в умовах значних температурних коливань (40–50 °C від номіналу) необхідно впроваджувати алгоритми частотної адаптації та сегментації треку.

Водночас, вітчизняний досвід (патент UA 134560) підкреслює важливість механічної адаптивності сенсорного блоку, що в комбінації з безконтактним живленням дозволяє реалізувати концепцію «динамічного

щупа» для глибокого сканування масиву рослинної сировини. Таким чином, виявлені у патентах методи феритового захисту (відповідно до рішень Vahle KG) та інтегровані конструкції монорейок стають основою для формування технічних вимог до проектованої РТС. Це підтверджує, що обраний напрямок розробки, який базується на поєднанні мобільного траєкторного сканування та ІРТ-технології, відповідає сучасному рівню розвитку світової техніки та має потенціал для впровадження у реальний сектор агропромислового комплексу [9].

1.6. Обґрунтування структури системи на базі монорейкового робота з індуктивним каналом передачі енергії

На основі проведеного аналізу технологічних особливостей камер сушіння та порівняння методів енергозабезпечення, можна сформувати оптимальну структуру автоматизованої системи. Вибір монорейкової компоновки зумовлений необхідністю стабілізації повітряного зазору між компонентами системи індуктивної передачі енергії, що є критичним для підтримання високого ККД. Структура системи базується на розподілі функцій між стаціонарною інфраструктурою камери та мобільним вимірювальним модулем.

Запропонована архітектура системи включає три основні підсистеми:

1. Стаціонарна підсистема генерації енергії: включає промисловий мережевий випрямляч та високочастотний інвертор, що живить первинний контур. Первинний контур виконується у вигляді петлі спеціального літцендрату, прокладеного вздовж монорейки. Така конфігурація забезпечує стабільне магнітне поле по всій траєкторії руху робота.

2. Мобільна підсистема моніторингу та руху: бортовий модуль, що складається з приймальної котушки (пікапа) з феритовим сердечником, блоку вторинної компенсації та випрямлення. Отримана енергія живить бортовий ПЛК, приводи руху та вимірювальний комплекс із датчиками температури й вологості.
3. Інформаційна підсистема: забезпечує передачу даних від мобільного модуля до центрального сервера АСК ТП через заводостійкий канал зв'язку (наприклад, промисловий Wi-Fi чи передачу даних по силовій лінії – PLC), що інтегрується з логікою керування сушінням.

Функціональна схема взаємодії компонентів системи представлена на рисунку 1.5.

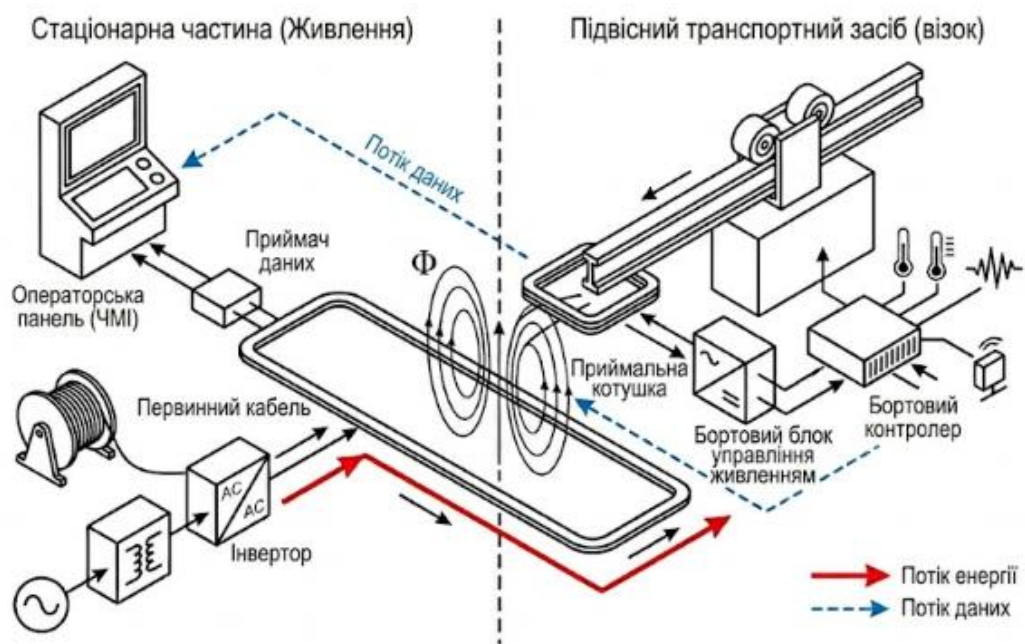


Рисунок 1.5 – Функціональна структура системи моніторингу з індуктивним живленням

На рисунку 1.5 зображено взаємозв'язок між стаціонарною частиною та рухомою платформою. Схема демонструє потік енергії від мережі через

інвертор до первинного кабелю, а також зворотний потік даних від датчиків робота до операторської панелі. Особливу увагу приділено вузлу безконтактного зв'язку, де магнітне поле Φ поєднує стаціонарну та мобільну частини системи.

Обґрунтування такої структури базується на принципі модульності. Це дозволяє масштабувати систему для камер різної довжини шляхом простого подовження монорейки та первинного кабелю без зміни конструкції самого робота. Використання індуктивного каналу дозволяє повністю герметизувати корпус робота, що захищає електроніку від циклічного впливу вологого та гарячого повітря.

Крім того, запропонована структура дозволяє впровадити алгоритми «інтелектуального сканування». Замість простого переміщення від точки А до точки Б, робот може змінювати швидкість, або зупинятися в зонах із аномальними показниками вологості для детальнішого аналізу, не обмежуючись ресурсом акумулятора. Це забезпечує перехід від регламентного до адаптивного керування процесом сушіння, що значно знижує питомі витрати енергії на одиницю готової продукції [15].

1.7. Перспективи та стратегія впровадження інноваційних систем моніторингу в цифровізоване виробництво

Сучасний вектор розвитку агропромислового комплексу спрямований на повну цифровізацію та створення «розумних» підприємств (Smart Factories). Впровадження мобільного монорейкового робота з індуктивним живленням у процес сушіння є не просто технічним покращенням, а стратегічним кроком до побудови автономного виробництва.

Можна виділити три основні напрямки «майбутнього», які відкриває дана розробка:

1. Створення «Цифрових двійників»: Завдяки безперервному надходженню даних від ІРТ-робота, стає можливим створення динамічної 3D-моделі сушильної камери в реальному часі. Це дозволяє не просто реагувати на зміни, а прогнозувати поведінку сировини на основі ретроспективних даних та алгоритмів машинного навчання (Machine Learning).
2. Масштабованість та інтелектуальні рої: Архітектура системи дозволяє в майбутньому використовувати не одного робота, а групу (рій) мобільних модулів, що взаємодіють між собою. Індуктивний канал живлення забезпечує можливість швидкої інтеграції нових одиниць у вже існуючу інфраструктуру камери без потреби в складних електромонтажних роботах.
3. Екологічність та енергоефективність: Використання адаптивних алгоритмів траєкторного сканування дозволяє виявляти «зони застою» або локального перегріву на ранніх стадіях. Це веде до оптимізації роботи вентиляторів, що значно знижує вуглецевий слід виробництва та підвищує загальну енергоефективність підприємства.

Реалізація цього бачення вимагає вирішення ряду науково-технічних проблем, що стають основою для подальшого дослідження в межах даної роботи. Зокрема, необхідно математично обґрунтувати параметри електромагнітної взаємодії в каналі ІРТ та розробити завадостійкі алгоритми

керування, які стануть фундаментом для майбутніх інтелектуальних систем автоматизації [16].

1.8. Постановка задачі

На основі проведеного аналізу технологічного процесу сушіння рослинної сировини, сучасних засобів автоматизації та перспектив використання мобільних робототехнічних систем з індуктивним живленням сформульовано задачу розроблення автоматизованої системи управління мікрокліматом сушильної камери, здатної забезпечувати безперервний моніторинг і адаптивне регулювання температурно-вологісних параметрів у всьому робочому об'ємі камери.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити математичну модель сушильної камери як об'єкта керування, дослідити процес індуктивної передачі енергії між стаціонарною та мобільною частинами системи, а також виконати моделювання руху роботизованого моніторингового модуля по монорейковій трасі. Особливу увагу необхідно приділити розробці алгоритмів адаптивного керування мікрокліматом на основі даних безперервного сканування середовища.

У межах роботи необхідно обґрунтувати вибір апаратної бази системи, розробити функціональну структуру автоматизованої системи керування, створити програмне забезпечення для реалізації PID-регулювання та бездротового обміну даними, а також розробити людино-машинний інтерфейс для візуалізації параметрів технологічного процесу.

Додатковим завданням є забезпечення електробезпеки, електромагнітної сумісності, пожежної безпеки та безпечної експлуатації обладнання в умовах підвищеної температури, вологості та наявності

рослинного пилу. Реалізація зазначених завдань повинна забезпечити підвищення ефективності процесу сушіння, покращення якості готової продукції та зниження енергетичних витрат порівняно з традиційними системами контролю мікроклімату.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз сучасних технологій сушіння рослинної сировини та досліджено особливості автоматизації процесів керування мікрокліматом у сушильних камерах. Встановлено, що традиційні системи контролю на основі стаціонарних датчиків не забезпечують повної інформації про розподіл температури та вологості в усьому об'ємі камери, що може негативно впливати на якість сушіння продукції.

Виконано аналіз фізико-технічних характеристик об'єкта сушіння та визначено основні вимоги до параметрів мікроклімату. Проведено порівняння існуючих систем енергозабезпечення мобільних робототехнічних комплексів, за результатами якого встановлено переваги індуктивної передачі енергії для роботи в умовах підвищеної температури, вологості та запиленості. Дослідження сучасних ІРТ-технологій і патентних рішень підтвердило доцільність використання безконтактного живлення мобільного моніторингового модуля.

Обґрунтовано структуру автоматизованої системи на базі монорейкового робота з індуктивним каналом передачі енергії, який забезпечує безперервний контроль параметрів середовища по всьому об'єму сушильної камери. Сформульовано постановку задачі дослідження, що передбачає математичне моделювання процесів керування, розробку

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
інноваційних засобів

апаратної та програмної частин системи, а також створення засобів моніторингу й забезпечення безпечної експлуатації обладнання.

Отримані результати є вихідною основою для подальшого моделювання теплообмінних процесів, індуктивної передачі енергії та розробки автоматизованої системи управління мікрокліматом сушильної камери.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ

2.1. Математична модель камери сушки як об'єкта керування з динамічними параметрами

Під час розроблення автоматизованої системи керування мікрокліматом камери сушки рослин важливо не лише підібрати датчики, виконавчі механізми та програмну логіку, а й описати саму сушильну камеру як об'єкт керування. Це потрібно для того, щоб система не працювала «всліпу», а могла прогнозовано реагувати на зміну температури, вологості, швидкості повітря та стану рослинної сировини. У практичному сенсі камера сушки розглядається як обмежений технологічний об'єм, в якому одночасно відбуваються нагрівання повітря, передача тепла до рослинної маси, випаровування вологи, переміщення повітря вентилятором і відведення вологого повітря через вентиляційний канал.

Для побудови математичної моделі приймається, що камера сушки має внутрішній об'єм $V_k = 12 \text{ м}^3$, маса завантаженої рослинної сировини становить $m_p = 80 \text{ кг}$, початкова вологість сировини дорівнює $W_0 = 65\%$, а кінцева технологічно допустима вологість після сушіння має становити приблизно $W_k = 12\%$. Температура повітря в камері підтримується в межах $35 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$, оскільки для багатьох видів лікарських і харчових рослин перевищення температури може призвести до втрати ефірних олій, зміни кольору, зниження біологічної цінності та погіршення товарної якості. Тому, основним завданням автоматизованої системи є не максимальне нагрівання, а стабільне підтримання керованого мікроклімату.

Мікроклімат сушильної камери в межах моделі описується сукупністю параметрів, які змінюються в часі та безпосередньо впливають на швидкість сушіння. Основними керованими параметрами є температура повітря в камері $T(t)$, відносна вологість повітря $\varphi(t)$, швидкість циркуляції повітря $v(t)$, вологовміст рослинної сировини $W(t)$, тепла потужність нагрівача $Ph(t)$ та продуктивність вентилятора $Qv(t)$. Всі ці параметри пов'язані між собою, тому зміна одного з них впливає на інші. Наприклад, збільшення потужності нагрівача підвищує температуру повітря, але одночасно знижує відносну вологість і прискорює випаровування вологи з рослинної маси. Збільшення швидкості вентиляції, навпаки, покращує відведення вологого повітря, але може збільшувати теплові втрати.

Температурний стан камери можна описати через відхилення фактичної температури від заданого значення. Якщо задана температура сушіння становить $T_{зад} = 40^{\circ}\text{C}$, а фактична температура в момент часу t дорівнює $T(t)$, тоді похибка регулювання визначається за формулою:

$$e_T(t) = T_{зад} - T(t),$$

де $e_T(t)$ – поточна похибка температури, $T_{зад}$ – задана температура сушіння, $T(t)$ – фактична температура в камері. Якщо, наприклад, датчик фіксує температуру 36°C , то похибка становитиме:

$$e_T(t) = 40 - 36 = 4^{\circ}\text{C}$$

Це означає, що система повинна збільшити потужність нагрівального елемента або зменшити інтенсивність вентиляції, щоб наблизити температуру до заданого значення. Якщо ж фактична температура перевищує задану, наприклад становить 43°C , то похибка буде від'ємною:

$$e_T(t) = 40 - 43 = -3^{\circ}\text{C}$$

В такому випадку автоматизована система повинна зменшити потужність нагрівача, або посилити повітрообмін.

Вологісний стан повітря в камері формалізується через відносну вологість $\varphi(t)$. Для процесу сушіння важливо, щоб повітря не було надмірно насиченим вологою, бо тоді воно втрачає здатність забирати воду з рослинної сировини. Задане значення відносної вологості можна прийняти на рівні $\varphi_{зад} = 35\%$. Тоді похибка вологості визначається за формулою:

$$e_{\varphi}(t) = \varphi(t) - \varphi_{зад}$$

Якщо фактична вологість у камері становить 52%, то:

$$e_{\varphi}(t) = 52 - 35 = 17\%$$

Це свідчить про необхідність активнішого видалення вологого повітря з камери. Практично це може бути реалізовано через збільшення швидкості вентилятора або частіше відкриття витяжного клапана. Якщо ж вологість занадто низька, процес сушіння може стати надто інтенсивним, що призведе до пересушування поверхневого шару рослинної сировини та утворення нерівномірного розподілу вологи всередині матеріалу.

Для оцінки стану рослинної сировини використовується показник поточної вологості $W(t)$, який показує, яка частка води залишається у продукті в конкретний момент часу. Зміна вологості сировини під час сушіння може бути подана у вигляді різниці між початковою та поточною масою вологи. Якщо початкова маса рослинної сировини становить 80кг, а початкова вологість дорівнює 65%, то маса води на початку процесу становить:

$$m_{w0} = m_p \cdot \frac{W_0}{100}$$

$$m_{w0} = 80 \cdot \frac{65}{100} = 52 \text{ кг}$$

Маса сухої речовини при цьому дорівнює:

$$m_c = m_p - m_{w0}$$

$$m_c = 80 - 52 = 28 \text{ кг}$$

Якщо кінцева вологість після сушіння має становити 12%, то кінцева маса продукту визначається з урахуванням того, що маса сухої речовини залишається сталою:

$$m_{\text{кін}} = \frac{m_c}{1 - \frac{W_k}{100}}$$

$$m_{\text{кін}} = \frac{28}{1 - 0,12} = 31,82 \text{ кг}$$

Тоді маса води, яку необхідно видалити з рослинної сировини, становитиме:

$$m_{\text{вид}} = m_p - m_{\text{кін}}$$

$$m_{\text{вид}} = 80 - 31,82 = 48,18 \text{ кг}$$

Отже, в процесі сушіння із завантаженої партії рослинної сировини потрібно видалити приблизно 48,18кг води. Це значення є важливим для подальшого розрахунку теплової енергії, тривалості сушіння та продуктивності вентиляційної системи.

Теплообмінні процеси в сушильній камері пов'язані з нагріванням повітря, передачею тепла до рослинної сировини, випаровуванням води та втратами тепла через стінки камери. Для практичного моделювання сушильну камеру можна подати як об'єкт із зосередженими параметрами, в якому температура повітря в робочому об'ємі вважається усередненою. Такий підхід зручний для подальшої реалізації алгоритму керування, оскільки система отримує дані з датчиків температури та вологості, обробляє їх і змінює потужність нагрівача, або режим роботи вентилятора.

Основне рівняння теплового балансу камери можна записати у вигляді:

$$C_{\Sigma} \frac{dT(t)}{dt} = P_h(t) - Q_{\text{втр}}(t) - Q_{\text{вип}}(t) - Q_{\text{вент}}(t)$$

де C_{Σ} – сумарна теплоємність повітря, рослинної сировини та конструктивних елементів камери, $P_h(t)$ – теплова потужність нагрівача, $Q_{\text{втр}}(t)$ – теплові втрати через огорожувальні конструкції, $Q_{\text{вип}}(t)$ – теплота, яка витрачається на випаровування вологи, $Q_{\text{вент}}(t)$ – теплота, що втрачається разом із відведеним повітрям.

Сумарна теплоємність системи визначається як сума теплоємності повітря в камері, рослинної сировини та внутрішніх конструктивних елементів:

$$C_{\Sigma} = m_{\text{нов}}c_{\text{нов}} + m_p c_p + m_k c_k$$

Для камери об'ємом 12м^3 маса повітря визначається за формулою:

$$m_{\text{нов}} = \rho_{\text{нов}} V_k$$

де $\rho_{\text{нов}} = 1,2\text{кг}/\text{м}^3$ – густина повітря. Тоді:

$$m_{\text{нов}} = 1,2 \cdot 12 = 14,4\text{кг}$$

Якщо питома теплоємність повітря $c_{\text{нов}} = 1005\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$, питома теплоємність рослинної маси приймається $c_p = 3200\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$, маса конструктивних елементів камери $m_k = 120\text{кг}$, а їх питома теплоємність $c_k = 500\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$, то сумарна теплоємність становитиме:

$$C_{\Sigma} = 14,4 \cdot 1005 + 80 \cdot 3200 + 120 \cdot 500$$

$$C_{\Sigma} = 14472 + 256000 + 60000 = 330472\text{Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Отримане значення показує, що для підвищення середньої температури системи на 1°C потрібно приблизно $330,5\text{кДж}$ теплової енергії. Якщо необхідно нагріти камеру з 20°C до 40°C , тобто на 20°C , то потрібна теплова енергія становитиме:

$$Q_{\text{нагр}} = C_{\Sigma} \Delta T$$

$$Q_{\text{нагр}} = 330472 \cdot 20 = 6609440\text{Дж} = 6,61\text{МДж}$$

Якщо використовується нагрівач потужністю $P_h = 3\text{кВт}$, то орієнтовний час початкового нагрівання без урахування втрат можна визначити за формулою:

$$t_{\text{нагр}} = \frac{Q_{\text{нагр}}}{P_h}$$

$$t_{\text{нагр}} = \frac{6609440}{3000} = 2203 \text{ с} \approx 36,7 \text{ хв}$$

В реальних умовах цей час буде більшим, оскільки частина тепла втрачається через стінки камери, вентиляцію та випаровування вологи. Тому, фактичний час виходу камери на робочий температурний режим можна прийняти на рівні 45–55 хвилин залежно від теплоізоляції, маси завантаження та початкової вологості рослинної сировини.

Теплові втрати через стінки камери описуються рівнянням:

$$Q_{\text{втр}} = kF(T - T_{\text{зовн}})$$

де k – коефіцієнт теплопередачі стінок, F – площа огорожувальних конструкцій, T – температура всередині камери, $T_{\text{зовн}}$ – температура зовнішнього середовища. Якщо площа поверхні камери становить $F = 24\text{м}^2$, коефіцієнт теплопередачі утепленої конструкції $k = 0,65 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, температура всередині камери 40°С , а температура зовні 20°С , то:

$$Q_{\text{втр}} = 0,65 \cdot 24 \cdot (40 - 20)$$

$$Q_{\text{втр}} = 312\text{Вт}$$

Це означає, що при різниці температур 20°С камера постійно втрачає близько 312Вт теплової потужності через стінки. Для нагрівача потужністю 3кВт такі втрати є помірними, але вони обов'язково повинні враховуватися в алгоритмі керування, особливо на етапі стабілізації температури.

Найбільша частина енергії під час сушіння витрачається не на нагрівання повітря, а на випаровування вологи з рослинної сировини.

Кількість теплоти, необхідна для випаровування води, визначається за формулою:

$$Q_{\text{вип}} = m_{\text{вюд}}r$$

де $m_{\text{вюд}}$ – маса вологи, яку потрібно видалити, r – питома теплота пароутворення води. Для практичних розрахунків можна прийняти $r = 2,26 \text{ МДж/кг}$. Тоді:

$$Q_{\text{вип}} = 48,18 \cdot 2,26 = 108,89 \text{ МДж}$$

Отже, лише на випаровування вологи потрібно приблизно 108,89 МДж теплової енергії. Якщо перевести це значення у кіловат-години, отримаємо:

$$E_{\text{вип}} = \frac{108,89}{3,6} = 30,25 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Цей розрахунок показує, що процес сушіння є досить енергоємним. Якщо нагрівач має потужність 3 кВт, то мінімальний час, необхідний тільки для випаровування вологи без урахування втрат, становитиме:

$$t_{\text{суш}} = \frac{30,25}{3} = 10,08 \text{ год}$$

З урахуванням теплових втрат, вентиляції, нерівномірності прогріву та зменшення швидкості сушіння наприкінці процесу фактична тривалість може становити приблизно 12–15 годин. Тому, автоматизована система повинна не просто підтримувати температуру, а забезпечувати оптимальне співвідношення між нагріванням, вентиляцією та видаленням вологи.

Для опису зміни вологості рослинної сировини в часі використовується експоненційна модель сушіння:

$$W(t) = W_{\text{рівн}} + (W_0 - W_{\text{рівн}})e^{-kt}$$

де $W(t)$ – поточна вологість сировини, W_0 – початкова вологість, $W_{\text{рівн}}$ – рівноважна вологість, k – коефіцієнт швидкості сушіння, t – час сушіння. Для

практичного розрахунку можна прийняти $W_0 = 65\%$, $W_{рівн}=8$, $k = 0,13\text{год}^{-1}$.
 Тоді, через 12 годин сушіння:

$$W(12) = 8 + (65 - 8)e^{-0,13 \cdot 12}$$

$$W(12) = 8 + 57e^{-1,56}$$

$$W(12) = 8 + 57 \cdot 0,210 = 19,97\%$$

Через 15 годин:

$$W(15) = 8 + 57e^{-0,13 \cdot 15}$$

$$W(15) = 8 + 57e^{-1,95}$$

$$W(15) = 8 + 57 \cdot 0,142 = 16,09\%$$

Як видно з розрахунку, при коефіцієнті сушіння $k = 0,13\text{год}^{-1}$ досягнення кінцевої вологості 12% потребує більшої тривалості, або підвищення ефективності повітрообміну. Для визначення часу досягнення заданої вологості можна перетворити формулу:

$$t = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{W_k - W_{рівн}}{W_0 - W_{рівн}} \right)$$

$$t = -\frac{1}{0,13} \ln \left(\frac{12 - 8}{65 - 8} \right)$$

$$t = -7,69 \ln(0,0702)$$

$$t = 20,4 \text{ год}$$

Отже, з таких умов сушіння до вологості 12% триватиме близько 20,4 години. Якщо за рахунок кращої циркуляції повітря, точнішого регулювання температури та рівномірного сканування середовища мобільним модулем підвищити коефіцієнт сушіння до $k = 0,18\text{год}^{-1}$, то тривалість процесу становитиме:

$$t = -\frac{1}{0,18} \ln(0,0702) = 14,7 \text{ год}$$

Загалом, автоматизоване керування мікрокліматом дозволяє не лише підтримувати задані параметри, а й скоротити тривалість технологічного циклу приблизно на 5,7 години, що є суттєвим результатом для виробничої сушильної камери.

Камера сушки як об'єкт керування має інерційний характер. Це означає, що після зміни потужності нагрівача температура в камері не змінюється миттєво, а поступово наближається до нового значення. Така поведінка пояснюється наявністю теплової інерції повітря, рослинної сировини, металевих конструкцій, полиць, стінок і самого нагрівального обладнання. Для системи автоматичного керування це дуже важливо, оскільки надто різке збільшення потужності нагрівача може спричинити перерегулювання, тобто перевищення температури понад допустиме значення.

Динамічну поведінку температури в камері можна наближено описати передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

де K – коефіцієнт підсилення об'єкта, T – стала часу камери, s – оператор Лапласа. Коефіцієнт підсилення показує, на скільки градусів змінюється температура при зміні потужності нагрівача на одиницю потужності. Якщо під час експериментального, або розрахункового аналізу встановлено, що збільшення потужності нагрівача на 1кВт забезпечує підвищення сталої температури приблизно на 7°C .

Стала часу визначає швидкість реакції камери. Якщо після ввімкнення нагрівача температура досягає приблизно 63% від свого кінцевого приросту за 18 хвилин, то:

$$T = 18\text{хв}$$

Тоді передавальна функція температурного каналу матиме вигляд:

$$G_T(s) = \frac{7}{18s + 1}$$

Це означає, що камера є повільним інерційним об'єктом, для якого недоцільно використовувати різкі керуючі дії. В практичній системі керування це враховується під час налаштування PID-регулятора. Пропорційна складова повинна бути достатньою для швидкої реакції на похибку, але не надмірною, щоб не спричиняти коливань температури. Інтегральна складова потрібна для усунення сталої похибки, а диференціальна – для пом'якшення реакції системи під час швидких змін температури.

Для вологості повітря динаміка є швидшою, ніж для температури, оскільки відносна вологість активно змінюється під впливом вентиляції та випаровування вологи з рослинної маси. Вологісний канал можна подати у вигляді:

$$G_\varphi(s) = \frac{K_\varphi}{T_\varphi s + 1}$$

Якщо збільшення продуктивності вентилятора на 10% знижує відносну вологість в камері приблизно на 5%, тоді коефіцієнт підсилення можна прийняти:

$$K_\varphi = -0,5$$

Від'ємний знак показує, що збільшення керуючого впливу вентилятора зменшує вологість. Якщо стала часу вологісного каналу становить $T_\varphi = 8\text{хв}$, то:

$$G_\varphi(s) = \frac{-0,5}{8s + 1}$$

Порівняння температурного та вологісного каналів показує, що вологість реагує швидше, ніж температура. Це створює певну складність для керування, оскільки одночасне регулювання нагрівача та вентилятора може

спричиняти взаємний вплив. Наприклад, посилення вентиляції зменшує вологість, але водночас може знижувати температуру через втрати теплого повітря. Тому, в автоматизованій системі доцільно застосовувати узгоджену логіку керування, за якої нагрівач відповідає переважно за температурний режим, вентилятор – за вологісний режим, а програмний контролер коригує їх роботу з урахуванням поточного стану сировини.

Для оцінки стійкості температурного режиму можна визначити відносне перерегулювання. Якщо задана температура становить 40°C, а після ввімкнення нагрівача максимальна температура короткочасно піднялася до 42°C, то перерегулювання становить:

$$\sigma = \frac{T_{max} - T_{зад}}{T_{зад}} \cdot 100\%$$

$$\sigma = \frac{42 - 40}{40} \cdot 100\% = 5\%$$

Перерегулювання на рівні 5% для камери сушіння рослин можна вважати допустимим, якщо воно є короткочасним і не призводить до перегріву сировини. Але, для чутливих рослин, які містять ефірні олії, або біологічно активні речовини, бажано обмежити перерегулювання до 2–3%. Це досягається плавним керуванням потужністю нагрівача та використанням адаптивного PID-регулятора.

Ще одним важливим показником є час встановлення температури. Він визначає, за який проміжок часу система входить у допустиму зону біля заданого значення. Якщо допустиме відхилення прийняти $\pm 1^\circ\text{C}$, то температурний режим вважається стабілізованим, коли температура знаходиться в межах 39–41°C. Для аперіодичної ланки першого порядку орієнтовний час встановлення можна оцінити як:

$$t_{вст} \approx 3T$$

Для температурного каналу зі сталою часу $T = 18\text{хв}$:

$$t_{\text{сст}} \approx 3 \cdot 18 = 54\text{хв}$$

Це означає, що після суттєвої зміни режиму камера потребує приблизно 54 хвилини для повної стабілізації температури. Такий результат підтверджує, що керування процесом сушіння повинно бути прогнозним, а не реактивним. Система має враховувати не лише поточну температуру, а й тенденцію її зміни. Через це, в подальшій програмній реалізації доцільно передбачити аналіз швидкості зміни температури:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T(t) - T(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

Якщо температура за 5 хвилин зросла з 38°C до $39,5^\circ\text{C}$, то швидкість нагрівання становить:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{39,5 - 38}{5} = 0,3^\circ\text{C/хв}$$

Якщо така швидкість збережеться, то до заданих 40°C камера дійде менше ніж за 2 хвилини. У цьому випадку контролер повинен заздалегідь зменшити потужність нагрівача, щоб не допустити перегріву.

Практична математична модель камери сушки як об'єкта керування може бути подана системою рівнянь:

$$C_{\Sigma} \frac{dT}{dt} = P_h - kF(T - T_{\text{зовн}}) - r \frac{dm_w}{dt} - \rho c_{\text{пов}} Q_v (T - T_{\text{зовн}})$$

$$\frac{dW}{dt} = -k_s (W - W_{\text{рівн}})$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = a \frac{dm_w}{dt} - b Q_v (\varphi - \varphi_{\text{зовн}})$$

Перше рівняння описує зміну температури в камері з урахуванням потужності нагрівача, теплових втрат, витрат енергії на випаровування та вентиляційних втрат. Друге рівняння описує зменшення вологості рослинної

сировини. Третє рівняння описує зміну вологості повітря в камері залежно від інтенсивності випаровування та роботи вентилятора. Така система рівнянь є основою для подальшого створення алгоритму керування, який буде реалізований у програмній частині роботи.

Отже, у межах підрозділу було формалізовано основні параметри мікроклімату сушильної камери, побудовано практичну математичну модель теплообмінних і вологісних процесів, а також проаналізовано динамічні характеристики об'єкта керування. Розрахунки показали, що для сушіння партії рослинної сировини масою 80кг з початковою вологістю 65% до кінцевої вологості 12% необхідно видалити приблизно 48,18кг води, а енергетичні витрати лише на випаровування становлять близько 30,25кВт·год. Температурний канал камери має значну інерційність, а орієнтовний час стабілізації температури становить близько 54 хвилин. Це підтверджує необхідність використання автоматизованого керування з PID-регулюванням, адаптивною вентиляцією та постійним моніторингом параметрів мікроклімату.

2.2. Математичне моделювання процесу індуктивної передачі енергії в системі «первинний контур – пікап»

У розроблюваній автоматизованій системі керування мікрокліматом камера сушки розглядається не лише як об'єкт тепломасообміну, а й як технологічне середовище для роботи мобільного робототехнічного модуля. Для стабільного переміщення такого модуля вздовж монорейки необхідно забезпечити його безперервним живленням без використання відкритих контактних з'єднань. Умови сушильної камери є складними для традиційних систем енергопостачання, оскільки всередині камери присутні підвищена

температура, змінна вологість, потоки повітря, пилові частинки рослинної сировини та обмежений доступ для технічного обслуговування. Тому, в межах цієї роботи доцільно застосувати індуктивну передачу енергії, за якої електрична потужність передається від нерухомого первинного контуру до рухомого приймального елемента без механічного контакту.

Система «первинний контур – пікап» у цій роботі розглядається як електромагнітний вузол, що забезпечує живлення бортового обладнання мобільного робота. Первинний контур встановлюється вздовж траєкторії руху робота та підключається до високочастотного інвертора. Пікап розміщується на мобільному модулі та виконує функцію приймача електромагнітної енергії. Отримана енергія після випрямлення і стабілізації використовується для живлення мікроконтролера, сенсорів температури та вологості, приводу переміщення, модуля бездротового зв'язку та елементів локальної індикації. Практичне значення такої схеми полягає в тому, що робот може безперервно виконувати сканування мікроклімату без періодичного виведення з камери для заряджання акумулятора.

Електромагнітна модель IPT-системи будується на основі двох індуктивно зв'язаних контурів. Первинний контур виконує роль передавача енергії, а вторинний контур, тобто пікап, приймає енергію змінного магнітного поля. У спрощеній практичній моделі первинний контур складається з індуктивності L_1 , активного опору R_1 , компенсуючого конденсатора C_1 та джерела високочастотної напруги. Вторинний контур містить індуктивність L_2 , активний опір R_2 , компенсуючий конденсатор C_2 , випрямляч, стабілізатор напруги та навантаження R_H . Зв'язок між цими контурами задається взаємною індуктивністю M , яка залежить від конструкції

катушок, відстані між ними, положення пікапа відносно первинного провідника та коефіцієнта магнітного зв'язку.

В математичній формі взаємна індуктивність задається залежністю:

$$M = k\sqrt{L_1L_2}$$

де M – взаємна індуктивність між первинною та вторинною катушками, k – коефіцієнт магнітного зв'язку, L_1 – індуктивність первинного контуру, L_2 – індуктивність приймального контуру. Для підвісного мобільного робота коефіцієнт k не є сталим упродовж усього руху, так як пікап може зміщуватися відносно первинного контуру. Тому, модель повинна враховувати зміну магнітного зв'язку залежно від положення робота на монорейці.

У комплексній формі процес енергопередачі описується системою рівнянь:

$$U_1 = I_1Z_1 + j\omega MI_2$$

$$0 = I_2Z_2 + j\omega MI_1$$

де U_1 – напруга живлення первинного контуру, I_1 – струм у первинному контурі, I_2 – струм у вторинному контурі, ω – кутова частота, Z_1 – повний опір первинного контуру, Z_2 – повний опір вторинного контуру. Повні опори контурів визначаються так:

$$Z_1 = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)$$

$$Z_2 = R_2 + R_H + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)$$

У цій моделі активні опори R_1 та R_2 відображають втрати в обмотках, а опір R_H характеризує споживання бортової системи робота. Реактивні складові залежать від частоти роботи інвертора та параметрів компенсувальних конденсаторів.

Для практичної реалізації в роботі електромагнітна модель IPT-системи може бути представлена як залежність вихідної напруги, струму навантаження, переданої потужності та коефіцієнта корисної дії від робочої частоти і коефіцієнта зв'язку. Такий підхід дозволяє оцінити, як змінюється живлення мобільного робота під час руху, коли пікап наближається, або віддаляється від оптимального положення відносно первинного контуру. Особливо важливо те, що модель дає змогу не просто описати принцип роботи IPT-системи, а перевірити її придатність для стабільного живлення бортового обладнання.

В межах автоматизованої системи керування мікрокліматом IPT-вузол виконує допоміжну, але дуже важливу функцію. Він не бере безпосередньої участі в регулюванні температури чи вологості, проте забезпечує роботу мобільного модуля, який збирає дані з різних зон камери. Завдяки цьому система отримує не одну локальну точку вимірювання, а просторову картину мікроклімату. Це підвищує точність керування, бо в реальній камері температура і вологість можуть відрізнятись біля входу повітряного потоку, в центрі камери та біля витяжного каналу.

Далі, варто дослідити резонансні режими передачі енергії. резонансний режим є основою стабільної роботи IPT-системи, оскільки при правильному узгодженні параметрів контурів забезпечується максимальна передача потужності від первинної котушки до приймального пікапа. Для мобільного робототехнічного модуля, який працює всередині сушильної камери, це має особливе значення, оскільки навіть короткочасне зниження напруги живлення може призвести до втрати зв'язку із сенсорними вузлами, нестабільної роботи приводу, або помилок під час передавання даних до центрального контролера.

В межах моделювання резонансний режим досліджувався шляхом аналізу зміни параметрів системи залежно від робочої частоти інвертора. Для цього в середовищі MATLAB була побудована математична модель індуктивної передачі енергії, яка враховує параметри первинного та вторинного контурів, взаємну індуктивність, компенсуючі конденсатори, активні опори котушок і еквівалентне навантаження мобільного модуля. Основною метою моделювання стало визначення робочої області, в якій забезпечується найбільш стабільна передача енергії та максимальна ефективність системи.

У процесі моделювання аналізувалися зміни вихідної напруги на навантаженні, струмів у первинному та вторинному контурах, а також характер зміни корисної потужності залежно від частоти. При відхиленні від резонансної частоти система починає працювати менш стабільно, оскільки збільшується реактивна складова повного опору контуру. Це призводить до зниження амплітуди струму в первинній котушці та послаблення магнітного зв'язку між передавачем і пікапом.

Резонансна частота визначається виразом:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

де f_0 – резонансна частота, L – індуктивність котушки, C – ємність компенсуючого конденсатора. У практичній моделі первинний та вторинний контури були налаштовані на одну робочу частоту, що дозволило забезпечити максимальну ефективність передачі енергії. При такому режимі індуктивний та ємнісний опори взаємно компенсуються, а реактивна складова наближається до нуля:

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

$$X \approx 0$$

Це означає, що контур працює переважно як активне навантаження, а більша частина енергії передається до вторинного контуру замість циркуляції всередині реактивних елементів системи.

У межах MATLAB-моделі було побудовано частотні характеристики системи, які дозволяють візуально оцінити поведінку IPT-вузла при зміні робочої частоти інвертора. За результатами моделювання встановлено, що в околі резонансної частоти спостерігається максимальна напруга на навантаженні та найбільша передана потужність. При відхиленні частоти в нижчу чи вищу область напруга на пікапі поступово зменшується, а робота системи стає менш стабільною (рисунок 2.1).

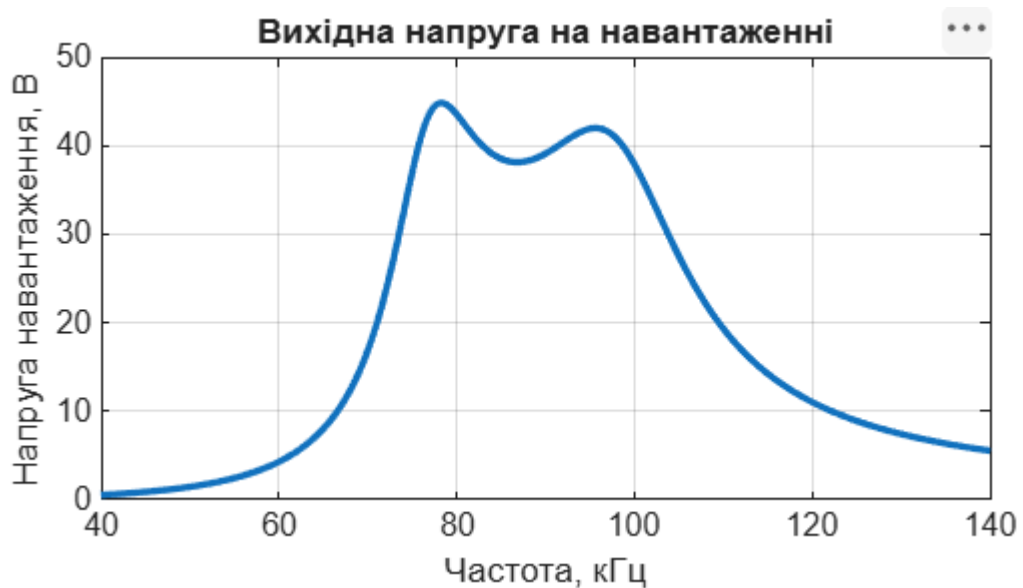


Рисунок 2.1 - Вихідна напруга на навантаженні

Отриманий графік демонструє характер зміни напруги в широкому діапазоні частот. Максимум напруги спостерігається в області резонансу, де

система працює найбільш ефективно. Ця зона є оптимальною для живлення мобільного модуля. Для автоматизованої системи керування це означає, що робоча частота інвертора повинна підтримуватися максимально близько до резонансного значення навіть при зміні навантаження, або зміщенні пікапа.

Додатково в MATLAB було досліджено поведінку струмів у первинному та вторинному контурах. Аналіз показав, що у резонансному режимі спостерігається найбільш ефективний магнітний зв'язок між котушками, а струм у вторинному контурі забезпечує стабільне живлення навантаження. При відхиленні від резонансної частоти струми зменшуються, що безпосередньо впливає на потужність, яка передається до приймального контуру (рисунок 2.2).

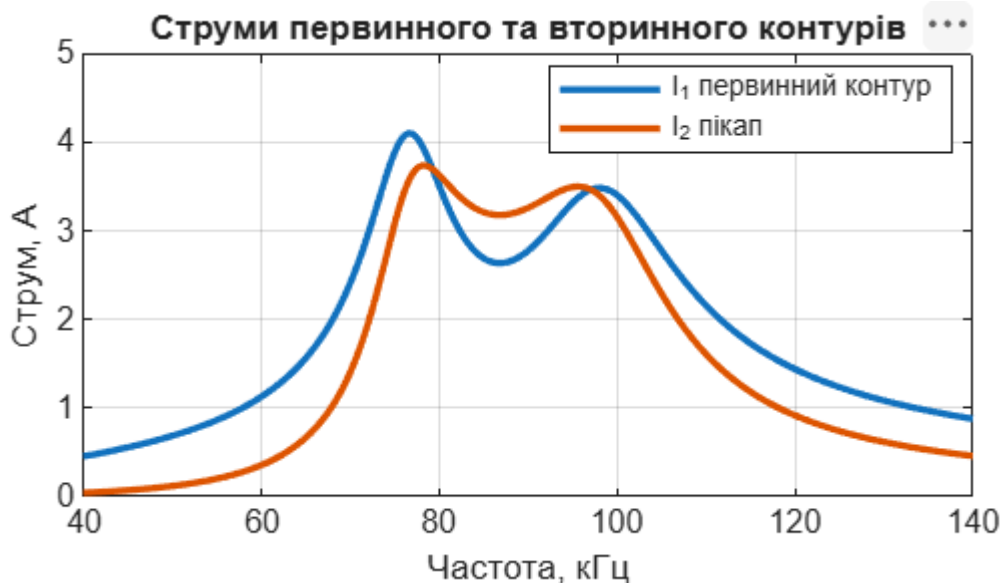


Рисунок 2.2 Струми первинного та вторинного контурів

Окрему увагу було приділено впливу зміщення пікапа відносно первинного контуру. Оскільки мобільний робот рухається вздовж монорейки, положення приймальної котушки змінюється, що призводить до зміни коефіцієнта магнітного зв'язку. У MATLAB-моделі цей ефект був врахований

шляхом зміни параметра взаємної індуктивності залежно від координати зміщення. За результатами моделювання встановлено, що при невеликих зміщеннях система зберігає стабільну передачу енергії, однак при значному віддаленні пікапа від центральної осі первинного контуру напруга на навантаженні починає знижуватися (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 Напруга на навантаженні при зміні положення пікапа

Отримані результати підтверджують, що система індуктивної передачі енергії може забезпечити стабільне живлення мобільного робототехнічного модуля, навіть, в процесі його руху всередині сушильної камери. При цьому найбільш стабільна робота системи спостерігається в області резонансної частоти та при мінімальному зміщенні пікапа відносно первинного контуру.

Після дослідження резонансних режимів передачі енергії було виконано аналіз втрат потужності та ефективності роботи ІРТ-системи. Для практичного застосування індуктивного живлення в автоматизованій системі моніторингу мікроклімату важливим є не лише сам факт передачі енергії, а й забезпечення достатньо високого коефіцієнта корисної дії. Умови сушильної камери передбачають тривалу безперервну роботу мобільного модуля, тому навіть незначні втрати потужності можуть призводити до нагрівання котушок, перевантаження інвертора та зниження стабільності живлення.

В процесі моделювання було враховано основні складові втрат у системі. До них належать втрати в обмотках первинної та вторинної котушок, втрати у високочастотному інверторі, втрати у випрямлячі, а також втрати,

пов'язані з неповним магнітним зв'язком між контурами. Крім того, враховувалися втрати, які виникають через зміщення пікапа під час руху мобільного робота.

Втрати в обмотках описуються залежностями:

$$P_{R1} = I_1^2 R_1$$

$$P_{R2} = I_2^2 R_2$$

де P_{R1} і P_{R2} – втрати в первинній та вторинній котушках, I_1 та I_2 – струми контурів, R_1 і R_2 – активні опори обмоток. Ці втрати проявляються у вигляді тепловиділення в провідниках котушок. Для сушильної камери це є критично важливим, оскільки система вже працює в умовах підвищеної температури. Надмірний нагрів обмоток може призвести до деградації ізоляції та зміни параметрів резонансного контуру.

Корисна потужність на навантаженні визначається через напругу, або струм навантаження:

$$P_H = \frac{U_H^2}{R_H}$$

або

$$P_H = I_H^2 R_H$$

Ефективність передачі енергії оцінюється коефіцієнтом корисної дії:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{in}} \cdot 100\%$$

де P_H – потужність на навантаженні, P_{in} – потужність, споживана первинним контуром від джерела живлення. В межах MATLAB-моделі коефіцієнт корисної дії визначався автоматично для кожного значення робочої частоти та для різних положень пікапа.

Результати моделювання показали, що максимальна ефективність системи досягається в області резонансної частоти. Саме в цій зоні магнітний зв'язок між контурами є найбільш ефективним, а реактивні втрати мінімальні. При відхиленні від резонансного режиму коефіцієнт корисної дії поступово зменшується через збільшення реактивної складової повного опору (рисунок 2.4).

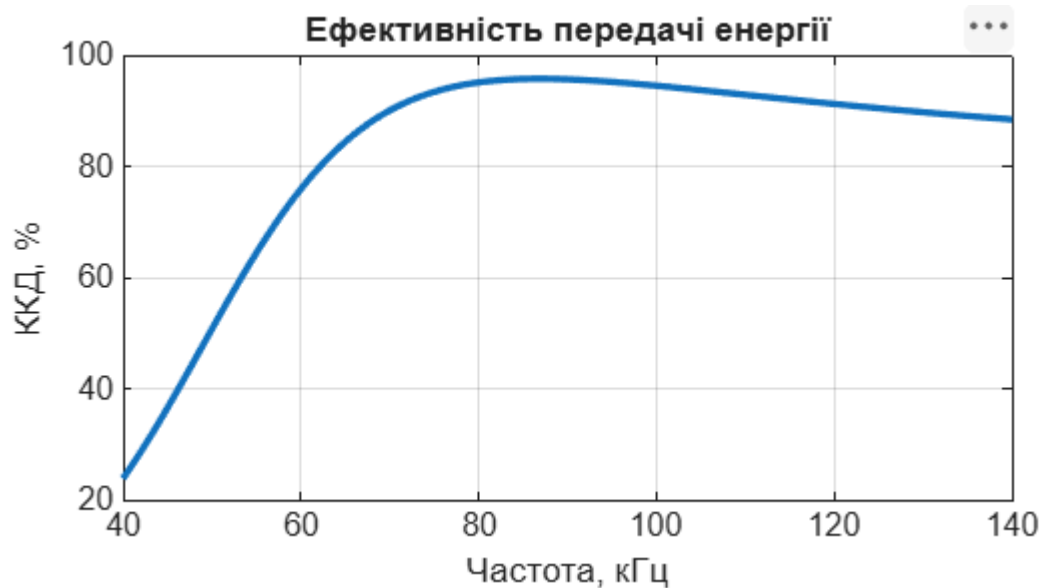


Рисунок 2.4 Ефективність передачі енергії

Графік демонструє, що в області оптимальної робочої частоти система має найбільший коефіцієнт корисної дії. При зміщенні частоти в нижчу, або вищу область ефективність знижується, що свідчить про необхідність стабілізації частоти інвертора та точного налаштування параметрів компенсуювальних контурів.

Окремо було проаналізовано залежність переданої потужності від робочої частоти. Результати моделювання показали, що максимум потужності також спостерігається поблизу резонансного режиму. Це означає, що саме в цій області мобільний робот отримує найбільш стабільне живлення, необхідне

для роботи приводу переміщення, сенсорної системи та модуля зв'язку (рисунок 2.5).

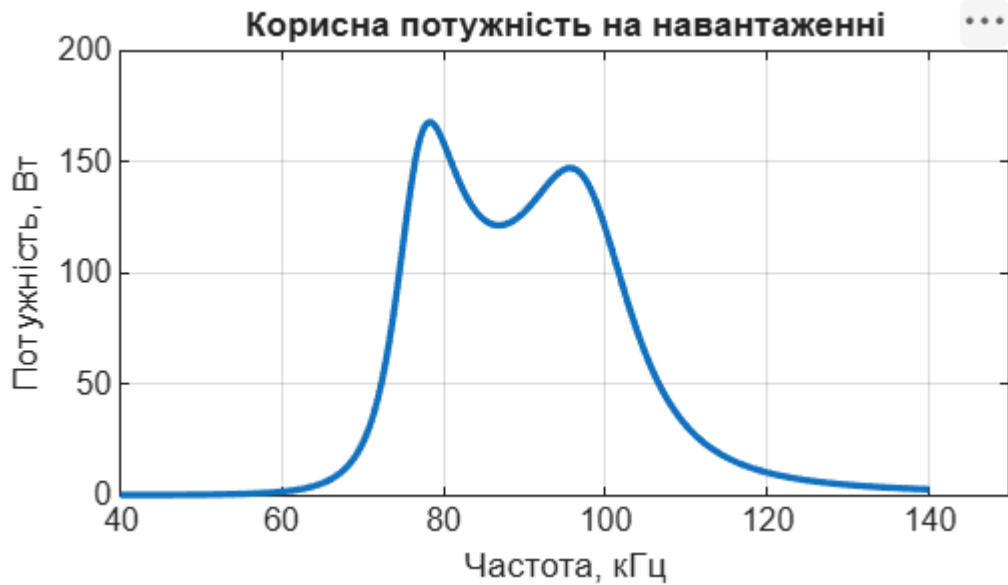


Рисунок 2.5 Корисна потужність на навантаженні

Під час моделювання, також, було досліджено вплив зміщення пікапа на ефективність системи. При переміщенні мобільного робота коефіцієнт магнітного зв'язку між котушками змінюється, що призводить до зниження переданої потужності та погіршення ККД. У MATLAB-моделі це було реалізовано через залежність взаємної індуктивності від координати зміщення (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 Потужність і ККД при зміщенні пікапа

Аналіз показав, що при незначних зміщеннях система продовжує працювати стабільно, однак при значному віддаленні приймального контуру від центральної осі первинної котушки коефіцієнт корисної дії різко знижується. Це означає, що конструкція монорейки та розташування пікапа повинні забезпечувати мінімальні поперечні зміщення під час руху мобільного робота.

Загалом, було виконано аналіз втрат потужності та ефективності індуктивної передачі енергії в системі «первинний контур – пікап». За результатами MATLAB-моделювання встановлено, що найбільш ефективний режим роботи системи досягається в області резонансної частоти, де забезпечується максимальна передана потужність і найвищий коефіцієнт корисної дії. Дослідження також підтвердило, що стабільність живлення мобільного робототехнічного модуля значною мірою залежить від точності позиціонування пікапа відносно первинного контуру та стабільності параметрів високочастотного інвертора.

2.3. Дослідження динаміки руху робота на монорейці при живленні від магнітного поля

В межах розроблюваної автоматизованої системи робот виконує функцію мобільного сенсорного вузла, який переміщується по робочій зоні та здійснює безперервне сканування параметрів мікроклімату. На відміну від стаціонарних датчиків, така система дозволяє отримувати просторову карту температури, вологості та повітряних потоків у різних частинах сушильної камери. Тому, дослідження руху робота має важливе значення для оцінки стабільності роботи всієї автоматизованої системи.

У процесі моделювання монорейковий робот розглядався як рухома механічна система з електроприводом постійного струму та індуктивним каналом живлення. В моделі враховувалися маса мобільного модуля, сили тертя в напрямних, вплив нерівномірності руху, зміна напруги індуктивного живлення при зміщенні пікапа та вплив електромагнітного поля на стабільність руху. Крім того, модель дозволила оцінити характер руху робота під час розгону, рівномірного переміщення та гальмування.

Для дослідження кінематичних параметрів було побудовано MATLAB-модель руху робота по монорейковій системі. Основною метою моделювання стало визначення стабільності переміщення мобільного модуля при різних режимах роботи приводу та оцінка характеру зміни швидкості під час проходження контрольних ділянок сушильної камери.

В моделі рух робота описувався як переміщення по горизонтальній монорейковій траєкторії з урахуванням інерційності конструкції та впливу сил опору. Для системи керування було використано плавний алгоритм розгону та гальмування, завдяки якому вдалося уникнути різких стрибків швидкості та механічних коливань підвісної конструкції.

В результаті моделювання було отримано графік зміни координати мобільного модуля в часі (рисунок 2.7). Аналіз графіка показав, що робот рівномірно проходить усі контрольні ділянки монорейки без різких змін положення, або нестабільності руху. На початковому етапі спостерігається плавний розгін, після чого система переходить в режим стабільної швидкості, а перед досягненням контрольної точки виконується контрольоване гальмування.



Рисунок 2.7 Переміщення мобільного модуля вздовж монорейки

Побудований графік дозволяє оцінити траєкторію руху мобільного модуля та підтверджує стабільність роботи системи позиціонування. В процесі моделювання встановлено, що при використанні плавного алгоритму керування приводом відсутні різкі стрибки координати, які могли б призвести до механічних коливань, або нестабільності пікапа відносно первинного контуру.

Окремо було проаналізовано зміну швидкості роботи під час руху. MATLAB-модель показала, що при плавному розгоні навантаження на привід зменшується, а швидкість змінюється без критичних коливань. Це особливо важливо для мобільного модуля, який виконує високоточне сканування параметрів мікроклімату (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 Швидкість руху мобільного модуля

На графіку чітко видно три основні режими роботи системи: розгін, стабільний рух і плавне гальмування. Під час рівномірного руху швидкість

стабілізується, що забезпечує рівномірне проходження робота через контрольні зони сушильної камери. Завдяки цьому сенсорна система отримує стабільні умови для вимірювання температури та вологості.

Під час моделювання, також, було досліджено зміну прискорення мобільного модуля. Аналіз показав, що при використанні плавного керування відсутні різкі імпульсні навантаження, які могли б викликати вібрації корпусу, або втрату стабільності живлення (рисунок 2.9).

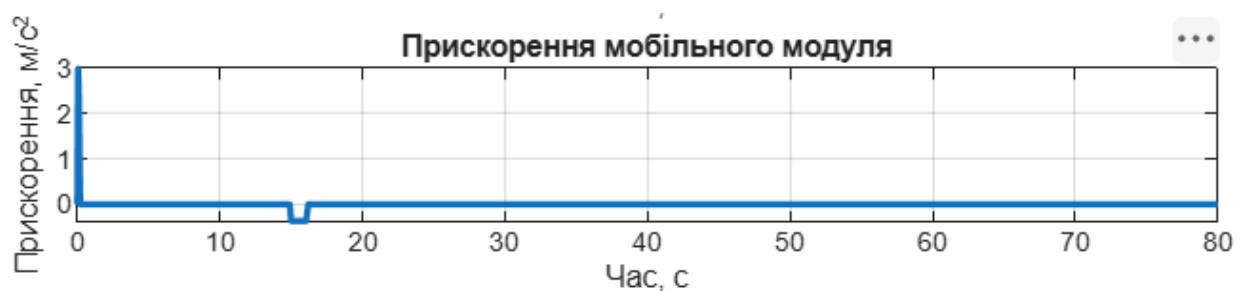


Рисунок 2.9 Прискорення мобільного модуля

Отримані результати підтвердили, що запропонована кінематична схема забезпечує стабільний рух мобільного модуля по монорейці та дозволяє уникнути критичних механічних коливань в процесі роботи автоматизованої системи.

Після аналізу кінематичних параметрів було виконано дослідження впливу електромагнітного поля системи індуктивного живлення на стабільність руху мобільного модуля. На відміну від класичних робототехнічних систем з акумуляторним живленням, в даній конструкції між первинним контуром та пікапом постійно існує електромагнітна взаємодія. Тому, зміщення мобільного модуля відносно центральної осі первинного контуру безпосередньо впливає на стабільність живлення та роботу приводу.

У MATLAB було створено модель зміни коефіцієнта магнітного зв'язку залежно від положення пікапа (рисунок 2.10). Під час моделювання

аналізувалася зміна напруги живлення мобільного модуля при різних зміщеннях робота відносно монорейки.

Результати моделювання показали, що при незначних зміщеннях мобільного модуля система зберігає стабільний рівень напруги та не втрачає працездатності. Але, при збільшенні відхилення пікапа від центральної осі первинного контуру починається поступове зниження рівня переданої енергії.

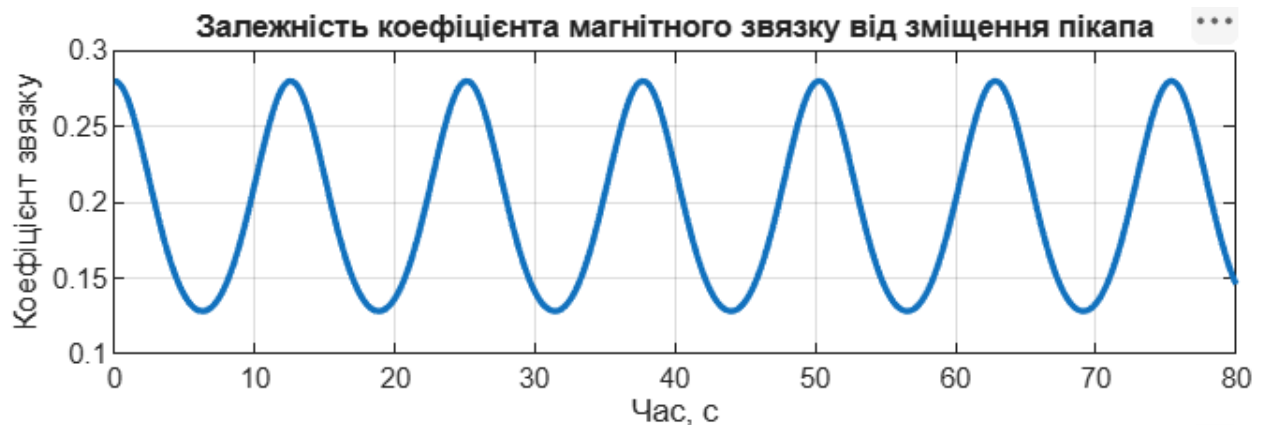


Рисунок 2.10 Залежність коефіцієнта магнітного зв'язку від зміщення пікапа

Графік демонструє, що найбільш ефективна передача енергії досягається при центральному положенні пікапа. При збільшенні зміщення коефіцієнт магнітного зв'язку поступово зменшується, що безпосередньо впливає на напругу живлення мобільного модуля.

В межах моделювання, також, було досліджено зміну напруги живлення робота при русі вздовж монорейки (рисунок 2.11). Результати показали, що при плавному русі система індуктивного живлення забезпечує достатньо стабільний рівень напруги, навіть, в процесі зміни положення мобільного модуля.

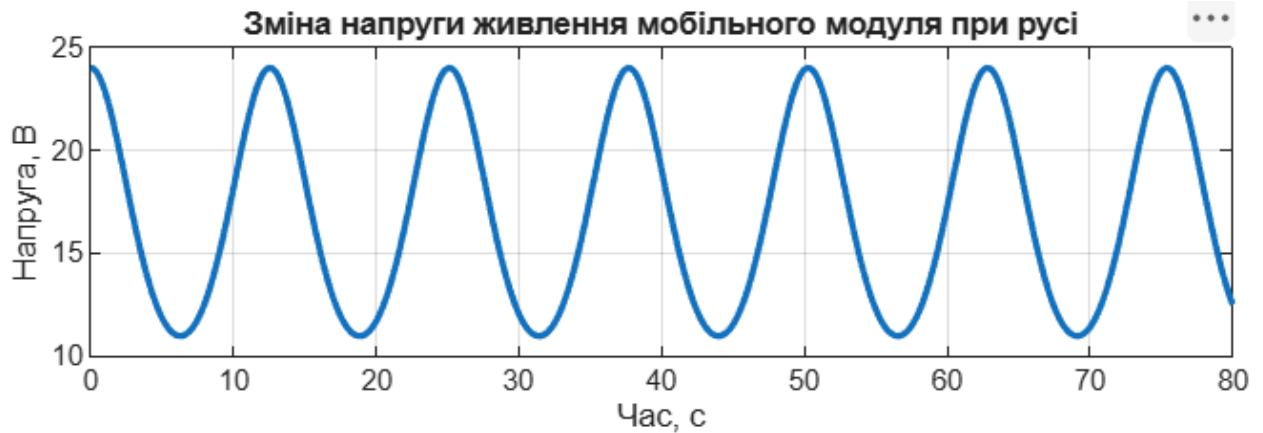


Рисунок 2.11 Зміна напруги живлення мобільного модуля при русі

Аналіз графіка показав, що найбільші коливання напруги виникають у моменти різкої зміни швидкості, або зміщення пікапа. Тому, для практичної реалізації системи було прийнято рішення використовувати плавний режим переміщення та буферний стабілізатор живлення після випрямляча.

Окремо було досліджено вплив електромагнітного поля на стабільність роботи сенсорної системи. MATLAB-модель підтвердила, що при правильному екрануванні сигнальних ліній та рознесенні силових і вимірювальних кіл рівень електромагнітних завад не впливає критично на точність вимірювання параметрів мікроклімату.

В результаті моделювання встановлено, що система індуктивного живлення не створює критичних порушень стабільності руху мобільного модуля за умови правильного позиціонування пікапа та плавного алгоритму керування приводом.

2.4. Синтез алгоритмів адаптивного керування мікрокліматом на основі безперервного сканування середовища

В межах цієї роботи система керування розглядається як програмно-апаратний комплекс, який не просто підтримує задану температуру та вологість, а постійно уточнює керуючі дії на основі даних, отриманих від мобільного робототехнічного модуля. Такий підхід є більш ефективним, ніж використання лише стаціонарних датчиків, оскільки всередині сушильної камери параметри мікроклімату можуть бути нерівномірними. В одній зоні температура може бути вищою через близькість до нагрівального елемента, в іншій – вологість може залишатися підвищеною через недостатню циркуляцію повітря, або нерівномірне розміщення рослинної сировини.

У запропонованій системі мобільний модуль рухається вздовж монорейки та послідовно сканує контрольні точки сушильної камери. Дані з датчиків температури, вологості та швидкості повітря передаються до центрального контролера, де проходять фільтрацію, усереднення та порівняння із заданими технологічними параметрами. На основі цих даних система формує керуючі дії для нагрівача, вентилятора та витяжного каналу. Якщо температура в окремих зонах нижча за задану, система підвищує потужність нагрівання. Якщо вологість перевищує допустимий рівень, збільшується інтенсивність вентиляції. Якщо параметри знаходяться в межах допустимого діапазону, система підтримує економний стабілізований режим.

Алгоритм адаптивного регулювання мікроклімату побудовано таким чином, щоб він реагував не лише на поточне відхилення температури чи вологості, а й на характер зміни параметрів у часі. Це важливо, так як камера сушки є інерційним об'єктом: після зміни потужності нагрівача або

вентилятора параметри не змінюються миттєво. Якщо керування буде занадто різким, система може перегріти сировину або, навпаки, створити надмірну вентиляцію, що призведе до зайвих енергетичних втрат.

У межах алгоритму температура та вологість аналізуються за трьома основними станами. Перший стан відповідає недостатньому нагріванню, коли температура в камері нижча за заданий рівень. В цьому випадку контролер збільшує потужність нагрівача, але робить це поступово, щоб уникнути перерегулювання. Другий стан відповідає нормальному технологічному режиму, коли температура та вологість знаходяться в допустимих межах. У цьому випадку система підтримує стабільний режим із мінімальним енергоспоживанням. Третій стан виникає тоді, коли вологість у камері перевищує допустиме значення або температура наближається до верхньої межі. В такому режимі система зменшує нагрівання та підсилює вентиляцію.

Практично алгоритм працює циклічно (рисунок 2.12). Спочатку мобільний модуль виконує сканування контрольної зони. Потім отримані дані передаються до контролера, де порівнюються із заданими параметрами. Після цього система визначає похибку температури, похибку вологості та загальний стан мікроклімату. Якщо відхилення незначні, система не змінює режим роботи різко, а лише коригує потужність нагрівача або вентилятора. Якщо відхилення суттєві, контролер формує більш активну керуючу дію.

Особливістю адаптивного керування є те, що коефіцієнти регулювання змінюються залежно від стану процесу сушіння. На початковому етапі, коли сировина містить багато вологи, система допускає інтенсивнішу вентиляцію та активніше нагрівання. На середньому етапі сушіння керування стає більш стабілізованим. На завершальному етапі, коли волога з рослинної сировини

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
 інноваційних засобів

видаляється повільніше, система зменшує агресивність регулювання, щоб не допустити пересушування або перегріву продукту.

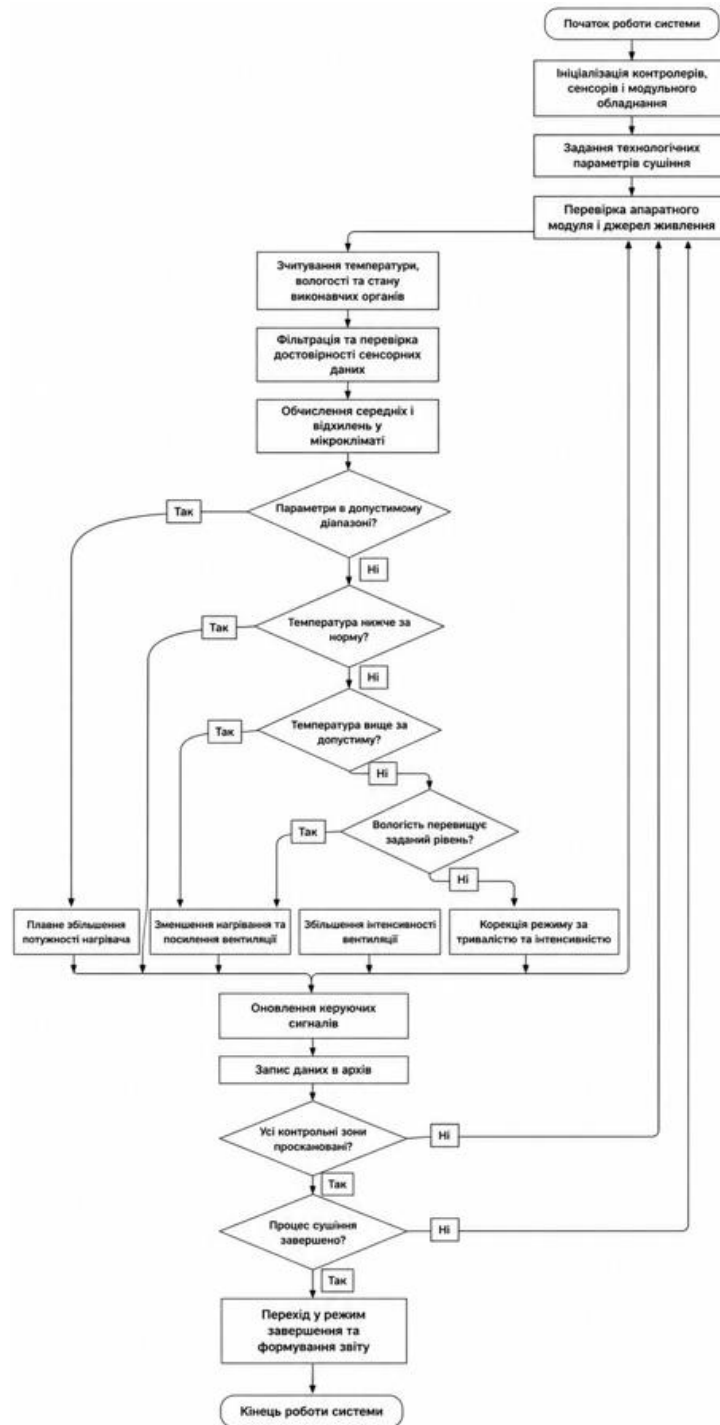


Рисунок 2.12 Блок-схема алгоритму адаптивного керування мікрокліматом

Для підтвердження працездатності такого підходу було побудовано MATLAB-модель адаптивного керування. В моделі враховано зміну температури та вологості в часі, роботу нагрівача, роботу вентилятора, появу зовнішніх збурень і реакцію системи керування на ці збурення (рисунок 2.13).

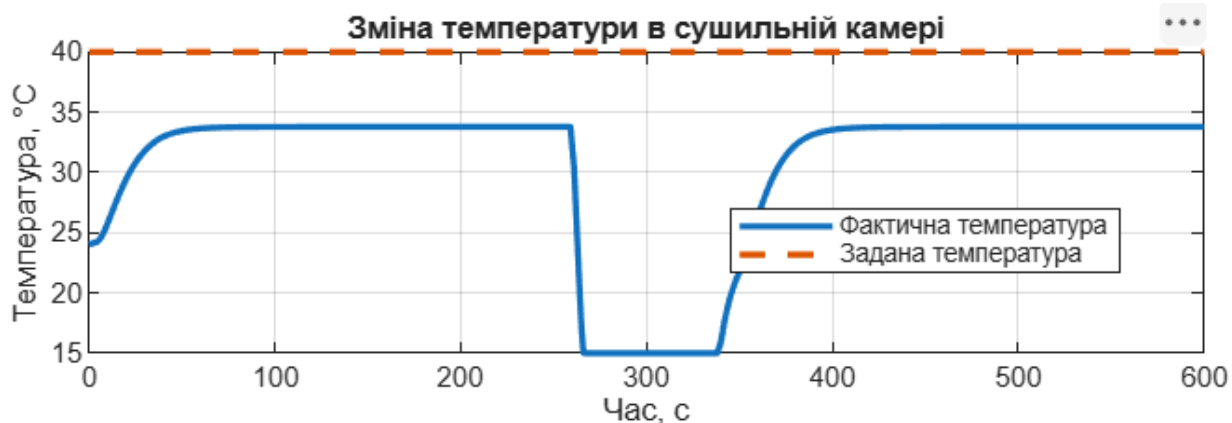


Рисунок 2.13 Зміна температури в сушильній камері

Цей графік показує, як система поступово виводить температуру до заданого рівня та надалі утримує її в допустимому діапазоні. Короткочасні відхилення, які виникають через зміну вологості сировини, або вентиляційні збурення, компенсуються алгоритмом керування без різкого перегріву камери (рисунок 2.14).

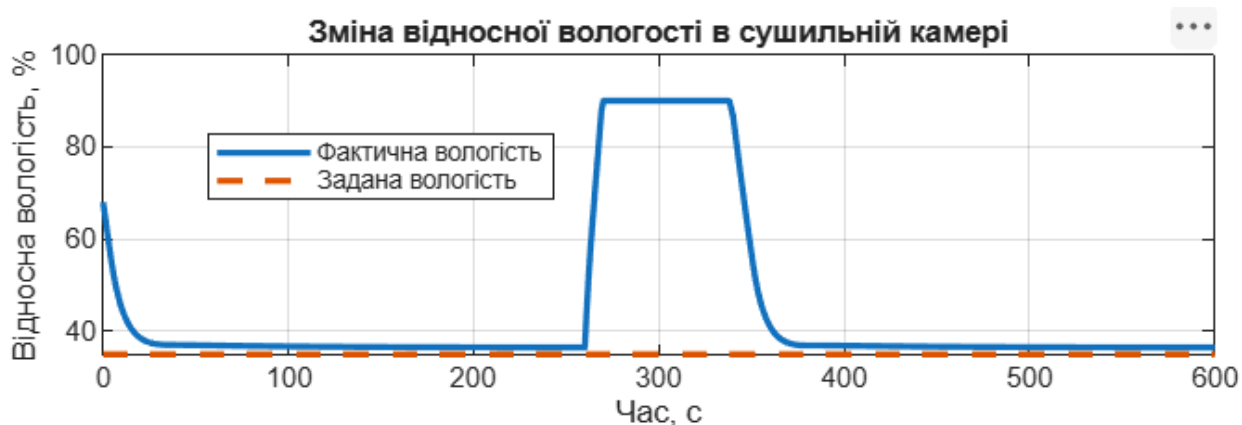


Рисунок 2.14 Зміна відносної вологості в сушильній камері

На цьому графіку видно, що вологість поступово знижується до технологічно допустимого рівня. При появі локального підвищення вологості система збільшує інтенсивність вентиляції, після чого параметр повертається до стабільної області.

Логіка обробки даних із сенсорної системи побудована з урахуванням того, що показники температури та вологості в сушильній камері можуть мати короткочасні коливання. Такі коливання виникають через рух повітря, зміну положення мобільного модуля, локальне випаровування вологи з рослинної сировини та електромагнітні завади від силових елементів системи. Тому, дані з датчиків не повинні безпосередньо передаватися в регулятор без попередньої обробки.

У запропонованому алгоритмі кожне вимірювання проходить кілька етапів. Спочатку дані приймаються від мобільного модуля. Далі виконується перевірка на допустимість значень. Якщо показник виходить за межі фізично можливого діапазону, він не використовується для керування, а система очікує наступне вимірювання. Після цього виконується згладжування сигналу, щоб усунути короткочасні стрибки.

Після фільтрації система формує усереднене значення температури та вологості по контрольній зоні. Якщо мобільний модуль виконує сканування кількох точок, контролер може окремо оцінювати середнє значення по камері та максимальні локальні відхилення. Це важливо, оскільки середня температура може бути нормальною, але в окремій зоні може виникати перегрів або надлишкова вологість. У такому випадку система повинна не просто підтримувати середній режим, а коригувати вентиляцію або змінювати маршрут сканування мобільного модуля.

Практична логіка обробки даних також передбачає визначення тренду. Якщо температура зростає занадто швидко, система зменшує потужність нагрівача ще до того, як буде досягнуто верхню межу. Якщо вологість знижується повільно, система збільшує вентиляцію, або продовжує час сушіння. Завдяки цьому керування стає не реактивним, а прогнозним (рисунок 2.15).

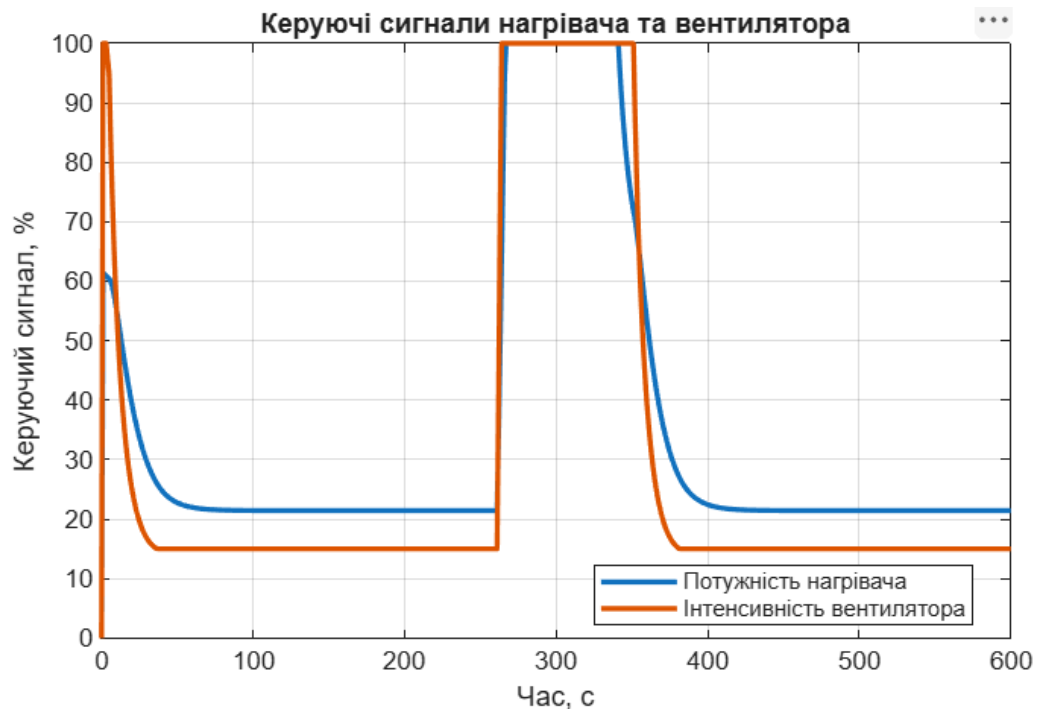


Рисунок 2.15 Керуючі сигнали нагрівача та вентилятора

Цей графік показує, як система змінює потужність нагрівання та інтенсивність вентиляції залежно від стану мікроклімату. На початковому етапі нагрівач працює активніше, а з наближенням до заданого температурного режиму його потужність зменшується. Вентилятор активізується тоді, коли вологість перевищує заданий рівень чи коли потрібно вирівняти параметри всередині камери.

Для перевірки працездатності алгоритму було змодельовано роботу сушильної камери в умовах змінних параметрів середовища. В моделі враховано початковий період нагрівання, стабілізацію температури, поступове зниження вологості, короткочасне збурення температурного режиму та підвищення вологості через активне випаровування вологи з рослинної сировини.

Під час моделювання система повинна була підтримувати задану температуру та знижувати вологість без різких коливань керуючих сигналів. Такий режим є найбільш доцільним для сушіння рослин, оскільки якість готової продукції залежить не лише від кінцевої вологості, а й від плавності перебігу процесу. Різкі температурні стрибки можуть погіршити колір, аромат і структуру рослинної сировини, тому алгоритм керування має працювати стабільно й передбачувано.

У MATLAB-моделі було змодельовано збурення, яке імітує короткочасну зміну умов у камері. Це може відповідати відкриванню технологічного люка, зміні інтенсивності випаровування, або нерівномірному переміщенню повітряного потоку. Після появи збурення система автоматично змінює керуючі сигнали, а потім повертає параметри до заданої області (рисунок 2.16).

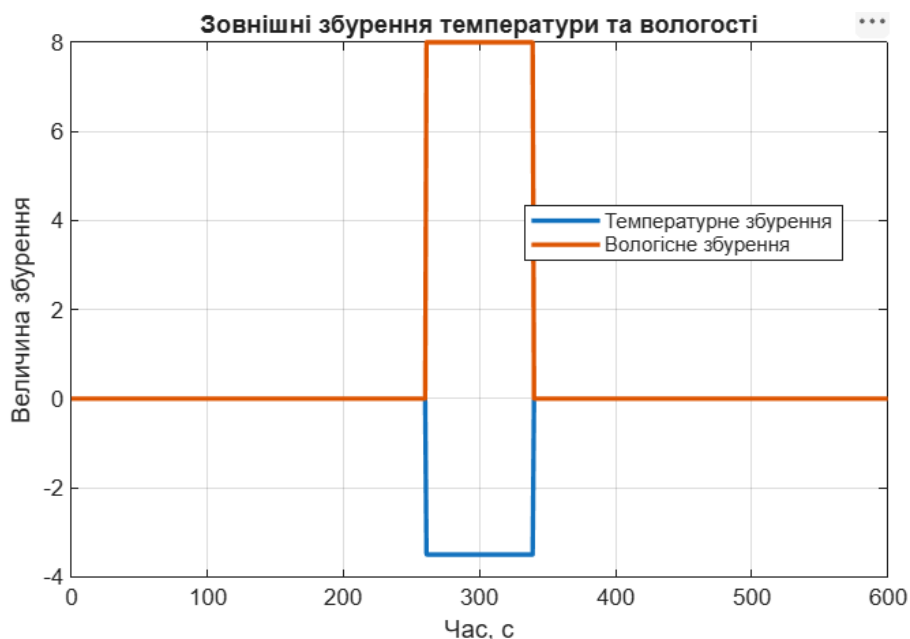


Рисунок 2.16 Зовнішні збурення температури та вологості

Цей графік показує, що після появи збурення температура та вологість тимчасово відхиляються від заданих значень, але адаптивний алгоритм поступово повертає систему до стабільного режиму. Така поведінка підтверджує доцільність використання адаптивного керування в сушильній камері з мобільним сенсорним модулем.

Отже, було розроблено алгоритм адаптивного керування мікрокліматом, сформовано логіку обробки даних із мобільної сенсорної системи та виконано моделювання роботи системи в умовах зміни параметрів середовища. Запропонований алгоритм дозволяє підтримувати стабільну температуру, поступово знижувати вологість, реагувати на локальні збурення та забезпечувати енергоощадний режим роботи сушильної камери.

Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано математичне моделювання основних процесів, що відбуваються в автоматизованій системі управління мікрокліматом сушильної камери. Побудовано математичну модель камери сушки як об'єкта керування, що дозволило дослідити взаємозв'язок між температурою, вологістю та параметрами повітряного потоку. Отримані результати підтвердили можливість використання моделі для аналізу динаміки процесу сушіння та подальшого синтезу алгоритмів керування.

Проведено моделювання процесу індуктивної передачі енергії в системі «первинний контур – пікап», досліджено резонансні режими роботи ІРТ-системи та оцінено ефективність передачі потужності. Також, виконано дослідження динаміки руху мобільного робототехнічного модуля на монорейці та проаналізовано його енергоефективність в умовах безконтактного живлення.

На основі отриманих результатів розроблено алгоритми адаптивного керування мікрокліматом, які забезпечують автоматичне коригування режимів нагрівання та вентиляції за даними безперервного моніторингу середовища. Проведене моделювання підтвердило працездатність запропонованих рішень та їх придатність для подальшої практичної реалізації в автоматизованій системі сушіння рослинної сировини.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІННОВАЦІЙНОЇ АСК

3.1. Розробка функціональної схеми АСК з інтегрованою ІРТ-системою та мобільним модулем

Функціонально система складається з центрального контролера, стаціонарних датчиків, мобільного сенсорного модуля, високочастотного інвертора ІРТ-живлення, первинного індуктивного контуру, приймального пікапа, виконавчих механізмів, модуля бездротового зв'язку та людино-машинного інтерфейсу. Всі ці елементи об'єднуються в одну систему, яка працює за циклічним принципом: збирання даних, перевірка параметрів, прийняття рішення, формування керуючого сигналу, вплив на мікроклімат і повторний контроль результату.

Структурна схема автоматизованої системи була сформована таким чином, щоб забезпечити одночасно стабільне керування сушильною камерою та гнучкий моніторинг параметрів у різних її зонах. Центральним елементом системи є контролер керування, який приймає дані від сенсорів, обробляє їх, порівнює з технологічними параметрами сушіння та формує команди для виконавчих механізмів.

У нижньому рівні системи розміщуються датчики температури, вологості, швидкості повітря, напруги живлення мобільного модуля та стану виконавчих пристроїв. Частина датчиків є стаціонарною, тобто встановленою в постійних точках сушильної камери. Інша частина розміщується на мобільному модулі, який рухається вздовж монорейки та виконує сканування простору. Це дозволяє отримувати не лише локальні значення, а й більш повну картину розподілу мікроклімату всередині камери.

До виконавчих механізмів системи належать нагрівальні елементи, вентилятори циркуляції повітря, витяжний вентилятор чи клапан, привід переміщення мобільного модуля та вузол керування індуктивним живленням. Кожен із цих елементів отримує сигнал від контролера та змінює свій режим роботи залежно від поточного стану сушильної камери (рисунок 3.1).

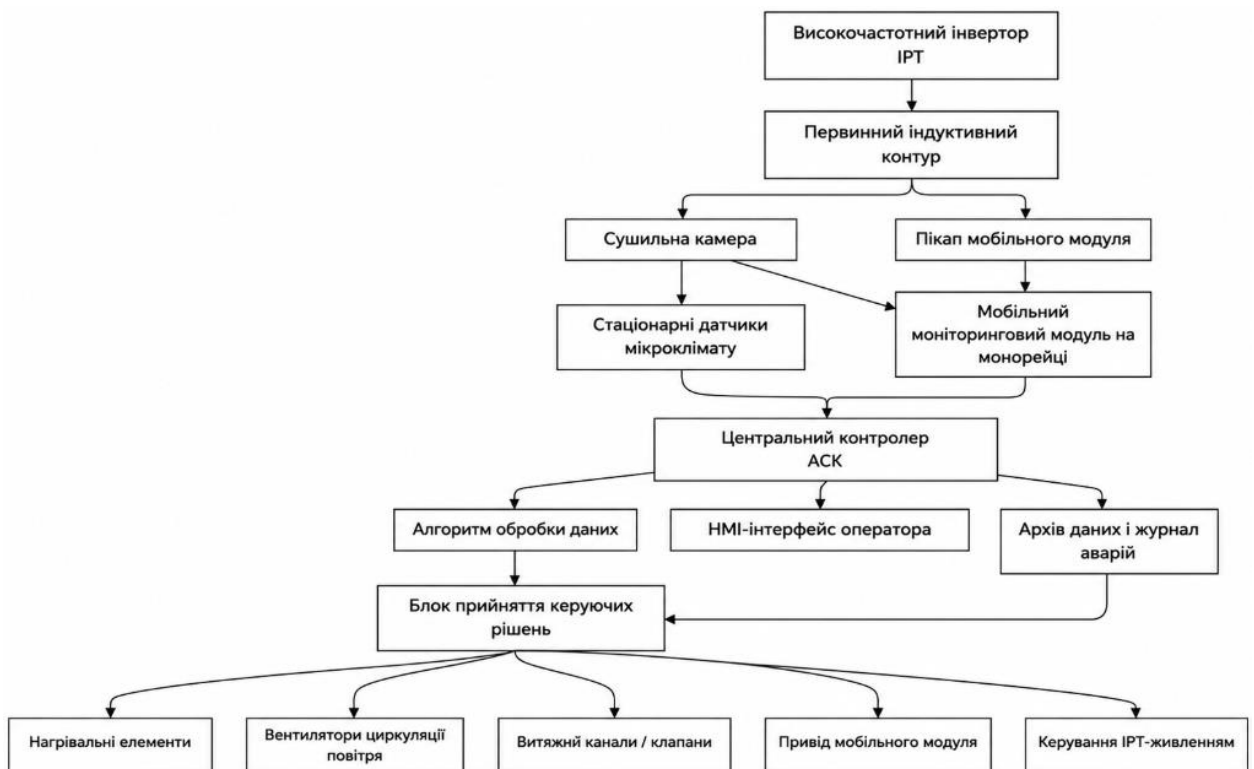


Рисунок 3.1 Загальна функціональна структура автоматизованої системи керування мікрокліматом сушильної камери

Схема показує, що автоматизована система має багаторівневу структуру. На першому рівні відбувається збирання інформації з камери. На другому рівні контролер аналізує отримані дані. На третьому рівні формуються керуючі сигнали. На четвертому рівні виконавчі механізми змінюють фізичний стан середовища. Завдяки такій побудові система може працювати в автоматичному режимі без постійного втручання оператора.

Особливу роль у структурі відіграє ІРТ-система. Вона не є окремим незалежним вузлом, а інтегрується в загальну логіку АСК. Через неї мобільний модуль отримує живлення для роботи сенсорів, контролера руху, бездротового передавача та приводу. Якщо напруга на пікапі знижується нижче допустимого рівня, центральний контролер може зменшити швидкість руху робота, або перевести його в безпечний режим.

Взаємодія між сенсорами, контролером і виконавчими механізмами побудована за принципом замкненого циклу керування. Спочатку система отримує дані про фактичний стан мікроклімату. Потім контролер порівнює ці дані із заданими параметрами сушіння. Після цього формується команда на зміну потужності нагрівача, швидкості вентилятора чи положення витяжного клапана.

Сенсорна система виконує не лише функцію вимірювання, а й функцію контролю достовірності даних. Якщо один із датчиків передає значення, яке суттєво відрізняється від інших, або виходить за допустимий фізичний діапазон, контролер не використовує його безпосередньо для керування. Таке значення позначається як підозріле, а система продовжує роботу на основі інших вимірювань. Це важливо для сушильної камери, оскільки в умовах підвищеної вологості та температури можливі короточасні збої вимірювальних каналів.

Центральний контролер обробляє інформацію у кілька етапів. Спочатку виконується приймання сигналів від датчиків. Потім дані проходять фільтрацію та усереднення. Далі визначається відхилення температури та вологості від заданих значень. Після цього алгоритм керування приймає рішення про зміну режиму роботи обладнання. Якщо температура нижча за задану, збільшується потужність нагрівача. Якщо вологість перевищує

допустимий рівень, посилюється вентиляція. Якщо параметри стабільні, система переходить в режим енергоощадного підтримання (рисунок 3.2).

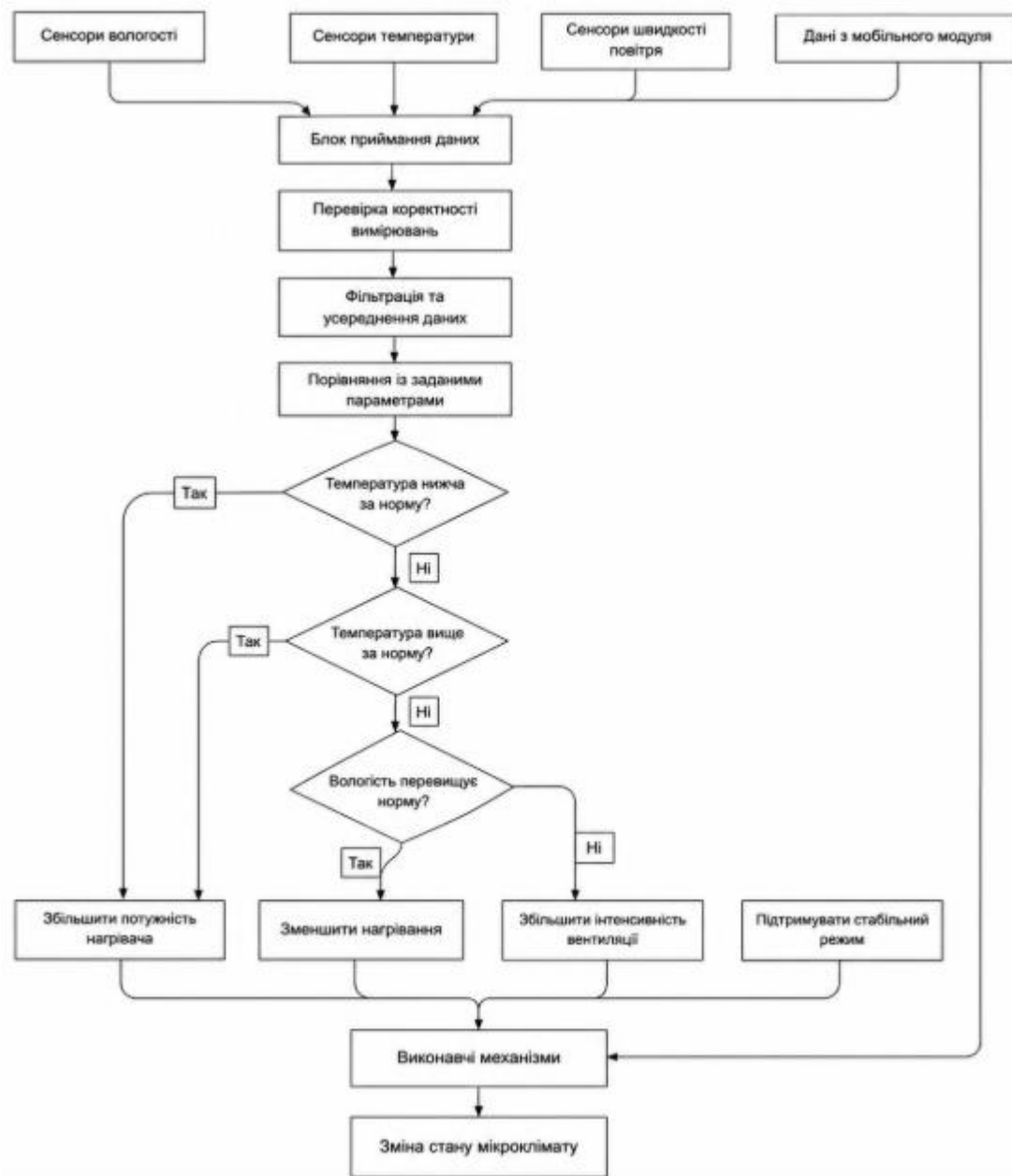


Рисунок 3.2 Логіка взаємодії сенсорів, контролера та виконавчих механізмів

В практичній реалізації така схема дозволяє уникнути хаотичного керування обладнанням. Усі команди формуються послідовно, з урахуванням поточного стану системи. Це знижує ризик перегріву рослинної сировини, пересушування окремих шарів і зайвого енергоспоживання.

Окремим елементом взаємодії є передача даних між мобільним модулем і центральним контролером. Мобільний модуль під час руху передає координату, температуру, вологість, напругу живлення, стан приводу та якість зв'язку. Центральний контролер використовує ці дані не тільки для керування мікрокліматом, а й для контролю справності самого робота.

Якщо мобільний модуль фіксує локальне підвищення вологості в окремій зоні камери, система може тимчасово збільшити вентиляцію, або змінити частоту проходження цієї зони під час наступного циклу сканування. Якщо ж у певній ділянці виявляється перегрів, контролер знижує потужність нагрівача, або коригує режим циркуляції повітря.

Інтеграція мобільного моніторингового модуля є ключовою особливістю запропонованої автоматизованої системи. На відміну від традиційної схеми, де контроль мікроклімату здійснюється лише за кількома стаціонарними точками, в цій системі робот переміщується вздовж монорейки та послідовно збирає дані з різних зон сушильної камери. Завдяки цьому контролер отримує більш точну інформацію про реальний стан середовища.

Мобільний модуль конструктивно складається з корпусу, вузла переміщення по монорейці, пікапа індуктивного живлення, стабілізатора напруги, сенсорного блока, мікроконтролера, модуля зв'язку та системи локального захисту. Пікап приймає енергію від первинного IPT-контур, після чого напруга випрямляється, стабілізується та подається на електронні вузли.

Сенсорний блок вимірює параметри мікроклімату, а мікроконтролер передає дані до центральної системи (рисунок 3.3).

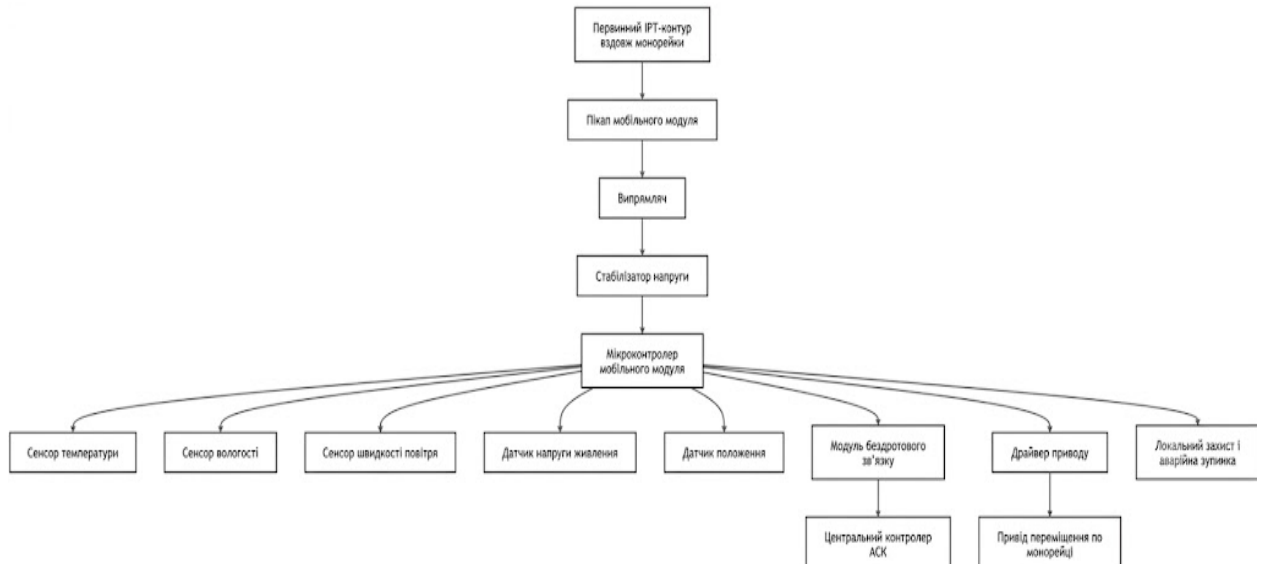


Рисунок 3.3 Структура мобільного моніторингового модуля з IPT-живленням

Робота мобільного модуля організована циклічно. Спочатку він отримує команду від центрального контролера на переміщення до певної контрольної зони. Після прибуття в точку робіт стабілізує положення, виконує вимірювання параметрів середовища, передає дані до контролера та очікує наступної команди. Якщо під час руху виявляється нестабільне живлення чи втрата зв'язку, модуль зменшує швидкість, або зупиняється в безпечному положенні (рисунок 3.4).

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
 інноваційних засобів

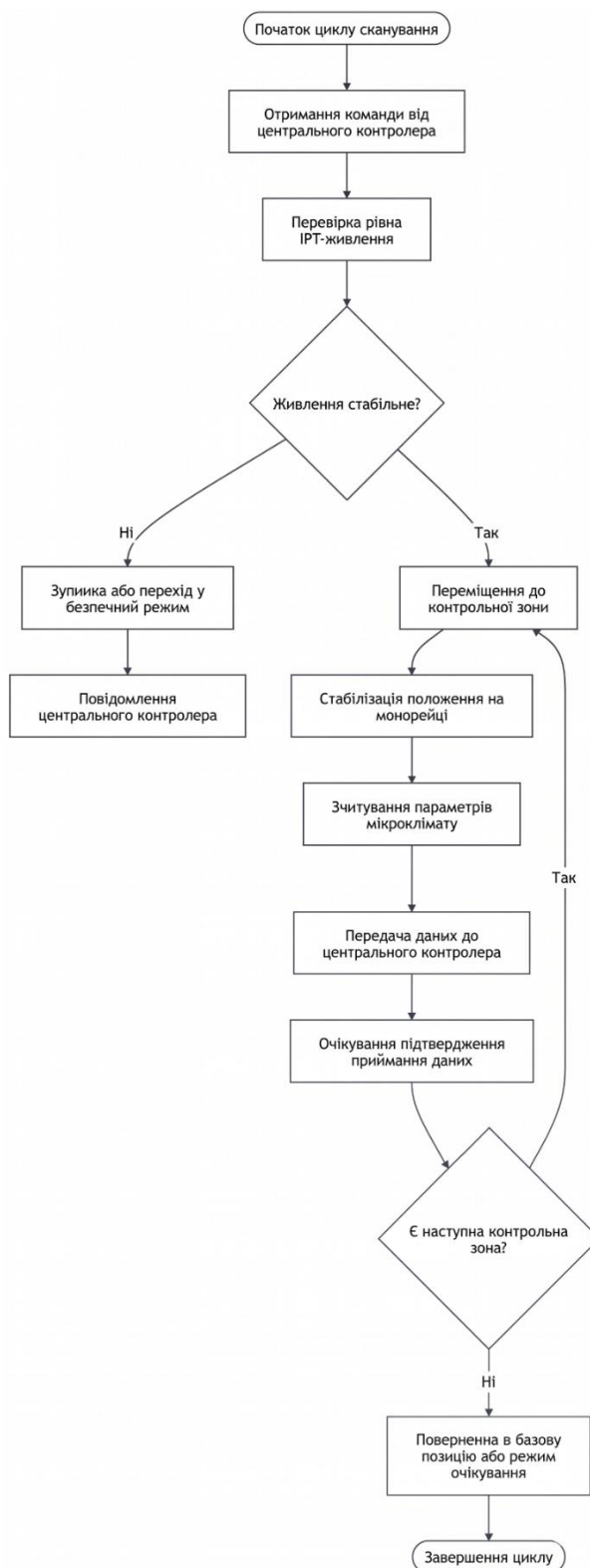


Рисунок 3.4 Цикл роботи мобільного модуля під час сканування сушильної камери

Інтеграція мобільного модуля в систему керування дозволяє реалізувати просторовий контроль мікроклімату. Це означає, що система бачить не лише середнє значення температури чи вологості, а й локальні відхилення в різних частинах камери. Така інформація є особливо важливою під час сушіння рослинної сировини, оскільки нерівномірний розподіл тепла або вологи може призводити до неоднакової якості готового продукту.

В практичному режимі центральний контролер використовує дані мобільного модуля для корекції роботи всієї сушильної установки. Якщо в одній зоні камера прогрівається повільніше, система може збільшити циркуляцію повітря або змінити режим нагрівання. Якщо в іншій зоні фіксується надлишкова вологість, контролер підсилює вентиляцію, або збільшує частоту сканування цієї ділянки.

Загалом, розроблена функціональна схема АСК поєднує стаціонарне керування сушильною камерою, мобільний моніторинг параметрів мікроклімату та безконтактне енергоживлення робота. Така структура дозволяє підвищити точність контролю, зменшити ризик локального перегріву, або перезволоження сировини, забезпечити безперервну роботу моніторингового модуля та створити основу для подальшої програмної реалізації системи керування.

3.2. Обґрунтування вибору апаратної бази: високочастотний інвертор, контролери, приводи та завадостійкі сенсори

Головним елементом автоматизованої системи є мікроконтролер, оскільки саме він виконує збір даних із сенсорів, реалізує алгоритми адаптивного керування, формує сигнали для виконавчих механізмів та забезпечує обмін інформацією з мобільним модулем. Для даної системи були

розглянуті декілька популярних платформ: Arduino Mega 2560, ESP32, STM32F4 та промислові PLC-контролери Siemens LOGO! і Siemens S7-1200.

В процесі аналізу встановлено, що Arduino Mega 2560 є достатньо простою для реалізації базових алгоритмів керування, але її продуктивність та швидкодія обмежені при одночасній роботі з великою кількістю сенсорів, бездротовим обміном даними та системою реального часу. Крім того, плата не має достатнього рівня електромагнітної стійкості для роботи поблизу високочастотного ІРТ-інвертора.

Контролери серії ESP32 мають значно вищу продуктивність та інтегровані модулі Wi-Fi і Bluetooth, що робить їх зручними для організації бездротового зв'язку між мобільним модулем та центральною системою. Однак при тривалій роботі в умовах підвищеної температури сушильної камери стабільність роботи ESP32 може погіршуватися, особливо при наявності сильних електромагнітних завад від індуктивної передачі енергії.

Найбільш доцільним рішенням для центрального контролера було обрано платформу STM32F407VG на базі ARM Cortex-M4. Цей мікроконтролер має високу швидкодію, апаратну підтримку багатоканального АЦП, велику кількість UART, SPI та I2C-інтерфейсів, а також підтримує роботу в режимі реального часу. Додатковою перевагою є висока стабільність роботи при обробці великого обсягу даних від сенсорної системи та можливість реалізації складних алгоритмів адаптивного керування.

Для мобільного моніторингового модуля було доцільно використати ESP32-WROOM-32. Це рішення дозволяє поєднати компактність, низьке енергоспоживання та наявність бездротового зв'язку в одному модулі. ESP32 використовується саме як локальний контролер мобільного робота, який

відповідає за зчитування сенсорів, передачу даних до центрального контролера та керування приводом переміщення.

У процесі вибору модулів керування також було враховано можливість подальшого масштабування системи. STM32 дозволяє реалізувати додаткові функції, такі як аварійний моніторинг, архівування параметрів, інтеграція НМІ-панелі та дистанційний контроль через локальну мережу. Тому, використання STM32 у ролі центрального контролера є більш перспективним порівняно з бюджетними платформами початкового рівня.

Для реалізації людино-машинного інтерфейсу було обрано сенсорну НМІ-панель Weintek MT8071iE. Ця панель підтримує роботу з протоколами Modbus RTU та Modbus TCP, дозволяє виводити графіки температури та вологості в реальному часі, а також забезпечує зручне налаштування параметрів сушіння без підключення додаткового комп'ютера.

Сенсорна система є одним із найважливіших елементів автоматизованої системи керування, бо саме від точності вимірювання залежить стабільність процесу сушіння та якість готової рослинної сировини. Для роботи в сушильній камері сенсори повинні забезпечувати стабільні вимірювання в умовах підвищеної температури, змінної вологості та постійного повітряного потоку.

Для вимірювання температури було розглянуто датчики DS18B20, DHT22, SHT31 та промислові термодатчики PT100. У результаті аналізу найбільш доцільним рішенням для стаціонарних вимірювань обрано PT100 у металевому захисному виконанні. Такі датчики характеризуються високою точністю, стійкістю до температурних навантажень та стабільністю показників упродовж тривалої експлуатації. Вони можуть працювати при

температурах значно вищих за робочий діапазон сушильної камери та мають низьку похибку вимірювання.

Для мобільного моніторингового модуля більш доцільним виявився цифровий сенсор SHT31. Він поєднує в одному корпусі вимірювання температури та відносної вологості, має швидкий інтерфейс I2C, компактні розміри та достатню точність для системи моніторингу мікроклімату. Додатковою перевагою є вбудована температурна компенсація та висока швидкість оновлення даних.

Датчики DHT22 були відхилені через недостатню стабільність показників при тривалій роботі в умовах високої вологості. Крім того, вони мають нижчу швидкість опитування та більшу похибку вимірювання порівняно з SHT31.

Для контролю швидкості повітряного потоку було обрано цифровий сенсор FS3000-1015. Він дозволяє вимірювати швидкість циркуляції повітря всередині сушильної камери та контролювати ефективність роботи вентиляційної системи. Це особливо важливо для рівномірного сушіння рослинної сировини, так як недостатня циркуляція повітря може призводити до локального накопичення вологи.

Для контролю стану IPT-живлення мобільного модуля було використано модулі INA219, які дозволяють вимірювати напругу, струм та потужність у режимі реального часу. Завдяки цьому центральний контролер може оцінювати стабільність індуктивного живлення та виявляти зниження ефективності передачі енергії.

Окрему увагу було приділено завадостійкості сенсорної системи. Оскільки поблизу працює високочастотний інвертор IPT-системи, сенсори повинні бути стійкими до електромагнітних завад. Тому, для критичних

каналів вимірювання використовуються екрановані кабелі, цифрові інтерфейси зв'язку та рознесення сигнальних і силових ліній у різних частинах конструкції.

Для забезпечення роботи індуктивної передачі енергії та виконавчих механізмів необхідно використати силові компоненти, здатні працювати в умовах високочастотного навантаження та тривалого безперервного режиму. Основним силовим вузлом системи є високочастотний інвертор ІРТ-живлення, який формує змінне електромагнітне поле для передачі енергії мобільному модулю.

Для побудови інвертора було розглянуто MOSFET-транзистори IRF3205, IRFP260N та сучасні GaN-компоненти. У результаті аналізу найбільш доцільним рішенням для даної системи було обрано IRFP260N. Ці транзистори мають високу допустиму напругу, достатній запас по струму та стабільно працюють у високочастотних режимах. Крім того, вони добре підходять для побудови резонансного інвертора середньої потужності.

Для керування силовими MOSFET було обрано драйвер IR2110, який забезпечує швидке перемикання транзисторів та стабільну роботу мостової схеми інвертора. Використання такого драйвера дозволяє зменшити втрати при перемиканні та підвищити ефективність ІРТ-системи.

В ролі джерела живлення системи було прийнято використання імпульсного блока Mean Well LRS-350-24. Цей блок забезпечує стабільну напругу 24 В, має вбудований захист від перевантаження та короткого замикання, а також характеризується високою надійністю при тривалій безперервній роботі.

Для приводу переміщення мобільного модуля було розглянуто крокові двигуни NEMA17, сервоприводи та редукторні DC-мотори. В процесі аналізу

встановлено, що найбільш доцільним рішенням є використання крокового двигуна NEMA17 у поєднанні з драйвером TMC2209. Така конфігурація забезпечує плавний рух, низький рівень вібрацій та достатню точність позиціонування мобільного модуля на монорейці.

Використання драйвера TMC2209 дозволяє реалізувати мікрокроковий режим керування, завдяки чому рух робота стає більш плавним, а механічні коливання під час сканування значно зменшуються. Це особливо важливо для стабільності роботи сенсорної системи та підтримання точного положення пікапа відносно первинного індуктивного контуру.

Для керування вентиляторами сушильної камери було обрано промислові ЕС-вентилятори ebm-papst серії RadiCal. Вони мають високий коефіцієнт корисної дії, підтримують плавне регулювання швидкості та забезпечують стабільну циркуляцію повітря навіть у тривалому режимі роботи.

В результаті проведеного аналізу було сформовано апаратну базу автоматизованої системи керування, яка поєднує високопродуктивний центральний контролер STM32, мобільний модуль на базі ESP32, промислові сенсори мікроклімату, високочастотний ІПТ-інвертор, силові MOSFET-компоненти, енергоефективні вентилятори та прецизійний привід монорейкового робота. Запропонована конфігурація забезпечує стабільну роботу системи в умовах сушильної камери, підтримує безперервний моніторинг мікроклімату та створює основу для подальшої програмної реалізації автоматизованого керування процесом сушіння рослинної сировини.

3.3. Програмна реалізація логіки PID-регулювання та алгоритмів бездротового обміну даними

У практичній реалізації програмна логіка поділяється на три взаємопов'язані частини. Перша частина відповідає за PID-регулювання температури та вологості. Друга частина імітує бездротовий обмін даними між мобільним модулем і центральним вузлом керування. Третя частина виконує моніторинг стану системи, фіксує аварійні події та формує реакцію на небезпечні режими. Такий спосіб дозволяє побудувати програму не як окремий набір команд, а як цілісну систему автоматизованого керування сушильною камерою.

Для керування мікрокліматом сушильної камери було реалізовано алгоритм PID-регулювання. У програмній моделі він використовується для формування керуючих сигналів нагрівача та вентилятора. Температурний контур відповідає за підтримання заданої температури сушіння, а вологісний контур відповідає за поступове зниження вологості до заданого рівня. На практиці це означає, що нагрівач активніше працює тоді, коли температура нижча за норму, а вентилятор посилює роботу тоді, коли вологість у камері перевищує допустиме значення.

У програмі PID-регулятор реалізований як окремий клас. Це дозволяє використовувати однакову структуру для різних каналів керування. Для температури застосовується один регулятор, для вологості – інший. Кожен із них отримує задане значення, фактичне значення та часовий крок моделювання, після чого формує керуючий сигнал у відсотках. Для уникнення надмірного керування вихідний сигнал обмежується в межах від 0 до 100 %.

Це відповідає практичній роботі обладнання, де нагрівач і вентилятор не можуть працювати нижче мінімальної, або вище максимальної потужності.

У програмній логіці, також, враховано інерційність сушильної камери. Після зміни потужності нагрівача температура не змінюється миттєво, а поступово наближається до нового значення. Так само вологість не знижується одразу після ввімкнення вентилятора, оскільки процес видалення вологи залежить від стану сировини, швидкості циркуляції повітря та температури в камері. Тому, в програмі використано спрощену динамічну модель сушильної камери, яка дозволяє побачити, як система поводить себе в часі.

В роботі алгоритму важливим є те, що система не просто підтримує одну температуру, а реагує на відхилення, збурення та зміну стану середовища. Наприклад, якщо під час сушіння виникає короткочасне падіння температури, PID-регулятор збільшує потужність нагрівача. Якщо зростає вологість, система посилює вентиляцію. Якщо параметри стабілізуються, керуючі сигнали поступово зменшуються, що дозволяє знизити енергоспоживання та уникнути перегріву рослинної сировини.

Бездротовий обмін даними в розробленій системі використовується для зв'язку між мобільним моніторинговим модулем і центральним контролером. Мобільний модуль під час руху передає показники температури, вологості, координату в камері, напругу живлення від IPT-системи та рівень якості зв'язку. Центральний контролер приймає ці дані, перевіряє їх достовірність і використовує для корекції режиму керування.

У програмній реалізації бездротовий обмін подано у вигляді імітації пакетної передачі даних. Кожен пакет містить час вимірювання, номер зони сушильної камери, температуру, вологість, напругу живлення мобільного

модуля та показник RSSI, який характеризує рівень сигналу. Такий формат дозволяє оцінювати не лише мікроклімат, а й технічний стан каналу зв'язку. Якщо якість сигналу знижується, або пакет даних втрачається, система фіксує попередження.

В реальній системі така логіка може бути реалізована через Wi-Fi, ESP-NOW, LoRa чи інший канал передавання даних. В межах програмної частини важливо показати сам принцип роботи: мобільний вузол формує пакет, центральний вузол приймає його, перевіряє коректність, після чого використовує отриману інформацію для керування. Якщо дані не надходять протягом певного часу, система переходить в безпечний режим, або продовжує роботу за стаціонарними датчиками.

В програмі передбачено випадкові коливання температури й вологості в різних зонах камери, що імітує реальну нерівномірність мікроклімату. Також, моделюється зміна якості зв'язку та напруги живлення мобільного модуля. Завдяки цьому можна перевірити, як система реагує не тільки на зміну температури й вологості, а й на технічні проблеми мобільного вузла.

Моніторинг і аварійне реагування є важливою частиною програмної реалізації, оскільки сушильна камера працює з нагрівальними елементами, вентиляторами та електронними вузлами живлення. У програмі передбачено контроль перевищення температури, надмірної вологості, зниження напруги живлення мобільного модуля, втрати зв'язку та критичних відхилень параметрів мікроклімату.

Якщо температура перевищує допустиму межу, система знижує потужність нагрівача та збільшує інтенсивність вентиляції. Якщо вологість залишається високою, вентилятор працює активніше. Якщо напруга живлення мобільного модуля знижується, програма фіксує попередження про

нестабільність ІРТ-живлення. Якщо якість зв'язку стає недостатньою, система позначає це як ризик втрати даних від мобільного модуля.

Результатом роботи програми є набір графіків, які демонструють зміну температури, вологості, керуючих сигналів, напруги мобільного модуля, якості зв'язку та аварійних подій. Такі графіки можна використати в роботі як підтвердження працездатності програмної логіки автоматизованої системи керування.

Нижче наведено повний код програмної реалізації:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from dataclasses import dataclass
import random

np.random.seed(42)
random.seed(42)

class PIDController:
    def __init__(self, kp, ki, kd, setpoint, output_min=0,
output_max=100):
        self.kp = kp
        self.ki = ki
        self.kd = kd
        self.setpoint = setpoint
        self.output_min = output_min
        self.output_max = output_max
        self.integral = 0
        self.prev_error = 0

    def update(self, measured_value, dt):
        error = self.setpoint - measured_value
        self.integral += error * dt
        derivative = (error - self.prev_error) / dt

        output = (
```

```
        self.kp * error
        + self.ki * self.integral
        + self.kd * derivative
    )

    self.prev_error = error

    if output > self.output_max:
        output = self.output_max
    elif output < self.output_min:
        output = self.output_min

    return output

@dataclass
class WirelessPacket:
    time_s: int
    zone: int
    temperature: float
    humidity: float
    ipt_voltage: float
    rssi: float
    packet_lost: bool

class MobileMonitoringModule:
    def __init__(self, zones_count=5):
        self.zones_count = zones_count
        self.current_zone = 1

    def move_to_next_zone(self):
        self.current_zone += 1
        if self.current_zone > self.zones_count:
            self.current_zone = 1

    def generate_packet(self, time_s, base_temp,
base_humidity):
        zone_offset_temp = np.random.normal(0, 0.7)
        zone_offset_hum = np.random.normal(0, 2.2)
```

```
measured_temp = base_temp + zone_offset_temp
measured_humidity = base_humidity + zone_offset_hum

ipt_voltage = 24 + np.random.normal(0, 0.45)
rssi = -48 + np.random.normal(0, 5)

packet_lost = False

if random.random() < 0.025:
    packet_lost = True

packet = WirelessPacket(
    time_s=time_s,
    zone=self.current_zone,
    temperature=measured_temp,
    humidity=measured_humidity,
    ipt_voltage=ipt_voltage,
    rssi=rssi,
    packet_lost=packet_lost
)

self.move_to_next_zone()

return packet

simulation_time = 900
dt = 1
time = np.arange(0, simulation_time + dt, dt)

target_temperature = 40.0
target_humidity = 35.0

temperature = np.zeros(len(time))
humidity = np.zeros(len(time))

temperature[0] = 24.0
humidity[0] = 68.0

heater_power = np.zeros(len(time))
```

```
fan_power = np.zeros(len(time))

ipt_voltage_log = np.zeros(len(time))
rssi_log = np.zeros(len(time))
zone_log = np.zeros(len(time))
packet_lost_log = np.zeros(len(time))

alarm_overheat = np.zeros(len(time))
alarm_high_humidity = np.zeros(len(time))
alarm_low_voltage = np.zeros(len(time))
alarm_communication = np.zeros(len(time))

temperature_pid = PIDController(
    kp=5.2,
    ki=0.018,
    kd=1.8,
    setpoint=target_temperature,
    output_min=0,
    output_max=100
)

humidity_pid = PIDController(
    kp=3.8,
    ki=0.014,
    kd=1.1,
    setpoint=target_humidity,
    output_min=0,
    output_max=100
)

mobile_module = MobileMonitoringModule(zones_count=5)

last_valid_temp = temperature[0]
last_valid_humidity = humidity[0]

for i in range(1, len(time)):

    current_time = int(time[i])
```

```
temp_disturbance = 0
humidity_disturbance = 0

if 360 <= current_time <= 460:
    temp_disturbance = -2.8
    humidity_disturbance = 5.5

if 650 <= current_time <= 720:
    temp_disturbance = 1.8
    humidity_disturbance = 3.0

packet = mobile_module.generate_packet(
    current_time,
    temperature[i - 1],
    humidity[i - 1]
)

zone_log[i] = packet.zone
packet_lost_log[i] = 1 if packet.packet_lost else 0

if packet.packet_lost:
    alarm_communication[i] = 1
    measured_temp = last_valid_temp
    measured_humidity = last_valid_humidity
    ipt_voltage_log[i] = ipt_voltage_log[i - 1]
    rssi_log[i] = rssi_log[i - 1]
else:
    measured_temp = packet.temperature
    measured_humidity = packet.humidity
    last_valid_temp = measured_temp
    last_valid_humidity = measured_humidity
    ipt_voltage_log[i] = packet.ipt_voltage
    rssi_log[i] = packet.rssi

heater = temperature_pid.update(measured_temp, dt)

humidity_error = measured_humidity - target_humidity

fan_from_humidity = (
```

```
        humidity_pid.kp * humidity_error
        + humidity_pid.ki * humidity_pid.integral
        + humidity_pid.kd * (humidity_error -
humidity_pid.prev_error)
    )

    humidity_pid.integral += humidity_error * dt
    humidity_pid.prev_error = humidity_error

    if fan_from_humidity < 0:
        fan_from_humidity = 0
    if fan_from_humidity > 100:
        fan_from_humidity = 100

    if measured_temp > target_temperature + 2:
        fan = max(fan_from_humidity, 75)
        heater *= 0.35
    else:
        fan = max(fan_from_humidity, 18)

    if measured_temp > 46:
        alarm_overheat[i] = 1
        heater = 0
        fan = 100

    if measured_humidity > 58:
        alarm_high_humidity[i] = 1
        fan = max(fan, 90)

    if ipt_voltage_log[i] < 22.5:
        alarm_low_voltage[i] = 1

    if rssi_log[i] < -65:
        alarm_communication[i] = 1

    heater_power[i] = heater
    fan_power[i] = fan

    temperature[i] = (
```

```
temperature[i - 1]
+ 0.020 * heater_power[i]
- 0.012 * fan_power[i]
- 0.018 * (temperature[i - 1] - 22)
+ 0.015 * (humidity[i - 1] - target_humidity)
+ temp_disturbance * 0.05
+ np.random.normal(0, 0.05)
)

humidity[i] = (
    humidity[i - 1]
    - 0.030 * fan_power[i]
    - 0.010 * (temperature[i - 1] - 25)
    + 0.018 * (70 - humidity[i - 1])
    + humidity_disturbance * 0.04
    + np.random.normal(0, 0.12)
)

temperature[i] = np.clip(temperature[i], 15, 60)
humidity[i] = np.clip(humidity[i], 10, 90)

ipt_voltage_log[0] = ipt_voltage_log[1]
rssi_log[0] = rssi_log[1]
zone_log[0] = 1

results = pd.DataFrame({
    "time_s": time,
    "temperature_C": temperature,
    "humidity_percent": humidity,
    "heater_power_percent": heater_power,
    "fan_power_percent": fan_power,
    "ipt_voltage_V": ipt_voltage_log,
    "rssi_dBm": rssi_log,
    "zone": zone_log,
    "packet_lost": packet_lost_log,
    "alarm_overheat": alarm_overheat,
    "alarm_high_humidity": alarm_high_humidity,
    "alarm_low_voltage": alarm_low_voltage,
    "alarm_communication": alarm_communication
```

```
})

print("Перші 10 рядків журналу роботи системи:")
display(results.head(10))

print("\nПідсумок аварійних подій:")
print("Перегрів:", int(results["alarm_overheat"].sum()),
      "подій")
print("Підвищена вологість:",
      int(results["alarm_high_humidity"].sum()), "подій")
print("Зниження IPT-живлення:",
      int(results["alarm_low_voltage"].sum()), "подій")
print("Проблеми зв'язку:",
      int(results["alarm_communication"].sum()), "подій")

plt.figure(figsize=(14, 6))
plt.plot(time, temperature, linewidth=2, label="Фактична температура")
plt.axhline(target_temperature, linestyle="--", linewidth=2,
            label="Задана температура")
plt.xlabel("Час, с")
plt.ylabel("Температура, °C")
plt.title("PID-регулювання температури в сушильній камері")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

plt.figure(figsize=(14, 6))
plt.plot(time, humidity, linewidth=2, label="Фактична вологість")
plt.axhline(target_humidity, linestyle="--", linewidth=2,
            label="Задана вологість")
plt.xlabel("Час, с")
plt.ylabel("Відносна вологість, %")
plt.title("Регулювання вологості в сушильній камері")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()
```

```
plt.figure(figsize=(14, 6))
plt.plot(time, heater_power, linewidth=2, label="Потужність
нагрівача")
plt.plot(time, fan_power, linewidth=2, label="Інтенсивність
вентилятора")
plt.xlabel("Час, с")
plt.ylabel("Керуючий сигнал, %")
plt.title("Керуючі сигнали PID-регуляторів")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

plt.figure(figsize=(14, 6))
plt.plot(time, ipt_voltage_log, linewidth=2, label="Напруга
ІРТ-живлення")
plt.axhline(22.5, linestyle="--", linewidth=2, label="Нижня
допустима межа")
plt.xlabel("Час, с")
plt.ylabel("Напруга, В")
plt.title("Контроль напруги живлення мобільного модуля")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

plt.figure(figsize=(14, 6))
plt.plot(time, rssi_log, linewidth=2, label="RSSI каналу
зв'язку")
plt.axhline(-65, linestyle="--", linewidth=2,
label="Критична межа зв'язку")
plt.xlabel("Час, с")
plt.ylabel("RSSI, dBm")
plt.title("Моніторинг якості бездротового зв'язку")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

plt.figure(figsize=(14, 6))
plt.plot(time, alarm_overheat, linewidth=2,
label="Перегрів")
```

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
 інноваційних засобів

```
plt.plot(time, alarm_high_humidity, linewidth=2,
label="Підвищена вологість")
plt.plot(time, alarm_low_voltage, linewidth=2, label="Низька
напруга IPT")
plt.plot(time, alarm_communication, linewidth=2,
label="Проблема зв'язку")
plt.xlabel("Час, с")
plt.ylabel("Стан аварії")
plt.title("Журнал аварійних і попереджувальних подій")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

results.to_csv("microclimate_control_log.csv", index=False,
encoding="utf-8-sig")
print("\nЖурнал роботи системи збережено у файл:
microclimate_control_log.csv")
```

В результаті виконання програми формується журнал роботи системи, в якому фіксуються температура, вологість, потужність нагрівача, інтенсивність вентилятора, напруга живлення мобільного модуля, рівень бездротового сигналу та аварійні події (рисунок 3.5). За графіком температури можна оцінити, як PID-регулятор поступово виводить камеру до заданого режиму та компенсує короткочасні збурення (рисунок 3.6).

Перші 10 рядків журналу роботи системи:

	time_s	temperature_C	humidity_percent	heater_power_percent	fan_power_percent	ipt_voltage_V	rssi_dBm	zone	packet_lost	alarm_overheat	alarm_high_humidity	alarm_low_voltage	alarm_comm
0	0	24.000000	68.000000	0.000000	0.000000	24.291460	-40.384851	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	25.247292	65.017904	100.000000	100.000000	24.291460	-40.384851	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
2	2	25.773620	62.049221	67.884063	100.000000	23.788737	-45.287200	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
3	3	26.617790	59.884085	74.614397	77.940764	23.223787	-50.811438	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	4	27.394749	57.394881	73.854913	82.804769	24.659542	-49.128882	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	5	27.880281	54.907756	66.938638	88.502211	23.482053	-46.121510	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	6	28.298773	52.170433	65.903251	94.455974	23.993926	-53.288555	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
7	7	29.214416	51.314708	60.011734	38.807805	23.402316	-47.015694	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	8	29.670575	49.788451	57.162543	64.910095	23.334685	-51.599221	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	9	30.317461	49.014400	53.139897	38.818459	24.145838	-49.925411	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Підсумок аварійних подій:
 Перегрів: 0 подій
 Підвищена вологість: 3 подій
 Зниження IPT-живлення: 0 подій
 Проблеми зв'язку: 20 подій

Рисунок 3.5 Журнал роботи системи

Графік вологості показує, що система поступово знижує рівень вологості до заданого значення, не допускаючи різких стрибків керування (рисунок 3.7).

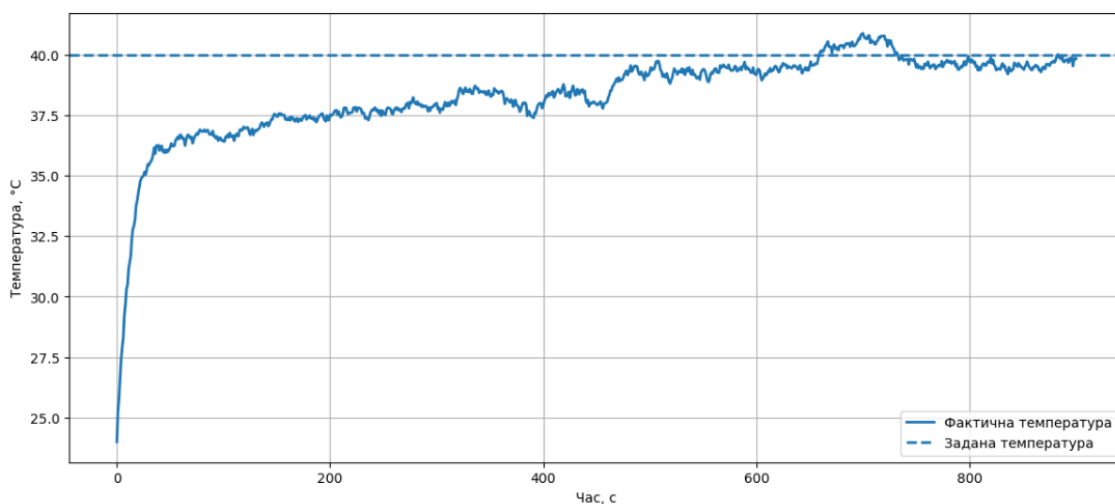


Рисунок 3.6 Регулювання температури в сушильній камері

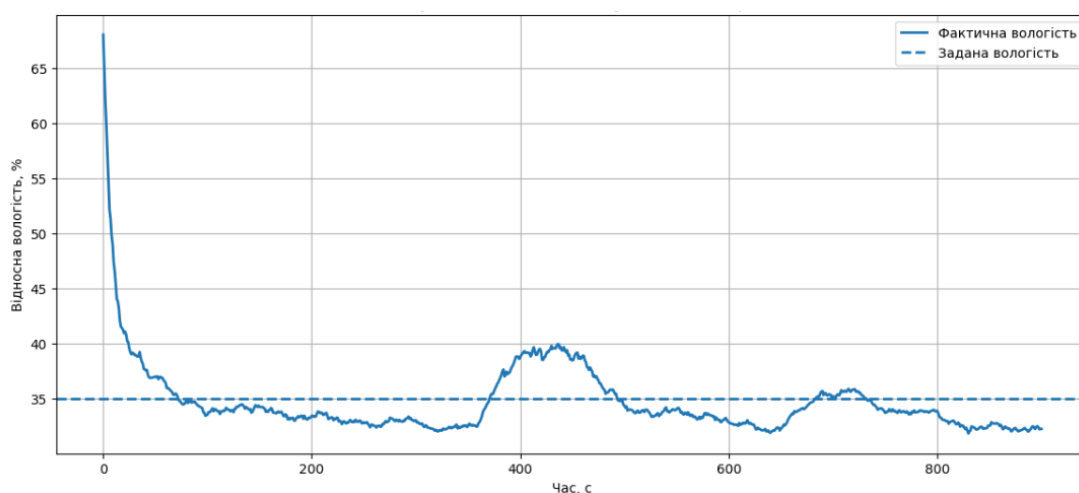


Рисунок 3.7 Регулювання вологості в сушильній камері

Графік керуючих сигналів демонструє практичну роботу нагрівача та вентилятора. На початковому етапі нагрівач працює активніше, бо камера ще

не досягла заданої температури. В міру стабілізації температури його потужність зменшується. Вентилятор змінює інтенсивність залежно від вологості та аварійних умов. Окремі графіки напруги IPT-живлення та RSSI показують технічний стан мобільного модуля й каналу зв'язку (рисунки 3.8 – 3.11).

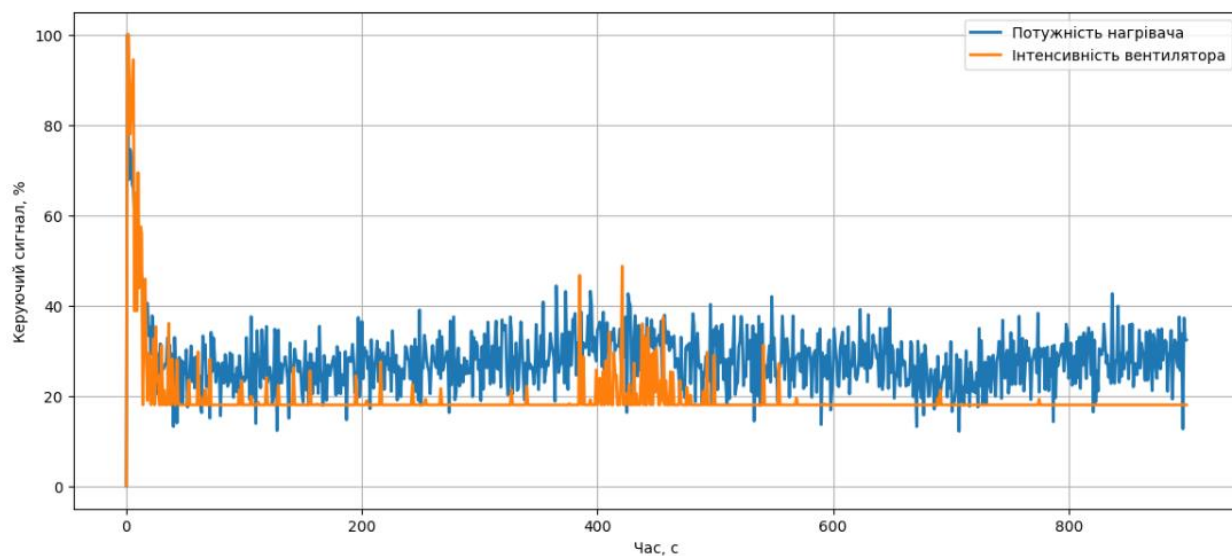


Рисунок 3.8 Керуючі сигнали PID-регуляторів

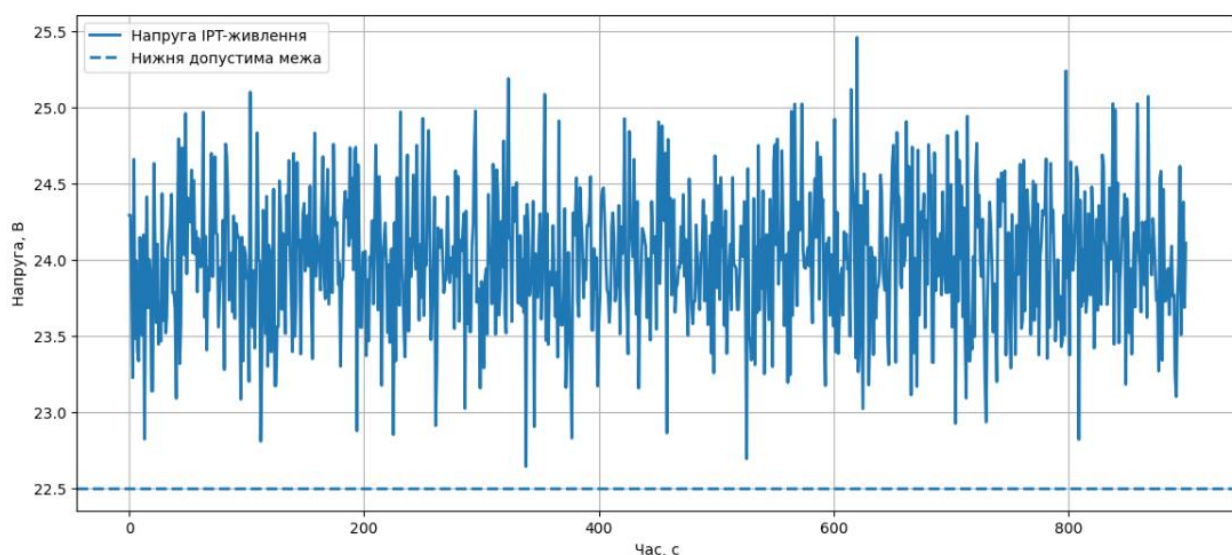


Рисунок 3.9 Контроль напруги живлення мобільного модуля

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
інноваційних засобів

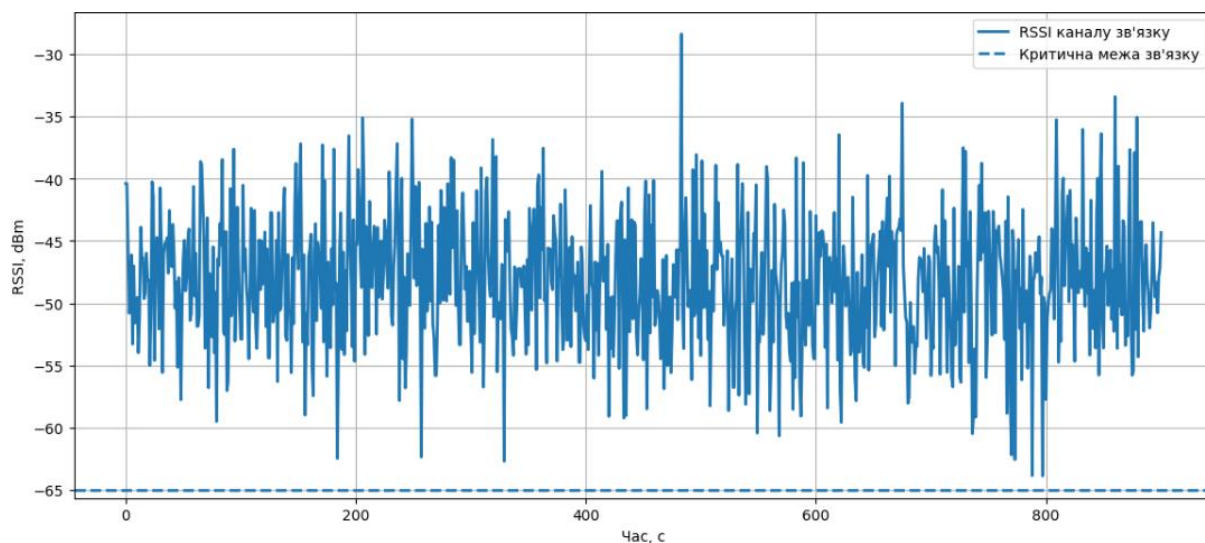


Рисунок 3.10 Моніторинг якості бездротового зв'язку

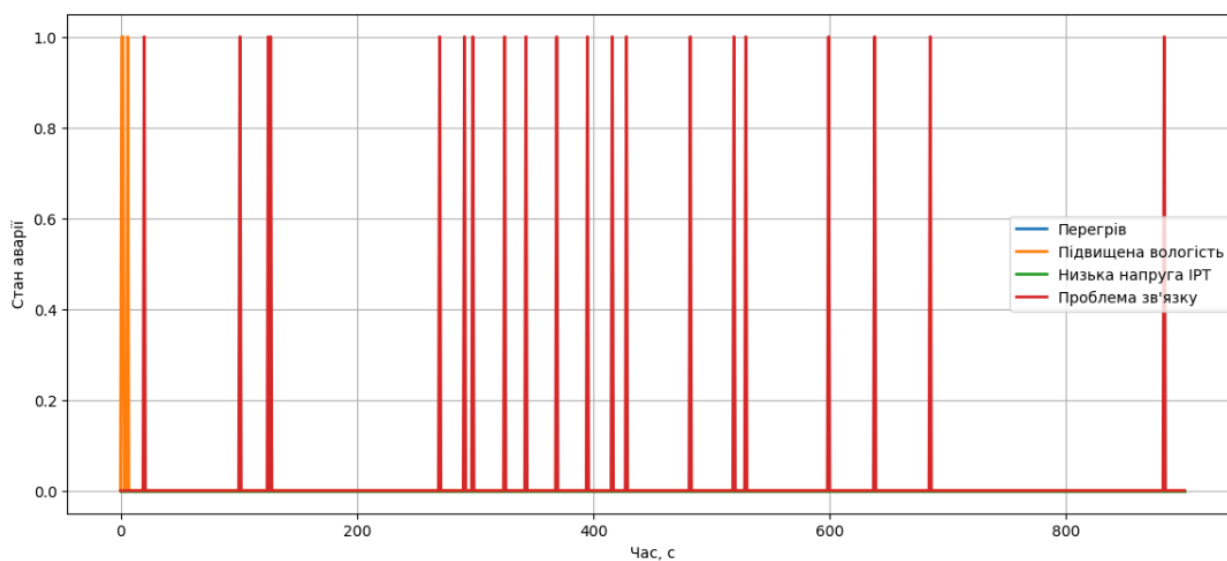


Рисунок 3.11 Журнал аварійних і попереджувальних подій

Загалом, розроблена програмна реалізація забезпечує повний цикл роботи автоматизованої системи: отримання даних від мобільного вузла, PID-регулювання мікроклімату, контроль живлення, перевірку якості зв'язку, аварійне реагування та збереження журналу параметрів. Така структура може бути використана як основа для подальшої інтеграції з реальними

мікроконтролерами, сенсорами, виконавчими механізмами та НМІ-інтерфейсом.

3.5. Створення людино-машинного інтерфейсу (НМІ) для візуалізації параметрів мікроклімату та стану енергосистеми

Структура інтерфейсу побудована так, щоб оператор одразу бачив основні параметри системи без переходу між великою кількістю вікон. У верхній частині розміщується загальний статус роботи камери, поточна температура, вологість, напруга ІРТ-живлення та рівень бездротового сигналу. Нижче розміщуються графіки, які повторюють логіку попереднього програмного підрозділу: температура, вологість, керуючі сигнали нагрівача й вентилятора, енергоживлення мобільного модуля та аварійні події.

Такий інтерфейс є зручним для практичної експлуатації, бо оператор може одночасно контролювати і технологічний процес сушіння, і технічний стан мобільного робототехнічного модуля. В разі появи аварії відповідне повідомлення виводиться окремим блоком, а статус системи змінюється на попереджувальний, або аварійний.

Візуалізація параметрів реалізована у вигляді інформаційних карток і графіків. Картки показують поточні значення температури, вологості, потужності нагрівача, інтенсивності вентилятора, напруги ІРТ-живлення та якості зв'язку. Графіки дозволяють оцінити динаміку процесу в часі та побачити, як система реагує на зміну мікроклімату.

Особливу увагу приділено графіку керуючих сигналів, оскільки він показує фактичну роботу PID-регулювання. Якщо температура нижча за задану, зростає потужність нагрівача. Якщо вологість підвищена, активніше

174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 Автоматизована система управління мікрокліматом для камер сушки лікарських рослин на основі
 інноваційних засобів

працює вентилятор. Окремий графік ІРТ-живлення дозволяє контролювати стабільність живлення мобільного модуля (рисунок 3.12).

Система повідомлень у НМІ-інтерфейсі призначена для швидкого інформування оператора про нестандартні ситуації. До таких ситуацій належать перегрів камери, підвищена вологість, зниження напруги ІРТ-живлення, погіршення бездротового зв'язку або втрата пакета даних від мобільного модуля. Всі події відображаються в журналі повідомлень із зазначенням часу.

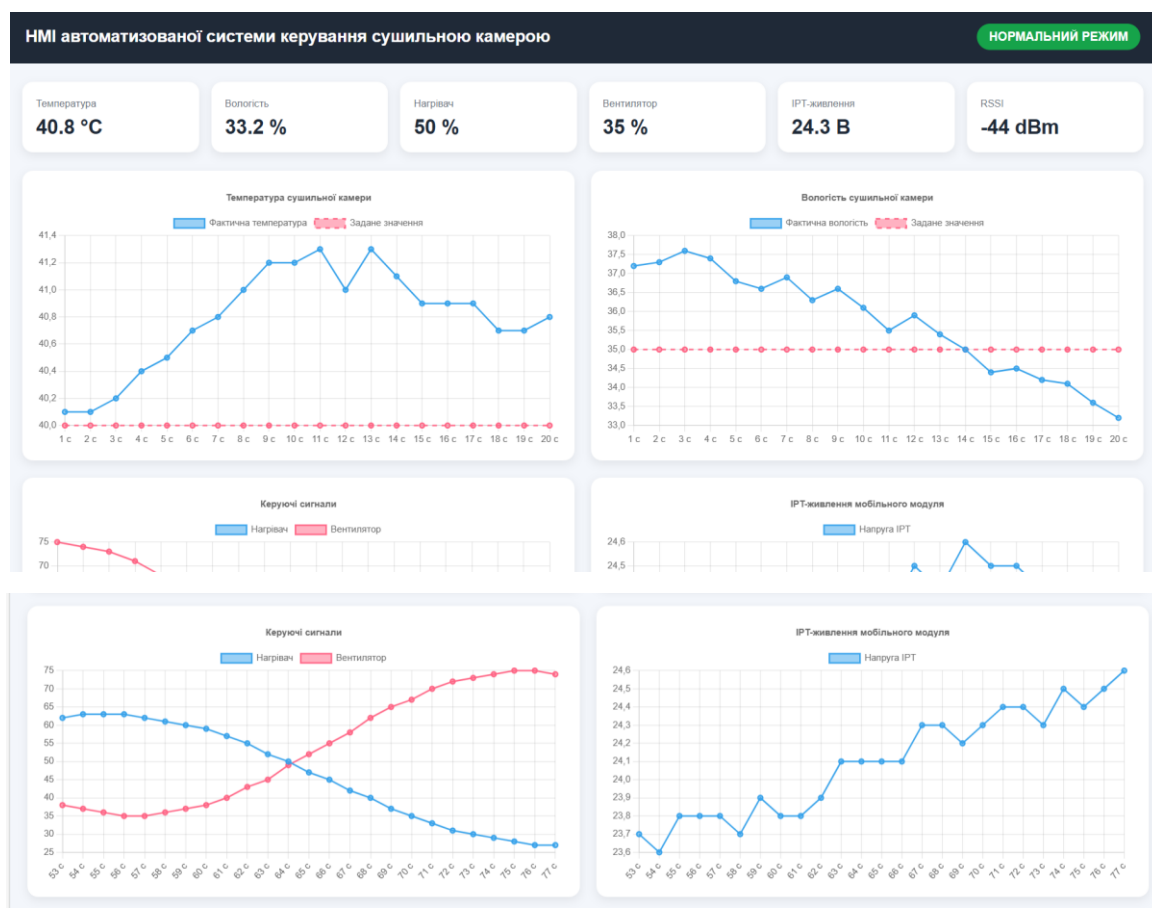


Рисунок 3.12 Графіки в реальному часі

Архівація даних реалізована у вигляді таблиці останніх вимірювань (рисунок 3.13). В ній зберігаються температура, вологість, потужність

нагрівача, інтенсивність вентилятора, напруга живлення та статус системи. Такий спосіб дозволяє аналізувати роботу сушильної камери після завершення циклу сушіння.

The screenshot displays two panels. The left panel, titled 'Журнал аварійних повідомлень' (Emergency Log), contains a green message box stating 'Аварійних подій не виявлено' (No emergency events detected). The right panel, titled 'Архів останніх вимірювань' (Archive of recent measurements), contains a table with the following data:

Час	Т, °С	Н, %	ІРТ, В	Стан
120 с	40.7	37.0	23.7	НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ
119 с	40.8	36.6	23.6	НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ
118 с	41.0	37.4	23.6	НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ
117 с	41.1	37.4	23.5	НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ
116 с	41.1	37.5	23.5	НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ
115 с	41.1	37.6	23.6	НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ
114 с	41.0	37.4	23.6	НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ
113 с	41.2	37.7	23.5	НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ

Рисунок 3.13 Архівація даних

Отже, розроблений НМІ-інтерфейс забезпечує зручне спостереження за роботою сушильної камери, відображає основні технологічні параметри, показує стан ІРТ-живлення мобільного модуля, фіксує аварійні події та формує архів останніх вимірювань. Така структура є достатньою для практичної демонстрації роботи автоматизованої системи керування мікрокліматом.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено технічну структуру автоматизованої системи керування мікрокліматом із використанням мобільного моніторингового модуля та технології індуктивної передачі енергії. Сформовано функціональну схему системи, визначено взаємодію між сенсорними вузлами, центральним контролером, виконавчими механізмами та мобільним робототехнічним модулем.

Виконано обґрунтування вибору апаратної бази системи, включаючи мікроконтролери, сенсори температури та вологості, високочастотний ІРТ-інвертор, приводи переміщення та засоби бездротового зв'язку. Розроблено принципові рішення для живлення та керування мобільним модулем, що забезпечують стабільну роботу системи в умовах сушильної камери.

Створено програмне забезпечення для реалізації PID-регулювання параметрів мікроклімату, бездротового обміну даними та аварійного моніторингу стану обладнання. Також, розроблено людино-машинний інтерфейс, який забезпечує візуалізацію технологічних параметрів, архівацію даних та оперативне інформування оператора про стан системи. Отримані результати підтвердили можливість практичної реалізації запропонованої автоматизованої системи та її ефективного використання для керування процесом сушіння рослинної сировини.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Аналіз небезпечних факторів при експлуатації камер сушки та високовольтних ІРТ-інверторів

Під час експлуатації автоматизованих сушильних камер із системами індуктивної передачі енергії персонал працює в умовах впливу підвищених температур, електротехнічного обладнання, електромагнітних полів, рухомих механізмів та високої концентрації сухих органічних частинок. Тому, під час проєктування системи особлива увага приділяється аналізу виробничих небезпек, оцінці впливу фізичних факторів на персонал та визначенню ризиків аварійних режимів роботи обладнання.

В процесі роботи сушильної установки найбільше навантаження припадає на зони нагрівання повітря, блок високочастотного ІРТ-інвертора, вентиляційні вузли, систему електроживлення та мобільний робототехнічний модуль. Всі ці елементи функціонують одночасно, тому навіть незначне порушення режиму роботи може призвести до підвищення температури, перевантаження електричних компонентів, або погіршення умов праці персоналу.

У межах проведеного аналізу встановлено, що основними виробничими небезпеками сушильних комплексів є підвищена температура робочого середовища, небезпека ураження електричним струмом, накопичення сухих органічних частинок, підвищений рівень шуму вентиляційного обладнання та наявність рухомих елементів системи.

Під час роботи сушильної камери температура в окремих технологічних зонах може перевищувати 40–50 °С, особливо поблизу нагрівальних елементів та повітряних каналів. У разі тривалого перебування персоналу в таких умовах можливе виникнення перегріву організму, підвищеної втомлюваності та зниження концентрації уваги. Найбільш небезпечними є роботи з технічного обслуговування всередині сушильної камери відразу після завершення циклу сушіння, коли елементи конструкції ще не охололи до безпечної температури.

Додаткову небезпеку створює електротехнічне обладнання системи. Високочастотний ІРТ-інвертор, силові MOSFET-модулі, блоки живлення та драйвери працюють при підвищених струмах і можуть становити ризик ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції, неправильного заземлення або потрапляння вологи всередину електротехнічних шаф.

У процесі сушіння рослинної сировини в камері також накопичуються дрібнодисперсні органічні частинки. Частина з них переноситься повітряними потоками та осідає на поверхнях обладнання, вентиляторів і електронних компонентах. При недостатньому очищенні це може призводити до перегріву силових елементів, зменшення ефективності вентиляції та підвищення ризику займання.

Під час аналізу виробничих умов було встановлено, що рівень шуму вентиляційних систем та приводів мобільного модуля, теж, є важливим фактором. В режимі максимальної циркуляції повітря шум вентиляторів може перевищувати комфортний рівень для тривалої роботи оператора. Через це робоче місце оператора доцільно розташовувати поза межами основної технологічної зони сушіння, а керування системою виконувати дистанційно через НМІ-інтерфейс.

Окрему увагу приділено рухомих елементам мобільного моніторингового модуля. Робот переміщується вздовж монорейки та містить рухомі механічні вузли приводу. В разі виконання сервісних робіт без повного відключення живлення існує ризик механічного травмування персоналу. Тому, система повинна мати аварійну зупинку та блокування руху мобільного модуля під час відкривання технічних люків, або доступу до монорейки.

Особливістю розробленої системи є використання індуктивної передачі енергії, в межах якої між первинним контуром та пікапом мобільного модуля створюється змінне електромагнітне поле високої частоти. Під час тривалої експлуатації така система формує локальні зони підвищеної електромагнітної напруженості, особливо поблизу високочастотного інвертора та первинної індуктивної лінії.

В процесі оцінки умов праці було встановлено, що найбільший рівень електромагнітного впливу спостерігається безпосередньо в зоні силового інвертора та поблизу первинного ІРТ-контур. При нормальному режимі експлуатації оператор не перебуває постійно в цій зоні, оскільки керування системою здійснюється дистанційно через НМІ-інтерфейс. Саме тому тривалість впливу електромагнітного поля на персонал є обмеженою.

Під час обслуговування обладнання можливий короткочасний контакт працівника із зонами підвищеної електромагнітної активності. Для зменшення впливу поля силовий інвертор розміщується в окремій металевій шафі з екрануванням, а первинний індуктивний контур додатково ізолюється від зон постійного перебування персоналу. Всі сигнальні кабелі та сенсорні лінії прокладаються окремо від силових магістралей, що зменшує рівень наведень і покращує електромагнітну сумісність системи.

Окремим небезпечним фактором є вплив високої температури. Під час сушіння температура повітря в окремих зонах камери може залишатися підвищеною навіть після завершення технологічного циклу. Найбільший тепловий вплив спостерігається поблизу нагрівальних елементів, вентиляційних каналів та вузлів рекуперації тепла.

В процесі аналізу встановлено, що тривале перебування персоналу в таких умовах може призводити до перегріву організму, зниження працездатності та збільшення ризику помилкових дій під час обслуговування обладнання. Тому, конструкція системи передбачає автоматичне охолодження після завершення циклу сушіння, а технічне обслуговування внутрішніх вузлів камери дозволяється лише після зниження температури до безпечного рівня.

Для контролю температурного режиму в системі використовуються сенсори температури, підключені до центрального контролера. В разі перевищення допустимого значення система автоматично вимикає нагрівальні елементи, переводить вентилятори в режим максимального охолодження та формує аварійне повідомлення оператору.

Під час експлуатації автоматизованої сушильної системи можливе виникнення аварійних режимів, пов'язаних із порушенням роботи нагрівальних елементів, вентиляційної системи, ІРТ-живлення або мобільного моніторингового модуля. Саме тому на етапі проєктування було проведено аналіз найбільш небезпечних аварійних ситуацій та визначено заходи для їх локалізації.

Одним із найбільш критичних режимів є перегрів сушильної камери. Така ситуація може виникнути при виході з ладу температурного сенсора, зависанні програмного алгоритму, або несправності силового реле нагрівача. В цьому випадку температура в камері починає неконтрольовано зростати, що

може призвести до пошкодження рослинної сировини, перегріву електронних компонентів та виникнення пожежонебезпечної ситуації.

Для запобігання такому режиму система використовує дублювання температурного контролю. Якщо значення температури перевищує допустиму межу, центральний контролер автоматично відключає нагрівач та переводить вентиляційну систему в аварійний режим охолодження. Одночасно формується аварійне повідомлення для оператора.

Другим небезпечним режимом є відмова вентиляційної системи. У разі зупинки вентиляторів всередині камери погіршується циркуляція повітря, що призводить до локального накопичення тепла та вологи. Це може спричинити перегрів окремих ділянок сушильної камери та нерівномірне висушування сировини. Для контролю цього режиму система постійно аналізує швидкість повітряного потоку та струм споживання вентиляторів. Якщо вентилятор зупиняється чи працює нестабільно, система формує попередження та переводить сушильну камеру в безпечний режим.

Окрему небезпеку становить порушення роботи ІРТ-системи. При зміщенні пікапа, перевантаженні інвертора, або перегріві силових компонентів може знижуватися напруга живлення мобільного модуля. В такій ситуації робот може втратити зв'язок із центральним контролером, або зупинитися в робочій зоні. Для уникнення цього система постійно контролює напругу живлення та рівень бездротового сигналу. При критичному зниженні напруги мобільний модуль автоматично переходить у режим зупинки, а контролер повідомляє оператора про несправність.

Ще одним небезпечним режимом є коротке замикання або перевантаження силового інвертора ІРТ-системи. Враховуючи високочастотний режим роботи інвертора, така аварія може супроводжуватися

значним тепловиділенням і пошкодженням силових транзисторів. Для захисту системи використовуються автоматичні запобіжники, температурний контроль радіаторів та програмне обмеження навантаження.

В процесі аналізу враховувалися і ризики втрати зв'язку між мобільним модулем та центральним контролером. Якщо зв'язок відсутній протягом визначеного часу, система припиняє автоматичне переміщення робота та переходить у режим роботи за стаціонарними сенсорами.

Отже, найбільш небезпечними аварійними режимами є перегрів сушильної камери, відмова вентиляції, нестабільність IPT-живлення, короткі замикання силових вузлів та втрата зв'язку з мобільним модулем. Для мінімізації ризиків у системі реалізовано автоматичний контроль параметрів, аварійне вимкнення нагрівальних елементів, моніторинг стану вентиляції, захист силового інвертора та алгоритми безпечної зупинки мобільного робототехнічного модуля.

4.2. Технічні заходи з електромагнітної безпеки та захисту від ураження струмом

Під час експлуатації автоматизованої системи сушіння рослинної сировини особливу увагу необхідно приділяти електромагнітній безпеці та захисту персоналу від ураження електричним струмом. В системі одночасно працюють високочастотний IPT-інвертор, силові MOSFET-модулі, імпульсні блоки живлення, електродвигуни вентиляторів і привід мобільного робототехнічного модуля. Через це, конструкція сушильного комплексу повинна забезпечувати екранування силових вузлів, захист електричних кіл та автоматичне вимкнення обладнання в разі аварійного режиму.

Основним джерелом електромагнітного випромінювання в системі є високочастотний ІРТ-інвертор та первинний індуктивний контур, який створює змінне магнітне поле для передачі енергії мобільному модулю. Для зменшення впливу електромагнітних завад силовий інвертор розміщується в окремій металевій шафі з екрануванням. Корпус шафи підключається до системи захисного заземлення, що дозволяє зменшити рівень електромагнітного випромінювання та наведень на сигнальні лінії.

Всі силові кабелі системи прокладаються окремо від ліній передавання даних і сенсорних каналів. Для підключення температурних і вологісних сенсорів використовуються екрановані кабелі з додатковим заземленням екрана. Це дозволяє мінімізувати вплив високочастотних наведень на вимірювальні сигнали та зменшити ризик помилкових показників сенсорної системи.

Для підвищення електромагнітної сумісності в силових колах інвертора застосовуються феритові кільця та ЕМІ-фільтри. Вони знижують рівень високочастотних завад, які можуть виникати під час перемикання MOSFET-транзисторів. Додатково в конструкції передбачено використання металевих монтажних панелей, які виконують функцію локального екранування силових вузлів.

в зоні розміщення первинного індуктивного контуру передбачено обмеження доступу персоналу під час роботи системи. Монорейкова лінія ІРТ-живлення ізолюється від відкритих металевих конструкцій, а всі кріпильні елементи виконуються з урахуванням вимог електричної ізоляції.

Система електробезпеки сушильного комплексу побудована таким чином, щоб мінімізувати ризик контакту персоналу з небезпечними струмоведучими частинами. Всі силові вузли, включаючи інвертор, блоки

живлення, драйвери двигунів і комутаційні модулі, розміщуються в закритих електротехнічних шафах із обмеженим доступом.

Корпуси електротехнічного обладнання підключаються до захисного РЕ-провідника. Захисне заземлення використовується для відведення струму в разі пошкодження ізоляції чи пробоею силових елементів. Додатково всі металеві елементи сушильної камери, монорейки та монтажних конструкцій з'єднуються між собою системою вирівнювання потенціалів.

Живлення системи здійснюється через окремий автоматичний електрощит із розділенням силових та сигнальних кіл. Для ланцюгів керування використовуються стабілізовані джерела живлення 24 В постійного струму, що дозволяє зменшити ризик ураження персоналу при обслуговуванні сенсорної системи, або НМІ-інтерфейсу.

Окрему увагу приділено захисту мобільного робототехнічного модуля. Напруга після пікапа ІРТ-системи проходить через випрямляч, стабілізатор і блок локального захисту. В разі перевищення допустимого струму, або короткого замикання живлення мобільного модуля автоматично відключається.

Для безпечного обслуговування системи в конструкції передбачено режим сервісного блокування. Під час відкривання електротехнічної шафи, або технічного люка подається сигнал на контролер, після чого високочастотний інвертор та силові виконавчі механізми автоматично вимикаються.

Для підвищення безпеки експлуатації сушильного комплексу система обладнана автоматичними засобами аварійного відключення. Їх основним завданням є швидке припинення роботи обладнання у разі перегріву,

короткого замикання, перевантаження силових вузлів чи порушення режиму роботи ІРТ-системи.

На вході живлення сушильного комплексу встановлюються автоматичні вимикачі з тепловим та електромагнітним захистом. Вони забезпечують відключення системи при перевищенні допустимого струму, або виникненні короткого замикання. Для додаткового захисту персоналу використовуються пристрої захисного відключення (ПЗВ), які реагують на струм витоку та вимикають живлення у разі пошкодження ізоляції.

В системі, також, реалізовано програмний аварійний контроль. Центральний контролер постійно аналізує температуру сушильної камери, стан ІРТ-живлення, роботу вентиляторів і рівень бездротового зв'язку. Якщо температура перевищує допустиму межу, система автоматично вимикає нагрівач та переводить вентилятори в режим максимального охолодження.

Для аварійного вимкнення обладнання передбачено окрему кнопку Emergency Stop, розташовану біля операторської панелі. Натискання цієї кнопки призводить до миттєвого відключення інвертора, нагрівальних елементів, приводів та виконавчих механізмів.

В межах мобільного модуля, також, реалізовано локальний аварійний захист. При критичному зниженні напруги ІРТ-живлення, або втраті зв'язку робот автоматично зупиняється та переходить у безпечний режим очікування.

4.3. Розрахунок захисного заземлення та параметрів вентиляції

Для сушильної камери з електричними нагрівачами, високочастотним ІРТ-інвертором і металевою монорейковою конструкцією передбачається використання захисного заземлення. До контуру заземлення підключаються

корпус електротехнічної шафи, корпус інвертора, металева рама сушильної камери, монорейка мобільного модуля та захисні екрани силових кабелів.

Для орієнтовного розрахунку приймаємо, що заземлювач виконується у вигляді вертикальних сталевих електродів довжиною $l = 2,5\text{м}$, діаметром $d = 0,016\text{м}$, які з'єднуються сталеву смугою. Питомий опір ґрунту приймається $\rho = 100\text{Ом} \cdot \text{м}$. Допустимий опір заземлювального пристрою для електроустановки приймаємо не більше $R_{\text{дон}} = 40\text{Ом}$.

Опір одного вертикального електрода можна орієнтовно визначити за формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right)$$

Підставимо прийняті значення:

$$R_1 = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \ln\left(\frac{2 \cdot 2,5}{0,016}\right)$$

$$R_1 = \frac{100}{15,7} \ln(312,5)$$

$$R_1 = 6,37 \cdot 5,74 = 36,56 \text{ Ом}$$

Один електрод має занадто великий опір, тому необхідно використати групу електродів. Орієнтовний опір групи вертикальних електродів визначається так:

$$R_n = \frac{R_1}{n \cdot \eta}$$

де n – кількість електродів, η – коефіцієнт використання електродів. Для чотирьох електродів, розміщених по кутах контуру, можна прийняти $\eta = 0,65$.

$$R_n = \frac{36,56}{4 \cdot 0,65}$$

$$R_n = 14,06 \text{ Ом}$$

Отримане значення перевищує допустимі 40м, тому кількість електродів потрібно збільшити. Прийmemo $n = 12$, тоді коефіцієнт використання можна прийняти $\eta = 0,55$, бо при збільшенні кількості електродів взаємний вплив між ними зростає.

$$R_n = \frac{36,56}{12 \cdot 0,55}$$

$$R_n = 5,54 \text{ Ом}$$

Для додаткового зменшення опору враховується горизонтальна з'єднувальна смуга. Її вплив дозволяє знизити загальний опір контуру приблизно на 20–30 %. Прийmemo зниження на 25 %:

$$R_{заг} = R_n \cdot 0,75$$

$$R_{заг} = 5,54 \cdot 0,75 = 4,16 \text{ Ом}$$

Отримане значення близьке до допустимого, але для забезпечення запасу приймаємо 14 вертикальних електродів. Тоді:

$$R_n = \frac{36,56}{14 \cdot 0,55} = 4,75 \text{ Ом}$$

$$R_{заг} = 4,75 \cdot 0,75 = 3,56 \text{ Ом}$$

Отже, для сушильного комплексу доцільно прийняти контур заземлення з 14 вертикальних сталевих електродів довжиною 2,5 м, з'єднаних горизонтальною сталевою смугою. Орієнтовний опір такого контуру становить 3,56Ом, що не перевищує прийняте допустиме значення 40м. Це забезпечує безпечне відведення струму у випадку пошкодження ізоляції, або пробую силового обладнання на корпус.

Вентиляція сушильного комплексу повинна забезпечувати видалення надлишкової вологи, тепла та частинок рослинної сировини. Для розрахунку приймаємо, що сушильна камера має об'єм:

$$V = 12 \text{ м}^3$$

Для приміщень із тепловиділенням та підвищеною вологістю доцільно прийняти кратність повітрообміну $K = 8$ разів на годину. Необхідна продуктивність вентиляційної системи визначається за формулою:

$$L = V \cdot K$$

де L – необхідна продуктивність вентиляції, V – об'єм камери, K – кратність повітрообміну.

$$L = 12 \cdot 8 = 96 \text{ м}^3/\text{год}$$

Отримане значення є мінімально необхідним для оновлення повітря в камері. Однак під час сушіння рослинної сировини потрібно враховувати активне випаровування вологи та роботу нагрівальних елементів. Тому, доцільно прийняти запас 30 %:

$$L_{np} = L \cdot 1,3$$

$$L_{np} = 96 \cdot 1,3 = 124,8 \text{ м}^3/\text{год}$$

Отже, мінімальна продуктивність вентилятора повинна становити приблизно $125 \text{ м}^3/\text{год}$. Для практичної реалізації доцільно вибрати вентилятор із продуктивністю не менше $150 \text{ м}^3/\text{год}$, щоб забезпечити запас на забруднення фільтрів, опір повітропроводів та нерівномірність циркуляції повітря.

Для перевірки часу повного оновлення повітря в камері використовується залежність:

$$t = \frac{V}{L}$$

Якщо продуктивність вентилятора становить $150 \text{ м}^3/\text{год}$, тоді:

$$t = \frac{12}{150} = 0,08 \text{ год}$$

$$t = 0,08 \cdot 60 = 4,8 \text{ хв}$$

Отже, при продуктивності вентилятора $150 \text{ м}^3/\text{год}$ повне оновлення повітря в сушильній камері відбуватиметься приблизно за 4,8 хвилини. Це є

достатнім для стабільного видалення вологи та підтримання рівномірного мікроклімату.

Ефективність вентиляції оцінюється не лише за об'ємом повітря, який проходить через камеру, а й за здатністю системи відводити надлишкове тепло. Для цього можна виконати орієнтовний розрахунок тепловідведення вентиляційним потоком.

Кількість теплоти, яку може відвести повітряний потік, визначається за формулою:

$$Q = \rho \cdot c \cdot L_c \cdot \Delta T$$

де $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря, $c = 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ – питома теплоємність повітря, L_c – витрата повітря в $\text{м}^3/\text{с}$, ΔT – різниця температур між повітрям у камері та припливним повітрям.

Переведемо продуктивність вентилятора $150 \text{ м}^3/\text{год}$ у $\text{м}^3/\text{с}$:

$$L_c = \frac{150}{3600} = 0,0417 \text{ м}^3/\text{с}$$

Приймемо, що температура повітря в камері становить 40°C , а припливного повітря – 25°C . Тоді:

$$\Delta T = 40 - 25 = 15^\circ\text{C}$$

Підставимо значення:

$$Q = 1,2 \cdot 1005 \cdot 0,0417 \cdot 15$$

$$Q = 754 \text{ Вт}$$

Отже, вентиляційна система з продуктивністю $150 \text{ м}^3/\text{год}$ може відводити приблизно 754 Вт теплової потужності. Це дозволяє ефективно зменшувати надлишкове тепло в камері та підтримувати стабільний температурний режим.

Для підвищення ефективності тепловідведення вентиляція повинна працювати не постійно на максимальній потужності, а регулюватися залежно

від температури та вологості. В нормальному режимі вентилятор може працювати на середній продуктивності, а при підвищенні вологості чи перегріві переходити в посилений режим.

Проведений розрахунок показав, що для сушильної камери об'ємом 12м³ доцільно використовувати вентиляційну систему продуктивністю не менше 150м³/год. Така система забезпечує повне оновлення повітря приблизно за 4,8 хвилини та може відводити близько 754Вт теплової потужності. В поєднанні з автоматичним керуванням вентилятором це забезпечує стабільний мікроклімат, зменшує ризик перегріву та підвищує безпеку експлуатації сушильного комплексу.

4.4. Заходи з пожежної безпеки та план дій у надзвичайних ситуаціях

Під час експлуатації автоматизованої системи сушіння рослинної сировини особливу увагу необхідно приділяти пожежній безпеці, оскільки в межах сушильного комплексу одночасно функціонують нагрівальні елементи, високочастотний ІРТ-інвертор, вентиляційне обладнання, електричні приводи та велика кількість сухої органічної сировини. Поєднання підвищеної температури, електротехнічного обладнання та рослинного пилу створює умови підвищеної пожежної небезпеки. Тому, в конструкції системи повинні бути передбачені технічні та організаційні заходи, спрямовані на запобігання загорянню, локалізацію небезпечних режимів та безпечну евакуацію персоналу.

В процесі аналізу встановлено, що найбільш пожежонебезпечними вузлами сушильного комплексу є нагрівальні елементи, високочастотний ІРТ-інвертор, силові кабелі, вентиляційна система та місця накопичення сухої рослинної сировини. Найбільший ризик виникнення пожежі спостерігається

при порушенні температурного режиму сушіння, або перевантаженні електротехнічного обладнання.

Одним із основних факторів ризику є перегрів нагрівальних елементів. В разі несправності температурного сенсора, зависання системи керування, або порушення роботи вентиляції температура в камері може почати неконтрольовано зростати. При цьому суха рослинна сировина здатна швидко нагріватися та створювати локальні осередки займання, особливо в місцях недостатньої циркуляції повітря.

Окрему небезпеку становить накопичення дрібнодисперсного рослинного пилу. Під час сушіння частина частинок переноситься повітряними потоками та осідає на поверхнях обладнання, вентиляторів, кабельних каналах і радіаторах силових компонентів. При тривалому накопиченні пилу та локальному перегріві силових елементів може виникати займання органічних залишків.

Високочастотний ІРТ-інвертор також є потенційно небезпечним вузлом. При перевантаженні силових MOSFET-транзисторів, або короткому замиканні в індуктивному контурі можливе різке підвищення температури силових елементів. Тому, інвертор повинен працювати лише за наявності справної системи охолодження та автоматичного температурного контролю.

Пожежонебезпечним фактором є і порушення роботи вентиляційної системи. У разі зупинки вентиляторів, або засмічення повітряних каналів у камері починає накопичуватися гаряче повітря та водяна пара. Це призводить до локального перегріву окремих зон сушіння та зростання температурного навантаження на електронні компоненти.

Також встановлено, що найбільш небезпечними режимами є робота сушильної камери без контролю температури, експлуатація обладнання із

забрудненими вентиляційними каналами, пошкодження ізоляції силових кабелів та використання системи без справного аварійного відключення.

Для забезпечення пожежної безпеки в сушильному комплексі передбачено комплекс технічних та організаційних заходів. Основним елементом системи є автоматичний контроль температури, який постійно виконується центральним контролером. При перевищенні допустимого температурного значення система автоматично вимикає нагрівальні елементи та переводить вентилятори в режим інтенсивного охолодження.

В межах сушильної камери доцільно встановлювати температурні сенсори в кількох контрольних точках. Це дозволяє своєчасно виявляти локальні перегріву та запобігати утворенню осередків займання. Додатково система контролює стан вентиляторів, струм споживання силових вузлів і температуру ІРТ-інвертора.

Для раннього виявлення пожежонебезпечних ситуацій передбачено встановлення димових або теплових пожежних сповіщувачів. При спрацюванні датчика система автоматично формує аварійне повідомлення, активує світлову та звукову сигналізацію й виконує аварійне відключення нагрівальних елементів.

Електротехнічні шафи з інвертором, драйверами та силовими блоками повинні бути виготовлені з негорючих матеріалів та обладнані вентиляційними отворами для відведення тепла. Кабельні канали виконуються з використанням вогнестійкої ізоляції, а всі силові кабелі прокладаються окремо від зон накопичення рослинної сировини.

Для локалізації можливого займання в приміщенні сушильного комплексу повинні бути встановлені вуглекислотні, або порошкові вогнегасники. Вуглекислотні вогнегасники доцільно використовувати для

гасіння електротехнічного обладнання, оскільки вони не пошкоджують електронні компоненти та не проводять електричний струм.

Система оповіщення персоналу реалізується через світлові індикатори, звукову сигналізацію та повідомлення на НМІ-інтерфейсі. В разі аварії оператор отримує інформацію про тип несправності, місце її виникнення та необхідність переходу в аварійний режим роботи.

В разі виникнення аварійної чи пожежонебезпечної ситуації персонал повинен діяти відповідно до затвердженого плану реагування. Основною метою такого плану є швидке припинення роботи обладнання, локалізація небезпечного режиму та безпечна евакуація працівників.

При виявленні ознак перегріву, запаху горілої ізоляції, задимлення або нестабільної роботи обладнання оператор повинен негайно перевести систему в аварійний режим через НМІ-інтерфейс, або натиснути кнопку аварійного відключення Emergency Stop. Після цього автоматично вимикаються нагрівальні елементи, високочастотний ІРТ-інвертор, приводи мобільного модуля та силові виконавчі механізми.

Якщо виникає задимлення, або локальне займання, персонал повинен повідомити відповідальну особу та розпочати евакуацію людей із небезпечної зони. При цьому забороняється відкривати сушильну камеру без необхідності, оскільки різке надходження кисню може посилити горіння рослинної сировини.

Для гасіння електротехнічного обладнання дозволяється використовувати лише вуглекислотні або порошкові вогнегасники. Використання води для гасіння силових електричних вузлів або ІРТ-інвертора забороняється через ризик ураження електричним струмом та пошкодження електронних компонентів.

У разі втрати живлення чи критичної несправності системи мобільний робототехнічний модуль автоматично переходить в безпечний режим зупинки. Центральний контролер фіксує аварію та блокує повторний запуск обладнання до підтвердження оператором.

Після локалізації аварійної ситуації персонал повинен виконати перевірку стану нагрівальних елементів, вентиляційної системи, електротехнічних шаф, кабельних каналів та ІРТ-обладнання. Повторний запуск сушильного комплексу дозволяється лише після усунення причини аварії та перевірки справності системи захисту.

Для забезпечення готовності персоналу до надзвичайних ситуацій працівники повинні проходити інструктаж з пожежної безпеки та періодичне навчання діям в разі виникнення пожежі чи аварії. Особлива увага приділяється порядку аварійного відключення обладнання, використанню вогнегасників та маршрутам евакуації.

Нижче наведено узагальнений план реагування персоналу при виникненні надзвичайної ситуації в сушильному комплексі.

План реагування персоналу при виникненні надзвичайної ситуації в сушильному комплексі

Етап реагування	Дії персоналу
Виявлення аварії	Фіксація перегріву, задимлення, запаху горілої ізоляції, або несправності обладнання
Аварійне відключення	Натискання кнопки Emergency Stop, або переведення системи в аварійний режим
Оповіщення	Повідомлення відповідальної особи та активація системи сигналізації
Локалізація	Використання вогнегасника, або ізоляція небезпечної зони
Евакуація	Виведення персоналу із зони небезпеки
Перевірка системи	Контроль стану обладнання після локалізації аварії
Відновлення роботи	Повторний запуск лише після усунення несправності та перевірки системи захисту

Отже, розроблені заходи пожежної безпеки та план реагування персоналу дозволяють зменшити ризик виникнення пожежі, забезпечити своєчасне виявлення аварійних ситуацій, автоматичне відключення небезпечного обладнання та безпечну евакуацію працівників у разі надзвичайної ситуації.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано аналіз питань охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та безпечної експлуатації автоматизованої системи управління мікрокліматом сушильної камери. Визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з роботою нагрівальних елементів, високочастотного ІРТ-інвертора, вентиляційного обладнання та мобільного робототехнічного модуля. Особливу увагу приділено впливу підвищених температур, електромагнітних полів та електротехнічного обладнання на персонал.

Розроблено комплекс технічних заходів щодо забезпечення електромагнітної сумісності та захисту від ураження електричним струмом. Передбачено використання захисного заземлення, екранування силових вузлів, автоматичних засобів аварійного відключення та систем контролю стану електрообладнання. Виконаний розрахунок контуру захисного заземлення підтвердив відповідність його параметрів вимогам безпечної експлуатації електроустановок.

Проведено розрахунок параметрів вентиляції сушильного комплексу та оцінено ефективність системи тепловідведення. Встановлено, що прийнята вентиляційна система забезпечує необхідний повітрообмін, відведення надлишкового тепла та підтримання безпечних умов роботи обладнання і персоналу.

Також, розроблено заходи пожежної безпеки та детальний план реагування персоналу в умовах надзвичайних ситуацій. Передбачено автоматичний контроль температури, аварійне вимкнення нагрівальних елементів, систему оповіщення та порядок дій персоналу в разі виникнення

пожежі, або аварії. Запропоновані технічні та організаційні рішення забезпечують необхідний рівень безпеки під час експлуатації автоматизованої системи сушіння рослинної сировини та відповідають вимогам охорони праці для сучасних автоматизованих виробничих комплексів.

ВИСНОВКИ

1. У результаті виконання магістерської роботи розроблено концепцію автоматизованої системи інноваційних технологій управління мікрокліматом для камер сушки рослинної сировини на основі мобільного робототехнічного модуля з індуктивною передачею енергії. Встановлено, що використання традиційних стаціонарних систем контролю не забезпечує достатньої точності моніторингу параметрів середовища в усьому об'ємі сушильної камери через наявність локальних температурних і вологісних зон, що негативно впливає на якість сушіння та енергоефективність технологічного процесу.
2. Проведено аналіз сучасних технологій автоматизації процесів сушіння рослинної сировини, досліджено фізико-технічні характеристики об'єкта сушіння та вимоги до параметрів мікроклімату. Виконано порівняльний аналіз акумуляторних, контактних та індуктивних систем енергозабезпечення мобільних робототехнічних комплексів. За результатами дослідження встановлено, що технологія індуктивної передачі енергії найбільш ефективно забезпечує безперервне живлення мобільного модуля в умовах підвищеної температури, вологості та запиленості сушильного комплексу.
3. Виконано математичне моделювання сушильної камери як об'єкта автоматичного керування. Побудовано модель теплообмінних процесів, досліджено динамічні характеристики системи та визначено основні закономірності зміни температури й вологості в процесі сушіння. Отримані результати стали основою для подальшого синтезу алгоритмів керування мікрокліматом.

4. Розроблено математичну модель індуктивної передачі енергії в системі «первинний контур – пікап» та досліджено резонансні режими роботи ІРТ-системи. Встановлено вплив параметрів електромагнітного зв'язку та повітряного зазору між елементами системи на ефективність передачі потужності. Проведене моделювання підтвердило можливість стабільного живлення мобільного моніторингового модуля без використання контактних струмомізмальних пристроїв.
5. Досліджено динаміку руху мобільного робототехнічного модуля на монорейковій трасі та виконано оцінку його енергоефективності. Встановлено, що використання безконтактного живлення дозволяє забезпечити стабільну роботу протягом усього циклу моніторингу без необхідності зупинок для заряджання або заміни джерел живлення.
6. Розроблено алгоритми адаптивного керування мікрокліматом на основі безперервного сканування середовища. Запропоновані алгоритми забезпечують автоматичне коригування режимів нагрівання та вентиляції залежно від поточних параметрів температури та вологості в різних зонах сушильної камери, що дозволяє підвищити рівномірність сушіння рослинної сировини.
7. Сформовано функціональну структуру автоматизованої системи керування з інтегрованою ІРТ-системою та мобільним моніторинговим модулем. Обґрунтовано вибір апаратної бази, включаючи високочастотний інвертор, контролери, сенсори температури та вологості, приводи переміщення й засоби бездротового обміну даними.
8. Розроблено програмне забезпечення автоматизованої системи керування. Реалізовано алгоритми PID-регулювання параметрів

- мікроклімату, механізми бездротового обміну даними між вузлами системи, функції моніторингу технологічних параметрів та аварійного реагування. Створене програмне забезпечення забезпечує автоматичне підтримання заданих режимів сушіння та контроль технічного стану обладнання.
9. Створено людино-машинний інтерфейс оператора для візуалізації параметрів температури, вологості, енергоспоживання та стану ІРТ-системи. Реалізовано функції архівації даних, ведення журналу подій, відображення аварійних повідомлень та дистанційного контролю роботи сушильного комплексу.
 10. Виконано аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, пов'язаних з експлуатацією сушильного комплексу та високочастотного ІРТ-обладнання. Розроблено комплекс технічних заходів із забезпечення електромагнітної безпеки, електробезпеки та захисту персоналу від ураження електричним струмом.
 11. Проведено розрахунок параметрів захисного заземлення та системи вентиляції. Результати розрахунків підтвердили можливість забезпечення нормативних вимог щодо безпечної експлуатації обладнання, ефективного відведення надлишкового тепла та підтримання належних умов праці персоналу.
 12. Розроблено заходи пожежної безпеки та план реагування персоналу в умовах надзвичайних ситуацій. Передбачено використання автоматичних засобів аварійного відключення, систем оповіщення, контролю температури та організаційних заходів щодо локалізації можливих аварійних режимів роботи.

13. За результатами проведених досліджень підтверджено, що використання мобільного робототехнічного комплексу з індуктивною передачею енергії дозволяє суттєво підвищити точність контролю параметрів мікроклімату, забезпечити безперервний моніторинг усіх зон сушильної камери та мінімізувати ризики перегріву й нерівномірного висушування рослинної сировини.
14. Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи на підприємствах агропромислового комплексу, у виробництві лікарської рослинної сировини, сушінні зернових культур, овочевої продукції та інших технологічних процесах, де необхідне точне підтримання температурно-вологісних режимів. Реалізація запропонованих технічних рішень дозволяє підвищити якість готової продукції, зменшити питомі енергетичні витрати, підвищити надійність системи керування та знизити ризики аварійних режимів роботи обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Снежкін Ю. Ф. Енергозберігаючі технології сушіння рослинної сировини. Київ: Наукова думка, 2019. 256 с.
2. Zhang Z. Inductive Power Transfer for Industrial Mobile Robots. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020. Vol. 35. No. 12: pp. 12800-12815.
3. Ляшенко С. В. Моделювання та автоматизація процесів сушіння термолабільних матеріалів. Харків: ХНТУСГ, 2022. № 12: С. 84–91.
4. Кучерук, В. Ю. Безконтактні системи передачі енергії для мобільних об'єктів автоматизації. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2023. № 5: С. 42–50.
5. Зайцев, О. В. Надійність автономних систем живлення в екстремальних умовах експлуатації. Одеса: ОНПУ, 2021. С. 124–132.
6. Бондар, В. В. Надійність систем контактного живлення в сільськогосподарському виробництві. Автоматизація та приладобудування, 2020. № 8: С. 56–64.
7. Куц, С. М. Системи безконтактної передачі енергії великої потужності: проектування та моделювання. Наукові праці ЧНУ ім. Петра Могили, 2022. Том 310. № 298: С. 44–52.
8. Проць, Ю. І. Безконтактні системи живлення та передачі інформації в робототехніці. Тернопіль: ТНТУ, 2021. С. 98–115.
9. Костенко, О. В. Інтелектуальна власність у сфері робототехніки та промислової автоматизації. Київ: Видавництво прикладних наук, 2022. С. 134–150.

10. Patent US 9,120,401 B2. Inductive power supply system / Wampfler, M. et al.; Conductix-Wampfler GmbH. Published 01.09.2015. URL: <https://patents.google.com/patent/US9120401B2/>
11. Patent EP 2,348,599 B1. Inductive power supply system for moving body / Nishino, S.; Daifuku Co., Ltd. Published 27.07.2011. URL: <https://patents.google.com/patent/EP2348599B1/>
12. Patent US 10,543,755 B2. Method for supplying power to a mobile unit / Meurer, J. et al.; Siemens AG. Published 28.01.2020. URL: <https://patents.google.com/patent/US10543755B2/>
13. Патент UA 134560 U. Мобільна система моніторингу параметрів середовища / Іванов М. І.; заявник НТУУ "КПІ". Опубл. 27.05.2019. Бюл. № 10. URL: <https://base.uipv.org/searchInv/>
14. Patent EP 3,121,918 B1. Contactless power transmission system / Paul, S.; Vahle KG. Published 25.01.2017. URL: <https://patents.google.com/patent/EP3121918B1/>
15. Ладанюк, А. П. Автоматизація технологічних процесів у харчовій та переробній промисловості. Київ: Ліра-К, 2021. С. 210–225.
16. Шваб, К. Четверта промислова революція: стратегії та перспективи. Київ: Форс Україна, 2021. С. 88–104.