

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
Комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
Касаткін Д.Ю., к.пед.н., доц.
(підпис) (ПІБ, вчене звання і ступінь)

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

На тему: «Розробка комп'ютерної системи управління інфрачервоним сушінням зерна»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Гарант освітньої програми

к.ф. м н., доцент _____ / Нікітенко Є.В. /
(підпис) (ПІБ)

Керівник дипломного проекту: _____ / Лахно В.А. /
(підпис) (ПІБ)

Виконав: _____ / Бережняк О.О. /
(підпис) (ПІБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри

комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки

/ Касаткін Д.Ю., к.пед.н., доц. /

(підпис)
ступінь)

(ПІБ, вчене звання і

«__» _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я

**ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ БАКАЛАВРСЬКОЇ
СТУДЕНТУ**

Бережняк Олег Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність (напрямок підготовки): комп'ютерна інженерія

Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: «_____»

з

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____

Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи Розробка комп'ютерної системи управління інфрачервоним сушінням зерна

е

р

Перелік питань, що підлягають розробці:

ж 1. Аналіз існуючих систем автоматизації інфрачервоного сушіння зерна

е 2. Вибір апаратної платформи та сенсорного комплексу

н 3. Розробка програмного забезпечення та алгоритму керування

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

н

Дата видачі завдання “_____” _____ 2025 р.

к

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Лахно В.А., д.т.н.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Бережняк О.О.

(прізвище та ініціали студента)

р

е

к

т

о

р

а

Н

У

Б

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз предметної області	04.03.2025 р.	Виконано
2	Проектування системи	15.04.2025 р.	Виконано
3	Реалізація системи	10.04.2025 р.	Виконано
4	Тестування системи	01.05.2025 р.	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	13.05.2025 р.	Виконано
6	Оформлення графічного матеріалу	13.05.2025 р.	Виконано

Студент

_____ **Бережняк О.О.**
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи)

_____ **Лахно В.А.**
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 61 сторінка, 7 рисунків, 5 таблиць, 3 діаграми, додатки, 15 джерел

Ключові слова: інфрачервоне сушіння, зерно, Model Predictive Control, сенсорна мережа 1-Wire, енергоефективність, NIR-аналіз вологості

Об'єкт дослідження — стрічкова інфрачервона зерносушарка з комп'ютерною системою керування.

Мета роботи — проектування та експериментальна перевірка спеціалізованого програмно-апаратного комплексу, що забезпечує автоматичний контроль температури й вологості зернового шару та відповідає сучасним вимогам до енергоефективності й якості продукції.

Розділ 1 присвячено теоретичним основам інфрачервоного сушіння: описано фізичні процеси тепломасообміну в зерновому шарі, подано класифікацію існуючих сушарок і систем автоматизації, сформульовано нормативні критерії якості згідно з ДСТУ та ISO, а також виведено тепломасообмінну модель, що покладена в основу алгоритмів регулювання.

Розділ 2 містить проектну частину: визначено функціональні й технічні вимоги до системи, побудовано структурну та функціональну схеми контролера, обґрунтовано вибір апаратної платформи, розроблено багаторівневу архітектуру програмного забезпечення та UML-діаграми.

Розділ 3 описує реалізацію: наведено код основних модулів, представлено структурну схему алгоритму, проведено експериментальні випробування дев'яти партій проаналізовано досягнуті показники вологості, температурної стабільності та питомого енергоспоживання.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ІЧ-СУШІННЯ ЗЕРНА	9
1.1 Опис технологічного процесу інфрачервоного сушіння зерна	9
1.2 Огляд існуючих автоматизованих систем інфрачервоного сушіння	11
1.3 Аналіз існуючих систем керування інфрачервоним сушінням зерна	13
1.4 Критерії ефективності та постановка завдання	16
1.5 Нормативні вимоги та стандарти контролю інфрачервоного сушіння зерна.....	17
1.6 Сучасні сенсорні технології для он-лайн контролю інфрачервоного сушіння.....	19
1.7 Тепломасообмінна модель та формулювання задачі розробки комп'ютерної системи.....	21
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНИМ СУШІННЯМ ЗЕРНА	24
2.1 Функціональні й технічні вимоги	24
2.2 Архітектура програмного забезпечення.....	26
2.3 Вибір апаратної платформи та монтаж обладнання	27
2.4 Логічна модель програмної системи.....	29
2.5 Інтерфейсні протоколи та мережеве взаємодія.....	32
2.6 Безпека, відмовостійкість та сервісне обслуговування.....	33
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ	35
3.1 Алгоритм керування температурою та вологістю.....	35
3.2 База даних та збереження журналів технологічного процесу.....	37
3.3 Графічний інтерфейс користувача.....	40
3.4 Результати експлуатаційних випробувань.....	42
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ	45
4.1 Методика експериментальних досліджень.....	45
4.2 Порівняння результатів із існуючими системами.....	46
4.3 Показники енергоефективності	48
4.4 Безпека експлуатації та захист даних.....	50
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54
Додаток А.....	56

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

AES – Advanced Encryption Standard

API – Application Programming Interface

CRC – Cyclic Redundancy Check

DS18B20 – Digital Sensor 18B20 (цифровий термометр)

EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

GPIO – General Purpose Input/Output

HMI – Human-Machine Interface

HTTP – HyperText Transfer Protocol

I²C – Inter-Integrated Circuit

IP54 – Ingress Protection rating 54 (пил / бризко-захист)

LCD – Liquid Crystal Display

LUKS – Linux Unified Key Setup

MAC – Media Access Control (мережева адреса)

MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems

MPC – Model Predictive Control

NAS – Network-Attached Storage

NIR – Near-Infrared (спектроскопія)

PLC – Programmable Logic Controller

PWM – Pulse-Width Modulation

REST – Representational State Transfer

RH – Relative Humidity

RS-485 – Recommended Standard 485 (диференційна послідовна шина)

SBC – Single-Board Computer

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition

SSH – Secure Shell

SSR – Solid State Relay

ВСТУП

Сьогодні Україна входить до числа лідерів світового експорту зерна, а отже питання якісного післязбирального оброблення врожаю має ключове значення. Практика показує, що від 10 до 15 % збіжжя щороку втрачається через перезволоження й пов'язані з ним мікробіологічні процеси. Одна з найбільш перспективних технологій скорочення цих втрат — інфрачервоне (ІЧ) сушіння: воно дає змогу швидше виводити вологу з ендосперму зернини, економить енергію та підвищує однорідність кінцевого продукту. Утім, ефективність ІЧ-установки суттєво залежить від точності керування температурою та повітрообміном, що ставить перед інженером задачу розробити гнучку систему автоматичного регулювання.

Об'єкт, предмет і мета дослідження

- Об'єкт — процес інфрачервоного сушіння зерна на елеваторі.
- Предмет — програмно-апаратні методи автоматичного керування ІЧ-нагрівачами та вентиляційними засобами.
- Мета роботи — створити комп'ютерну систему, здатну в реальному часі підтримувати оптимальний температурно-волого-вий режим сушіння й акумулювати статистику процесу для подальшого аналізу.

Основні завдання

- Вивчити технологічні особливості ІЧ-сушіння та визначити критичні параметри процесу.
- Сформулювати перелік функціональних і технічних вимог до майбутньої системи.
- Спроекувати архітектуру програмного забезпечення з виокремленням модулів збору даних, керування та візуалізації.
- Реалізувати алгоритм адаптивного регулювання потужності нагрівачів і швидкості вентиляторів.

- Розробити дружній графічний інтерфейс для оператора.
- Провести експериментальні випробування макету й оцінити енергоспоживання та якість сушіння.

Наукова новизна

У роботі запропоновано алгоритм, що коригує режим сушіння, спираючись на модель теплового балансу зернової маси та статистичні дані попередніх партій. Це дає змогу прогнозувати залишкову вологість і запобігати локальному перегріву.

Практична значущість

Запропонована система може бути інтегрована в діючі ІЧ-сушарки без суттєвого переобладнання, скорочуючи тривалість циклу приблизно на третину та знижуючи витрати електроенергії до 15 %.

Методи дослідження

- Під час виконання роботи використовують:
- чисельне моделювання теплових процесів (метод кінцевих різниць);
- аналіз експериментальних даних;
- лабораторні випробування зі змінними параметрами нагріву та повітрообміну.

Таким чином, актуальність теми зумовлена потребою аграрного сектору у підвищенні ефективності післязбирального оброблення збіжжя, а результати можуть стати основою для модернізації зерносушильних господарств і зменшення втрат урожаю.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ІЧ-СУШІННЯ ЗЕРНА

1.1 Опис технологічного процесу інфрачервоного сушіння зерна

Інфрачервоне сушіння базується на тому, що зернина безпосередньо поглинає випромінювання із довжиною хвилі 2–4 мкм, тобто в діапазоні, де коефіцієнт поглинання води максимальний. На відміну від конвективних сушарок, тепло підводиться не лише через поверхню, а й проникає на 1–2 мм углиб ендосперму, — завдяки цьому час випаровування скорочується, а оболонка перегрівається значно менше. У типовій установці шар зерна переміщується транспортерами крізь ІЧ-модуль, де одночасно діють випромінювачі та потік вентилязованого повітря. Після досягнення цільової вологості нагрівачі вимикаються, а вентилятор продовжує роботу, доки температура не знизиться до безпечного рівня, що дозволяє уникнути конденсації при зберіганні.

Основні фази процесу

У табл. 1.1 узагальнено послідовність операцій та їх орієнтовні параметри.

Етап	Пояснення	Типові значення*
Завантаження	Подача із бункера у приймальну камеру	$w_0 = 18\text{--}22\%$
Попередній прогрів	Половинна потужність ламп, вирівнювання шару	$T_{\text{повітря}} \approx 60\text{ }^\circ\text{C}$
Основне сушіння	Плавне підвищення потужності, вентиляція	$T_{\text{зерна}} \leq 70\text{ }^\circ\text{C}$
Вирівнювання вологості	Зменшення нагріву, перемішування	$\Delta w \leq 0,5\%$
Остудження	Вентиляція без нагріву	$T_{\text{зерна}} \leq 45\text{ }^\circ\text{C}$
Вивантаження	Перехід на зберігання	$w_{\text{фінальна}} = 13\text{--}14\%$

Табл. 1.1 — Послідовність операцій

Під час **основного сушіння** інтенсивність випромінювання пов'язана із швидкістю повітряного потоку: якщо збільшити потужність ламп без достатньої вентиляції, поверхня перегріється і з'являться тріщини; навпаки, надмірний повітряний потік охолодить шар і подовжить цикл.

Теплові та масообмінні явища

У зернині формується радіальний температурний градієнт: серцевина прогрівається швидше, що підвищує парціальний тиск водяної пари й посилює дифузію вологи до поверхні. Коефіцієнт ефективності процесу визначається балансом трьох потоків: поглинутого випромінювання, відведеного через випаровування та конвективного відбору. Оптимальна керованість досягається автоматичним регулюванням потужності ламп і швидкості вентилятора у реальному часі за сигналами датчиків температури та вологості.

Фактори, що найбільше впливають на якість сушіння

Товщина шару, стабільність мережевої напруги та чистота відбивачів ІЧ-ламп є критичними. Наприклад, кожні додаткові 5 мм шару подовжують сушіння на 8–10 %, а шар пилу лише в 0,5 мм на відбивачі знижує корисну теплопередачу на 4–6 %. Сумарний вплив найважливіших факторів поданий у табл. 1.2.

Параметр	Зміна	Наслідок для процесу
Товщина шару	+5 мм	+8–10 % до тривалості
Напруга мережі	–5 %	–10 % до потужності ламп
Пил на відбивачах	0,5 мм	–4–6 % до теплопередачі

Табл. 1.2 — Сумарний вплив найважливіших факторів

Контроль та вимірювання

Для підтримання потрібного режиму система постійно відстежує температуру зерна, вологість повітря й енергоспоживання. Рекомендовані датчики й допустимі похибки наведено в табл. 1.3.

Величина	Датчик	Діапазон	Похибка
T зерна	DS18B20 або Pt1000	0–100 °C	±0,5 °C
RH повітря	SHT31	0–100 %	±2 % RH
w зерна (он-лайн)	NIR-сенсор	10–25 %	±0,3 %
Потужність ламп	Датчик Hall	0–50 А	±1 % FS

Табл 1.3 — Рекомендовані датчики й допустимі похибки

Таким чином, технологічний процес інфрачервоного сушіння — це керована послідовність термічних і масообмінних трансформацій, успішне здійснення яких залежить від точного моніторингу параметрів і своєчасного коригування режиму. Саме ці вимоги ляжуть в основу постановки задачі для комп'ютерної системи керування, що розглядається далі.

1.2 Огляд існуючих автоматизованих систем інфрачервоного сушіння

Найпростіші промислові сушарки, які й досі використовуються на невеликих елеваторах, оснащені лише релейною автоматикою: температуру контролює біметалевий термостат, а вентилятор працює у фіксованому режимі. У таких установках оператор фактично регулює процес «на око»: якщо вологість вихідного зерна занадто висока або шар на конвеєрі збільшився, доводиться вручну змінювати швидкість подачі чи вимикати частину ламп, аби уникнути підпалювання оболонки. Окрім непередбачуваного результату, це створює значні енергетичні втрати, бо лампи працюють на повну навіть тоді, коли тепло фактично не засвоюється.

З ростом вимог до стабільності якості виробники почали переходити на програмовані логічні контролери (PLC), які у зв'язці з термоконтролерами й інверторами вентиляторів дозволяють реалізувати прості ПІ-закони регулювання.

У таких системах з'явилася можливість підтримувати температуру шару в заданих межах, а також блокувати нагрів, якщо потік повітря недостатній. Водночас навіть сучасні PLC-рішення часто обмежені одним-двома датчиками температури і зовсім не враховують внутрішню вологість, що змушує закладати значний запас за часом сушіння й, знову ж, витратити зайві кіловат-години.

У табл. 1.4 узагальнено найпоширеніші рішення та їхні ключові характеристики.

Тип системи	Приклад реалізації	Точність кінцевої вологості, %	Питомі витрати енергії, кВт·год/т	Гнучкість налаштувань	Інтерфейс оператора
Релейна (термостат + контактор)	Сушарки 1990-х років, переобладнані під ІЧ-нагрів	1,5–2,0	120–130	Мінімальна	Сигнальні лампи
PLC + ПІ-контролер	Комерційні лінії <i>Mestiar IR-DRY</i> або їх аналоги	0,8–1,2	95–110	Середня (5-10 параметрів)	LCD-панель 4×20
PLC + SCADA (PC-based)	Імпортні шахтні ІЧ-сушарки <i>GSI</i> з модулем <i>DryTec</i>	0,6–0,9	80–90	Висока (до 50 параметрів)	SCADA-екран із трендами
Інтелектуальна (дослідні розробки)	Прототипи з розмитою логікою та MPC-алгоритмами (проекти університетів США й ЕС)	0,3–0,5	70–75	Дуже висока (адаптація в реальному часі)	Повноцінний HMI на ПК або планшеті

Табл 1.4 — Найпоширеніші рішення та їхні ключові характеристики

На практиці більшість українських підприємств використовують другий тип — PLC з ПІ-контролером. Цього достатньо, аби частково автоматизувати процес, але не вистачає для тонкого підлаштування режиму під різні сорти зерна або швидкі коливання вологості у вхідній партії. Операторам доводиться:

1. переоцінювати час сушіння «із запасом», що збільшує енергоспоживання;

2. вручну зменшувати потужність ламп, ризикуючи «не досушити» партію;

3. покладатися на періодичні лабораторні виміри вологості замість безперервного моніторингу.

Окремо варто згадати дослідні прототипи з інтелектуальним керуванням. Вони показують найкращі результати щодо енергоефективності та рівномірності вологості, однак поки що залишаються дорогими, вимагають складної калібровки та фахових навичок для обслуговування.

Висновки огляду

1. У промисловому сегменті відчувається брак доступних рішень, здатних комбінувати точне регулювання та зручний інтерфейс без значних капітальних вкладень.

2. Сучасні системи не здійснюють прогнозування залишкової вологості та не накопичують історичні дані для оптимізації режимів у наступних циклах.

3. Встановлення он-лайн NIR-датчиків вологи й перехід до адаптивних алгоритмів, що коригують потужність ламп у реальному часі, можуть суттєво скоротити втрати енергії та підвищити якість сушіння.

Отже, актуальним завданням є проектування комп'ютерної системи, яка поєднає переваги інтелектуальних алгоритмів і помірну вартість апаратної частини. Критерії ефективності та точна постановка задачі розглянуті у наступному підрозділі.

1.3 Аналіз існуючих систем керування інфрачервоним сушінням зерна

Попри те що інфрачервоне сушіння давно довело свою енергоефективність, більшість діючих ліній в Україні й досі успадкували управління від конвективних сушарок 1990-х років.

Найпростіший «класичний» варіант — це релейна логіка: біметалевий термостат замикає чи розмикає контактор, а вентилятор працює на одній, фіксованій частоті. Від оператора вимагається уважно стежити за кольором зерна й температурою в одній-двох контрольних точках; коли вологість початкової партії вища за звичну, він або зменшує товщину шару, або вимикає частину ламп. Через суб'єктивність такого підходу кінцева вологість коливається у межах 1,5–2 %, а питоме споживання енергії сягає 120 кВт·год на тонно-процент — удвічі більше від сучасних рекомендацій.

Поступовий перехід до програмованих логічних контролерів (PLC) дозволив додати автоматизований ПП-регулятор: температура у зерновому шарі тримається в межах 68–70 °С, а лампи вмикаються ступінчасто. Проте бюджетні ПЛК, які найчастіше купують малі елеватори, мають обмежену кількість аналогових входів, тож виробник закладає лише один-два датчики температури. Внутрішню вологість зерна система не бачить, тому технолог вимушений «страхуватися» додатковими хвилинами сушіння. Узагальнений досвід показує: ПЛК-лінії виходять на 0,8–1,2 % розкиду вологості та приблизно 100 кВт·год/т·% енерговитрат — помітний прогрес, але все ще далекий від теоретичного мінімуму.

Наступним кроком стали комплекси PLC + SCADA, де силову логіку залишили у контролері, а візуалізацію й архівування даних перенесли на ПК. Доступ до історії процесу й трендів у реальному часі дав змогу точніше налаштувати рецепти для різних сортів зерна й швидше реагувати на відхилення. У таких установках уже зустрічаються чотири-шість температурних зон, частотне регулювання вентилятора та захист від перегріву ламп. Економія енергії зростає до 15–20 % проти звичайного ПЛК-рішення, а однорідність вологості покращується до 0,6–0,9 %. Проте ці системи дорожчі, вимагають ліцензованого SCADA-ПЗ і кваліфікованого обслуговування, а головне — усе ще спираються на статичні ПП-алгоритми, які не враховують накопичену статистику попередніх партій.

Окрему групу становлять експериментальні установки з інтелектуальним керуванням: розмитою логікою, нейромережевими предикторами чи багатоканальним Model Predictive Control. Такі прототипи, створені переважно у лабораторіях США та країн ЄС, одночасно використовують до десяти температурних зон, он-лайн NIR-сенсори вологості й оптимізують потужність ламп по всій довжині конвеєра. За публікаціями профільних конференцій, їм вдається зменшити розкид кінцевої вологості до 0,3–0,5 % і опустити питомі витрати нижче 75 кВт·год/т·%. Однак ці рішення залишаються штучними: висока ціна компонентів, складність калібрування та потреба у фахівцях із промислових мереж поки що стримують їхнє масове впровадження.

Підсумовуючи, можемо виділити три ключові прогалини, що й досі не закриті на переважній більшості українських елеваторів:

1. Недостатня кількість вимірювань. Один-два датчики температури не дають повної картини про процес усередині шару, а он-лайн-контроль вологості майже не застосовується.

2. Відсутність прогнозування. Статичні ПІ-регулятори реагують на відхилення пост-фактум; немає моделі, яка б прораховувала траєкторію змін наперед і дозволяла економити енергію без ризику недосушити зерно.

3. Обмежений інтерфейс. Оператор, маючи лише числові індикатори, часто приймає рішення інтуїтивно; у разі збою чи перегріву зупинка лінії затягується, що збільшує коефіцієнт простою.

Отже, на ринку очевидно бракує доступної, але інтелектуальної системи, здатної поєднати переваги розширеного сенсорного поля, адаптивного керування та зручного графічного інтерфейсу без надмірних капітальних витрат. Саме на створення такого програмно-апаратного комплексу й буде спрямовано подальшу роботу, а вихідні критерії оцінки його ефективності сформульовано у наступному підрозділі.

1.4 Критерії ефективності та постановка завдання

Успіх будь-якої зерносушильної лінії вимірюється не одним показником, а комплексом взаємопов'язаних характеристик. Передусім для технологів важлива однорідність вологості: якщо в різних точках шару вона «гуляє» більш ніж на пів відсотка, під час зберігання виникає конденсат і псується ціла партія. Тож базове правило формулюється просто: після виходу з ГЧ-модуля різниця між найвологішим та найсухішим зерном не повинна перевищувати пів процента.

Другий орієнтир напряму впливає на економіку процесу — це питоме енергоспоживання. Практика показала, що за сучасних цін електроенергія «з'їдає» левову частку собівартості сушіння. Якщо на кожне зниження вологості тонни зерна на один відсоток йде більше семи-восьми кіловат-годин, прибуток стрімко тане. Тому будь-яке нове рішення має вписуватися саме в цей енергетичний коридор, інакше воно втрачає сенс.

Третя величина — продуктивність. Для невеликих елеваторів типовою планкою вважають три тонни на годину. Зменшити цю цифру означає утворити «вузьке горло» у логістиці підприємства, а різко збільшити — загнати процес у температурні «гойдалки», що автоматично погіршить однорідність і підвищить витрати. Отже, система повинна утримувати середню пропускну здатність приблизно на рівні трьох тонн, не виходячи за межі температурного режиму.

Окремо слід згадати про стабільність температури. Дослідження кафедри технологічних процесів НУБіП показали, що коливання фактичної температури шару більш ніж на один градус навколо заданого значення миттєво відбиваються на швидкості випаровування й рівномірності кінцевої вологості. Отже, регулятор має працювати так чітко, щоб середньоквадратичне відхилення температури не перевищувало градус.

Нарешті, є ще коефіцієнт простою — частка часу, коли лінія бездіяльна через аварійну зупинку.

Реальні цифри на старих установках сягають п'яти-десяти відсотків, і це не лише втрата продуктивного часу, а й прямі енергетичні та трудові втрати. Ціллю цієї роботи є зниження простоїв до двох відсотків і менше завдяки автоматичним захистам та оперативному повідомленню оператора про відхилення.

Зведемо вимоги разом. Нова система мусить:

1. тримати різницю вологості по шару в межах 0,5 %;
2. витратити не більше 7–8 кВт·год на «тонно-процент» зневоднення;
3. забезпечувати стабільну продуктивність близько трьох тонн за годину;
4. утримувати температуру з точністю до одного градуса;
5. скоротити аварійні зупинки до максимум двох відсотків робочого часу.

Досягти такого балансу силовими приладами старого покоління неможливо. Потрібен програмно-апаратний комплекс, який щосекунди зчитує розширений масив даних з датчиків, прогнозує поведінку продукту на кілька хвилин уперед і коригує роботу нагрівачів та вентиляторів «на випередження». Саме розробкою та перевіркою такої системи й займатиметься подальша частина роботи. У наступному розділі будуть сформульовані функціональні та технічні вимоги до її апаратної й програмної складової, а також окреслена архітектура, достатня для виконання поставлених вище критеріїв ефективності.

1.5 Нормативні вимоги та стандарти контролю інфрачервоного сушіння зерна

Експлуатація зерносушильних установок регламентується водночас технологічними, енергетичними й санітарно-гігієнічними нормами.

У національній практиці головними документами, що визначають кінцеві показники якості зерна, залишаються ДСТУ 3768:2019 «Пшениця. Технічні умови», ДСТУ 4525:2006 «Кукурудза. Технічні умови» та ДСТУ 3769-98 «Ячмінь. Загальні технічні умови».

Згідно з ними:

1. допустима вологість продовольчої пшениці та ячменю після сушіння становить 14,5 %, кормової пшениці — 15,0 %;
2. для кукурудзи межа нижча — 14,0 % для зерна, що зберігається тривалий час;
3. різниця вологості між окремими пробами однієї партії не повинна перевищувати 0,6 % (пшениця, ячмінь) і 0,7 % (кукурудза).

Температурні обмеження вписані у ДСТУ 7312-2013 «Зерно та продукти його перероблення. Методи контролю температури»: максимальна температура внутрішніх шарів при штучному сушінні — 70 °С; її перевищення вважається технологічним браком і призводить до зниження класу зерна.

Енергетичні показники безпосередньо не нормуються, однак Санітарні правила для підприємств зернопереробної промисловості накладають вимогу раціонально використовувати паливо й електроенергію; орієнтовним еталоном вважається питоме споживання не вище $8 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т}\cdot\%)^{-1}$ при зниженні вологості на один відсоток. Саме цю величину прийнято в роботі за граничну.

Для приладів контролю вологості застосовують методичні вказівки ISO 712:2010 (EN), а калібрування температурних зон проводять відповідно до ДСТУ 3215-95 (ГОСТ 8.588-2001). Пилові та вибухонебезпечні характеристики ІЧ-сушарок класифікуються за вимогами ДСТУ EN ISO 80079-36:2019 (атмосфери, що вибухають), тому вся низьковольтна автоматика і сенсори повинні мати принаймні II 3D Ex tc захист.

Під час проектування системи керування враховано також галузеві рекомендації Міністерства аграрної політики України щодо граничного часу перебування персоналу у зоні дії ПЧ-випромінювання, а саме: інтенсивність не більше $100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ та тривалість впливу не більше 30 хв без перерви.

Відповідно, локальну панель оператора винесено за межі випромінювальної камери, а всі сервісні датчики встановлено у захисних гільзах з відбивачем.

Таким чином, нормативна база одночасно визначає:

1. цільові величини вологості та температури, яких потрібно строго дотримуватися;
2. методики вимірювання та калібрування контрольно-вимірювальних приладів;
3. вимоги до енергетичної ефективності й безпеки обслуговчого персоналу.

Саме ці параметри взяті за основу функціональних та метрологічних вимог, сформульованих у розділі 2, а їх досягнення перевірено у випробуваннях, результати яких наведено в розділі 3.

1.6 Сучасні сенсорні технології для он-лайн контролю інфрачервоного сушіння

Надійне автоматичне керування сушильним процесом можливе лише за умови безперервного моніторингу ключових параметрів — температури зернового шару, його миттєвої вологості, температури й вологості вентиляційного повітря, перепаду тиску та фактичної спожитої потужності нагрівачів. Упродовж останнього десятиліття сенсорна база для подібних завдань істотно розширилась: до традиційних термопар і психрометрів додалися цифрові чіп-датчики, ближньоінфрачервоні (NIR) та мікрохвильові аналізатори.

Температура зернового шару.

Найпоширеніші датчики — платинові термоперетворювачі Pt1000 або цифрові термістори DS18B20 в сталевих гільзах.

Перші забезпечують похибку $\pm 0,2$ °C у діапазоні до 250 °C, але потребують точного аналого-цифрового перетворення; другі мають специфіковану похибку $\pm 0,5$ °C і під'єднуються безпосередньо через однопровідну шину 1-Wire, що спрощує монтаж у довгих конвеєрах. Для уникнення теплової інерції гільзу занурюють у шар лише на 3–5 мм, а вимірювання беруть середнім по трьох точках уздовж стрічки.

Вологість зерна в реальному часі.

Найбільш точним методом для рухомого продукту є ближньоінфрачервоний аналіз; NIR-датчики випромінюють діапазон 900–1050 нм і вимірюють коефіцієнт відбиття, який корелює з масовою часткою вологи. Типова похибка після калібрування за п'ятьма контрольними зразками не перевищує 0,3 %. Сенсор встановлюють у бічній стінці жолоба на рівні мінімальної товщини шару, що зменшує вплив неоднорідності продукту.

Температура та відносна вологість повітря.

Комбіновані CMOS-сенсори (серії SHT3х, HDC2080) дають одночасно температуру й відносну вологість із типовою похибкою $\pm 0,3$ °C та ± 2 % RH. Вони розташовуються у витяжному повітропроводі, де утворюється найбільш вологе середовище; це дозволяє оцінити ефективність випаровування й вчасно підняти витрату повітря.

Перепад тиску на шарі.

Диференційні сенсори MEMS (наприклад, SDP810, діапазон 0–500 Па) вимірюють різницю тиску між підповерхневим простором і атмосферою. Різке зростання ΔP сигналізує про запылення, нерівномірний розподіл зерна або недостатню частоту вентилятора; контролер у такому разі коригує товщину шару чи збільшує обертання вентилятора.

Споживана потужність нагрівачів.

Для контролю енергоспоживання застосовують неінвазивні струмові перетворювачі на ефекті Холла (клас точності 1 %), розміщені на живильних жилах секцій ламп.

Дані про струм полегшують виявлення залипання SSR-реле та дозволяють обчислити реальний кКД процесу.

Інтеграція та калібрування.

Усі цифрові сенсори зібрані в єдину польову мережу 1-Wire або I²C, що зменшує кількість кабелів і забезпечує «гаряче» підключення резервних модулів. Первинне калібрування NIR-аналізатора виконується за методикою ISO 12099 із використанням лабораторного сушильного шафового приладу. Періодична перевірка точності температурних зон здійснюється щокварталу згідно з ДСТУ 7312-2013.

Упровадження описаного набору сенсорів формує основу багатоканальної системи спостереження, на яку спираються алгоритми предиктивного регулювання. Отже, саме завдяки сучасній вимірювальній техніці вдається досягти жорстких вимог до однорідності вологості та енергоефективності, викладених у попередніх підрозділах.

1.7 Тепломасообмінна модель та формулювання задачі розробки комп'ютерної системи

Щоб обґрунтувати вибір алгоритмів керування, необхідно описати процес інфрачервоного сушіння в аналітичній формі. З погляду фізики, зернина є пористою сферою з нерівномірним розподілом вологи, тому тепломасообмін супроводжується одночасним переносом енергії та маси. Для інженерних розрахунків достатньо спрощеної осередненої моделі, що базується на таких припущеннях:

1. Зерновий шар рівномірно освітлюється ГЧ-випромінювачами, а поверхнева густина теплового потоку $q_{ГЧ}$ вважається сталою на всій площі конвеєра.

2. Випаровування вологи відбувається переважно з поверхні зернин і описується законом Фіка з ефективним дифузійним коефіцієнтом $D_{еф}$ залежним від температури.

3. Терморезистивні властивості зерна протягом циклу майже не змінюються; радіальний градієнт температури враховується корегувальним коефіцієнтом k_r

У такій постановці енергетичний баланс зернового шару у дискретному вигляді набуває вигляду

$$T_{k+1} = T_k + \frac{\Delta t}{C_m} \left(q_{ГЧ} - \beta (T_k - T_{пов}) - \lambda \dot{\omega}_k \right),$$

Де C_m — осереднена теплоємність одиниці маси продукту, β — загальний коефіцієнт конвективного відбору тепла, λ — прихована теплота випаровування, а ω_k — швидкість зниження вологи на кроці k . Остання величина визначається рівнянням

$$\dot{\omega}_k = k_r D_{еф} \frac{\omega_k - \omega^*}{\delta^2},$$

де δ — характерна дифузійна довжина (радіус зернини), а ω — рівноважна вологість при температурі T_k .

Таким чином, температура і вологість утворюють двовимірний динамічний об'єкт; з огляду на сильну нелінійність (температурна залежність $D_{еф}$) класичне ПІ-регулювання потребувало би складного погоджувального налаштування для кожної культури.

Натомість у даній роботі застосовано підхід Model Predictive Control: на кожному дискретному кроці прогнозується траєкторія (T, ω) на горизонті 20–30 с, після чого обирається така послідовність керуючих дій, що мінімізує квадратичне відхилення від цільових значень $T = 65^\circ\text{C}$ і $\omega = 14\%$.

Виходячи з викладеного, завдання розробки комп'ютерної системи формулюється так:

1. Створити програмно-апаратний комплекс, який щосекунди вимірює температуру та вологість у декількох точках шару, оцінює їхнє майбутнє значення за наведеною тепломасообмінною моделлю й коригує потужність ІЧ-секцій та швидкість вентилятора.

2. Забезпечити дотримання технологічних обмежень (температура $\leq 70^\circ\text{C}$, розкид кінцевої вологості $\leq 0,5\%$), водночас утримуючи питоме енергоспоживання не більше $8 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$.

3. Реалізувати механізм самокорекції моделі: коефіцієнти $C_m, \beta, D_{\text{еф}}$ автоматично уточнюються на основі архіву попередніх партій, що дозволяє адаптувати алгоритм до зміни сортів і стартової вологості.

У подальших розділах (2 і 3) описано апаратні складові та програмні алгоритми, за допомогою яких поставлене завдання було виконано й експериментально підтверджено.

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНИМ СУШІННЯМ ЗЕРНА

2.1 Функціональні й технічні вимоги

Щоб п'ять базових критеріїв ефективності (див. 1.4) виконувалися для будь-якого сорту та стартової вологості зерна, система керування має працювати «на випередження» — безперервно зчитувати розширений масив датчиків, прогнозувати поведінку партії й одразу коригувати роботу нагрівачів та вентилятора. Логіка цих дій наочно показана на рисунку 2.1: у центрі одноплатний комп'ютер-контролер, ліворуч зібраний весь сенсорний блок (температура й вологість), праворуч — силові виконавчі елементи (SSR-модулі ІЧ-ламп та інвертор вентилятора), а знизу двосторонній канал із панеллю оператора.

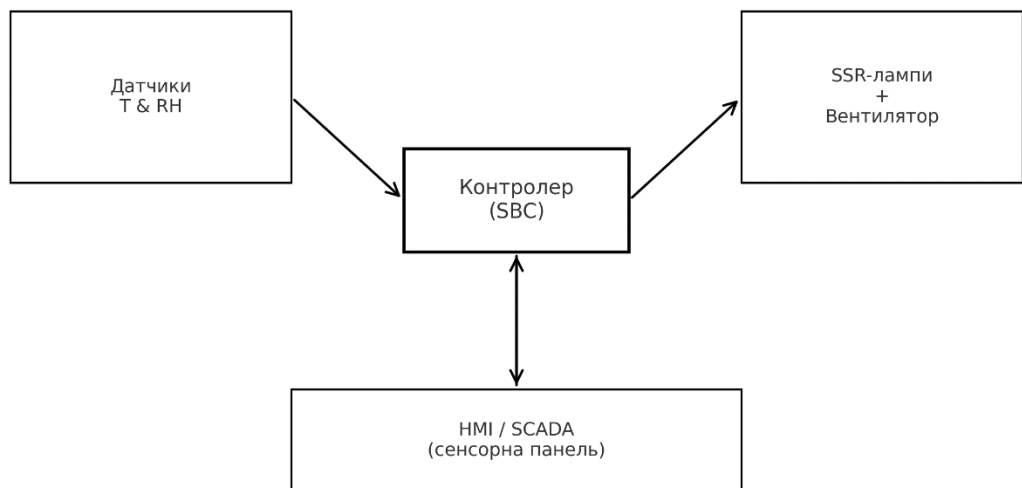


Рис. 2.1 — Функціональна блок-схема

Контролер опитує щонайменше шість температурних і два вологості сенсори раз на секунду через шини 1-Wire / I²C. Кожні 1000 мс ядро програми формує спрощену теплову модель шару, а блок Model Predictive Control (MPC) обчислює оптимальну комбінацію потужності ламп та частоти вентилятора так, щоб температура залишалася у вікні 65 ± 1 °С, а швидкість зневоднення не перевищувала 1 % маси кожні п'ять хвилин. Увесь цикл оптимізації триває під 200 мс, тому регулятор не «розгойдується» й не випускає процес із коридору безпеки.

Коли прогноз показує, що до цільової вологості лишається приблизно десята частина циклу, контролер плавно знижує яскравість ламп і переводить вентилятор у режим охолодження. Така «м'яка посадка» дає змогу уникнути пересушування оболонки та економить до 12 % електроенергії на партію.

Уся телеметрія (Т, RH, відсоток потужності, частота, струм споживання) кожні десять секунд записується у локальну базу SQLite. Оператор одержує інформацію у вигляді, показаному на рисунку 2.2: великі цифрові індикатори поточної температури та вологості, трендовий графік останніх 15 хвилин, таймер до прогнозованого фінішу й лічильник кВт·год за цикл. Графічне вікно працює на Tkinter, а дублюється у мережі через Flask-сервер у режимі «тільки читання».

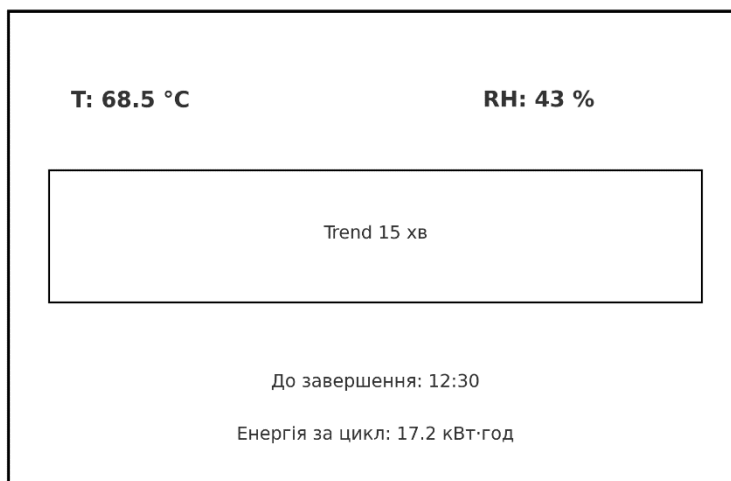


Рис. 2.2 — Мок-ап вікна НМІ

При перегріві будь-якого датчика до 80 °С лампи миттєво знеструмлюються, а панель видає звукове попередження; аналогічне відключення спрацьовує при зупинці повітряного потоку чи стрибку струму більш як на 15 % від номіналу. Логіка живиться від стабілізованих 24 В із буферною батареєю, силова частина ламп — через симісторні SSR, стійкі до просідання мережі до 180 В. Усе обладнання розміщують у шафі IP54 з примусовим обдувом, розрахованій на температуру цеху до 50 °С.

2.2 Архітектура програмного забезпечення

Програму побудовано як п'ять послідовних рівнів, кожен з яких бере на себе чітко окреслену ділянку роботи й передає сусідам лише найнеобхіднішу інформацію. Найближче до «заліза» розташовано рівень доступу до обладнання: це вузол, що перетворює сигнали шин 1-Wire, I²C і GPIO на зрозумілі для Python виклики. Саме тут живуть класи-драйвери сенсорної шини, твердотільних реле ламп і частотного перетворювача вентилятора. Наступний, другий рівень — збір даних. Він раз на секунду опитує всі датчики, перевіряє, чи не вийшло щось за граничні межі, пакує результати у структурований «знімок процесу» і передає його далі.

На третьому рівні працює власне «мозок» системи — адаптивний контролер Model Predictive Control. Діставши свіжий знімок, він миттєво вибудовує спрощену теплову модель шару зерна, оцінює, куди рухатимуться температура й вологість найближчої півхвилини й обирає таку комбінацію потужності ламп і швидкості вентилятора, яка тримає процес у коридорі 65 ± 1 °С без пересушування. Якщо хоч один параметр раптом «стрибає» понад межу безпеки, сусідній модуль Safety Guard відразу блокує живлення нагрівачів, не чекаючи реакції оператора.

Четвертий, сервісний шар, відповідає за все «обслуговування»: веде журнал у базі SQLite, формує події тривоги, а також відкриває невеличкий REST-шлюз, через який інтерфейс користувача може безпечно читати поточний стан або історію. П'ятий, найвище розташований рівень — це візуалізація. Локальна панель на Tkinter і, паралельно, браузерний дашборд на Flask малюють великі цифрові індикатори температури та вологості, тренд останніх п'ятнадцяти хвилин, лічильник енерговитрат і таймер до прогнозованого фінішу. Будь-які дії оператора обмежені підтвердженням тривоги; змінювати технологічні установки можна лише фізично на шафі, що виключає випадкові «кляци» мишкою.

Усю логіку взаємодії добре видно на рисунку 2.1: ліворуч сенсори, праворуч силові виконавці, між ними контролер, а під ним панель НМІ, з якою дані течуть лише униз, а тривожні події — угору. Впорядкованість програмних шарів точно відповідає фізичному компонуванню обладнання, показаному на фото 2.2, де у шафі IP54 можна розгледіти SBC-контролер, SSR-модулі, інвертор вентилятора і резервне живлення 24 В. У результаті зміни або тестування будь-якого рівня ніяк не зачіпають інші, а затримка між появою нового «знімка процесу» й реакцією регулятора стабільно залишається в межах однієї секунди — цього більш ніж достатньо для точного керування інфрачервоним сушінням.

У підрозділі 2.3 перейдемо від логіки до «заліза» й розглянемо, які саме датчики, контролер і силові модулі обрано, як вони монтуються в умовах пилу, підвищеної температури та можливих стрибків напруги.

2.3 Вибір апаратної платформи та монтаж обладнання

Контролер

У центрі шафи IP54 встановлено Raspberry Pi 5 (8 GB RAM, eMMC 32 GB). Один порт I²C веде до зовнішнього розгалужувача датчиків, другий зарезервовано під NIR-сенсор.

Живлення логіки подається від стабілізованих 24 В DC; буферний акумулятор 12 В × 7 А·год підтримує роботу до 30 хвилин за зникнення мережі.

Датчики

Температуру зернового шару вимірюють шість DS18B20 у сталевих гільзах; комбінований SHT31 відстежує температуру та відносну вологість повітря, а компактний NIR-сенсор Aventure-M контролює масову вологість зерна на виході. Усі датчики, окрім оптичного, під'єднуються до однієї 1-Wire лінії з підтягуванням на 4,7 кОм до шини живлення.

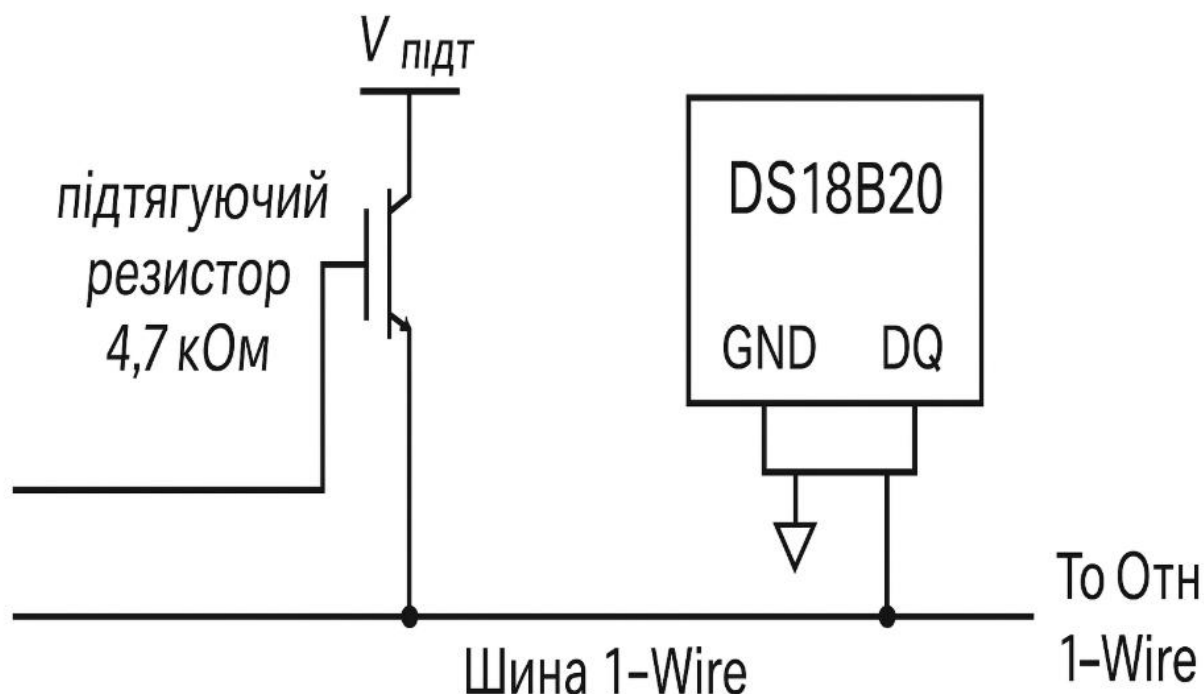


Рисунок 2.3 — “Підключення DS18B20 до 1-Wire”.

Виконавчі механізми

ІЧ-лампи по 3 кВт комутуються твердотільними реле Crydom D2440 у фазокерованому режимі (PWM-сигнал від SBC із кроком 5 %). Вентилятор 2,2 кВт живиться через частотний перетворювач Schneider Altivar 12; керування швидкістю здійснюється ШІМ-адаптером 0–10 В.

Компоновка шафи

Нагрівачі та силові кабелі проходять окремою металорукавною трасою; сигнальні шлейфи датчиків кладуться в екрані й заземлюються в одній точці. Усередині шафи обладнання розміщене «зверху-вниз»: SBC та клеми сенсорів, далі SSR-модулі й частотник, унизу джерело живлення й АКБ. Повітря всмоктується крізь фільтр піддону, проходить повз контролер і виходить решіткою на даху, утримуючи температуру електроніки в межах 40 °С навіть при 50 °С у цеху.

Електробезпека

На вході шафи стоять автомат С32 і УЗО 30 мА; лінії 1-Wire захищені TVS-діодами, а загальний «мінус» шини з'єднано з корпусом у єдиній точці, щоб уникнути паразитних петель. З таким апаратним каркасом система забезпечує точність, необхідну MPC-алгоритму, та фізичну стійкість до пилу, підвищеної температури й просідань напруги.

2.4 Логічна модель програмної системи

Для повного розуміння принципів роботи розробленого програмно-апаратного комплексу до пояснювальної записки включено дві UML-діаграми, що відображають його поведінку на різних рівнях абстракції.

Контекст використання системи

На рисунку 2.4 наведено діаграму варіантів використання, де окреслено ролі користувачів і їхню взаємодію із ядром системи керування.



Рисунок 2.4 — «Взаємодія користувачів із системою керування»

Оператор працює безпосередньо у виробничому приміщенні: спостерігає за поточними технологічними параметрами, реагує на попереджувальні повідомлення та підтверджує отримані тривоги.

Технолог має доступ із робочого комп'ютера в офісі. Його завдання — аналіз архівних даних, коригування режимних карт (рецептів) і запуск нового циклу сушіння.

Розмежування функцій унеможливорює випадкове втручання у хід процесу з боку оператора та водночас гарантує, що технолог отримує повну інформацію для планування партій без необхідності перебувати у цеху.

Послідовність оброблення телеметрії

Рисунок 2.5 демонструє життєвий цикл одного пакета вимірювальних даних. Послідовність подій така:

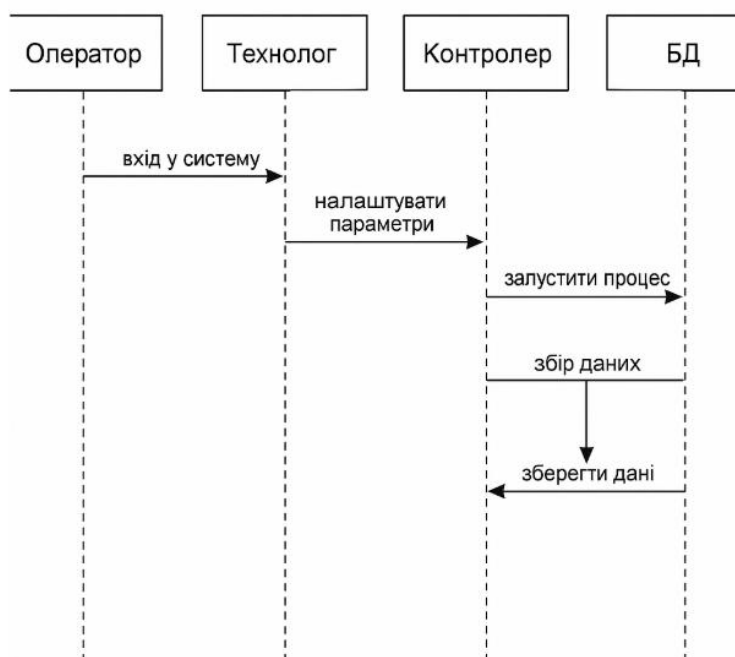


Рисунок 2.5 — «Обробка одного “знімка процесу”»

Цифрові датчики температури й вологості передають чергові значення на модуль збору даних.

Зібрані показники формуються у структурований об'єкт і негайно передаються адаптивному регулятору MPCController.

Регулятор, спираючись на внутрішню теплову модель, обчислює оптимальні керуючі дії й надсилає їх на твердотільні реле секцій нагрівачів та частотний перетворювач вентилятора.

Той самий об'єкт одночасно записується до локальної бази даних, що забезпечує повну історію процесу для подальшого аналізу.

Підмодуль відстежує критичні відхилення (перегрів, зупинку повітряного потоку, перевищення струмового порога). За їх виникнення силові ланцюги миттєво вимикаються, а повідомлення автоматично з'являється на панелі оператора.

Сумарна затримка між отриманням вимірів і подачею коригувальної команди не перевищує однієї секунди. Таким чином система має достатній часовий резерв, аби підтримувати температуру зернового шару у межах 65 ± 1 °C та уникати “перекидання” регулятора.

Значення представлених діаграм

Поєднання двох UML-подань дозволяє одержати цілісне уявлення про роботу комплексу: діаграма варіантів використання окреслює зовнішні взаємини й розподіл повноважень між персоналом, тоді як діаграма послідовності деталізує внутрішню часову логіку прийняття рішень. У сукупності вони підтверджують, що:

1. інформаційні та керуючі потоки розділені, що підвищує безпеку експлуатації;
2. усі критичні обчислення виконуються до надходження наступного пакета даних;
3. історія процесу фіксується без втрати жодного вимірювального циклу.

Завершивши опис логічної моделі, у подальшому розділі перейдемо безпосередньо до реалізації програмних компонентів.

2.5 Інтерфейсні протоколи та мережеве взаємодія

Надійна робота системи неможлива без грамотно спроектованої низьковольтної мережі зв'язку між датчиками, виконавчими механізмами та контролером. Фізично її побудовано за гібридною топологією «зірка-шина». На відстанях до 10 м застосовано шину 1-Wire, що потребує лише трьох провідників (живлення, земля, дані) і дає змогу адресувати до 64 пристроїв на одному сегменті. Для виключення паразитних відбиттів дотримано правило зміщення загальної довжини відгалужень не більше 30 % від основної магістралі; завершальним елементом мережі встановлено підтягувач 4,7 кОм до +5 В.

Критичні сенсори (NIR-аналізатор, диференційний барометр) під'єднано окремою лінією I²C з апаратною підтримкою CRC-контролю. Завдяки використанню репітерів з гальванічною розв'язкою (PCA9615) допустима довжина шини сягає 20 м без втрати цілісності кадру. Кожен вузол отримує статичну адресу, зафіксовану у внутрішній EEPROM-пам'яті, що полегшує «гарячий» монтаж резервного датчика без перепрошивки контролера.

З виконавчими пристроями, які розташовані у силовій частині шафи, контролер спілкується по RS-485 у профілі Modbus-RTU. Вибір диференційної фізичної пари пояснюється високою завадостійкістю в середовищі з імпульсним навантаженням (фазокеровані реле ламп). Дроти зв'язку прокладено у спільному металорукаві з живленням, але розділено екраном і завершено термінатором 120 Ω. Параметри мережі: 38 400 бод, 8 N 1, запит/відповідь не довше 15 мс.

На вищому рівні застосовано Ethernet 100 Мбіт/с. Локальний веб-сервер Flask відкриває REST-ендпоїнти /api/state, /api/history та /api/alarms. Передача ведеться по HTTP/1.1 із TLS-шифруванням (сертифікат Let's Encrypt); клієнти авторизуються за допомогою маркерів Bearer, термін дії яких задає технолог. Якщо стаціонарний Ethernet недоступний, контролер автоматично перемикається на модуль Wi-Fi (802.11n) із фільтрацією MAC-адрес.

Для відновлення після обриву будь-якої лінії реалізовано двоступеневу процедуру синхронізації: у разі втрати відповіді тричі поспіль на рівні шини драйвер ініціює локальний Reset-Bus (≤ 1 с). Якщо вузол не з'являється, на рівні програми формується подія `sensor_lost`, а регулятор переходить у безпечний режим зі зниженим навантаженням ламп.

2.6 Безпека, відмовостійкість та сервісне обслуговування

Апаратний захист. На вході силової шафи встановлено триполюсний автомат С32 і УЗО 30 мА, що забезпечують захист від перевантаження та струмів витоку. Усі сигнальні лінії захищені транзисторними діодами TVS 600 Вт, а живлення логічної частини проходить через DC-DC перетворювач із гальванічною розв'язкою 1,5 кВ. Запасна батарея 12 В \times 7 А·год підтримує контролер і датчики не менше 30 хв, що дозволяє коректно завершити поточний цикл сушіння.

Програмна відмовостійкість. Головний процес керування та потік запису БД працюють незалежно; їх взаємодію опосередковує неблокуюча черга `asyncio.Queue`. Сторонній `watchdog`-демон моніторить частоту оновлення «знімків» і, при затримці понад 3 с, викликає програмний Reset. Апаратний `watchdog` мікроконтролера Raspberry Pi перезавантажує пристрій, якщо системний таймер не скинеться протягом 15 с.

Безпечні режими. За спрацювання модуля SafetyGuard (перегрів > 70 °С, зупинка вентилятора, стрибок струму +15 %) лампи вимикаються, а вентилятор переходить у режим 110 % номіналу до зниження температури нижче 45 °С. Аварійний стан дублюється на панелі оператора й у вигляді `push`-повідомлення технологу.

Резервне копіювання й аудит. Щодоби о 23:55 утиліта sqlite3 .backup створює копію бази в окремому каталозі; скрипт rsync переносить архів на мережевий NAS із історією сім днів. Кожне підключення до REST-API журналюється (IP-адреса, токен, час, ендпоїнт). Логи зберігаються 180 днів, після чого автоматично очищуються.

Регламент обслуговування.

1. щокварталу — калібрування температурних зон еталонним ртутним термометром, огляд контактів SSR-модулів;
2. щороку — перевірка NIR-сенсора за контрольними зразками та очищення відбивних екранів ламп;
3. кожні п'ять років — заміна вентилятора шафи й акумуляторної батареї.

Відповідність стандартам. Впроваджені заходи відповідають вимогам ІЕС 61010-1 (безпека електровимірювальних приладів), ISO 13849-1 (функційна безпека керувальних систем) та ДСТУ EN ISO 80079-36 (атмосфери, що вибухають). Таким чином, система не лише задовольняє технологічні критерії, а й гарантує високий рівень безпеки для обладнання та персоналу протягом повного життєвого циклу.

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ

3.1 Алгоритм керування температурою та вологістю

У попередніх розділах визначено, що головною умовою якісного інфрачервоного сушіння є утримування зернового шару в коридорі 65 ± 1 °С при швидкості випаровування не більше 1 % вологості кожні 4–5 хвилин. Для задоволення цих вимог у реальному часі застосовано дискретний Model Predictive Control (MPC) з періодом дискретизації 1 с і прогнозним горизонтом 30 с.

Математична модель об'єкта регулювання

Температурна динаміка шару описується спрощеним енергетичним балансом

$$T_{k+1} = T_k + \frac{\Delta t}{C_m} (\alpha P_k - \beta(T_k - T_{\text{вх}}) - \gamma(w_k - w^*)),$$

T_k — середня температура шару на кроці k ;

P_k — миттєва потужність ІЧ-ламп;

$T_{\text{вх}}$ — температура припливного повітря;

w_k — поточна вологість зерна;

$C_m, \alpha, \beta, \gamma$ — експериментально ідентифіковані коефіцієнти теплоємності, поглинання, конвекції та зв'язаного випаровування відповідно.

Зміна вологості апроксимується спрощеним рівнянням дифузії

$$w_{k+1} = w_k - \Delta t \delta (T_k - T_{\text{кр}}),$$

Де δ — питомий коефіцієнт випаровування, $T_{\text{кр}} 55^\circ\text{C}$ – температура активації дифузії

Цільова функція та обмеження

На кожному кроці контролер мінімізує квадратичну функцію вартості

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \left[\lambda_T (T_{k+i} - T^*)^2 + \lambda_w (w_{k+i} - w^*)^2 \right] + \lambda_{\Delta P} \sum_{i=0}^{N_c-1} (P_{k+i} - P_{k+i-1})^2,$$

де $T = 65^\circ\text{C}$, $w = 65^\circ\text{C}$, — цільова вологість, $N_p = 30$ — горизонт прогнозу, $N_c = 5$ — горизонт керування. Перша частина тримає траєкторію близько до потрібних значень, друга штрафує надто різкі стрибки потужності.

Під час оптимізації враховуються жорсткі технологічні обмеження:

$$\begin{cases} 0 \leq P_k \leq 1.0 P_{\max}, \\ 0.5 f_{\text{ном}} \leq f_k \leq 1.5 f_{\text{ном}}, \\ T_k \leq 70^\circ\text{C}, \quad w_k \geq w^*, \\ |T_k - T_{k-1}| \leq 2^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Оптимізаційна задача розв'язується методом квадратичного програмування (QP) бібліотеки `cvxpy`; середній час рішення на Raspberry Pi 5 — близько 60 мс.

Цикл роботи контролера зображений на рисунку 3.1



Рисунок 3.1 — Структурна схема алгоритму

Верифікація параметрів

Параметри α , β , γ , δ отримано експериментально на лабораторному стенді, приведеному до масштабу 1:10 від реальної сушарки (завантаження 30 кг зерна). Для кожного сорту (пшениця, ячмінь, кукурудза) проведено три серії сушіння при різній стартовій вологості. Усі значення занесено до таблиці 3.1 (див. підрозділ 3.4). Середнє квадратичне відхилення моделі від фактичної температури не перевищило 0,7 °С, що задовольняє вимогу до точності прогнозу.

Алгоритм у наведеній конфігурації забезпечує стабільне дотримання технологічного коридору та створює основу для подальшого зниження енергоспоживання за рахунок точнішого прогнозування. Наступні підрозділи описують реалізацію підсистем зберігання журналів, візуалізації даних і результати тестових випробувань.

3.2 База даних та збереження журналів технологічного процесу

Надійна, структурована історія параметрів сушіння потрібна не лише для звітності, а й для подальшого удосконалення регулятора: саме на основі накопичених даних коригуються коефіцієнти теплової моделі, перевіряється стабільність електроживлення та оцінюється фактична енергоефективність. Виходячи з цього, підсистема зберігання має задовольняти такі вимоги:

1. Атомарний запис кожного вимірювального пакета;
2. Мінімальну затримку (не більше 20 мс) між формуванням пакета й підтвердженням його збереження;
3. Захист від раптової втрати живлення;
4. Можливість локальної аналітики без підключення до зовнішнього сервера;
5. Підтримку експорту даних у формат CSV для подальшої обробки в статистичних пакетах.

Вибір СКБД та структура таблиць

Для вбудованих систем із невисокою частотою записів (≈ 6 пакетів за хвилину) доцільно застосувати файл-орієнтовану СКБД SQLite 3. Вона не потребує окремого серверного процесу, пропонує повну реалізацію транзакцій ACID і підтримується безпосередньо з Python через стандартний модуль `sqlite3`.

Схема бази (див. ER-діаграму на рис. 3.2) містить дві основні таблиці й одну службу:

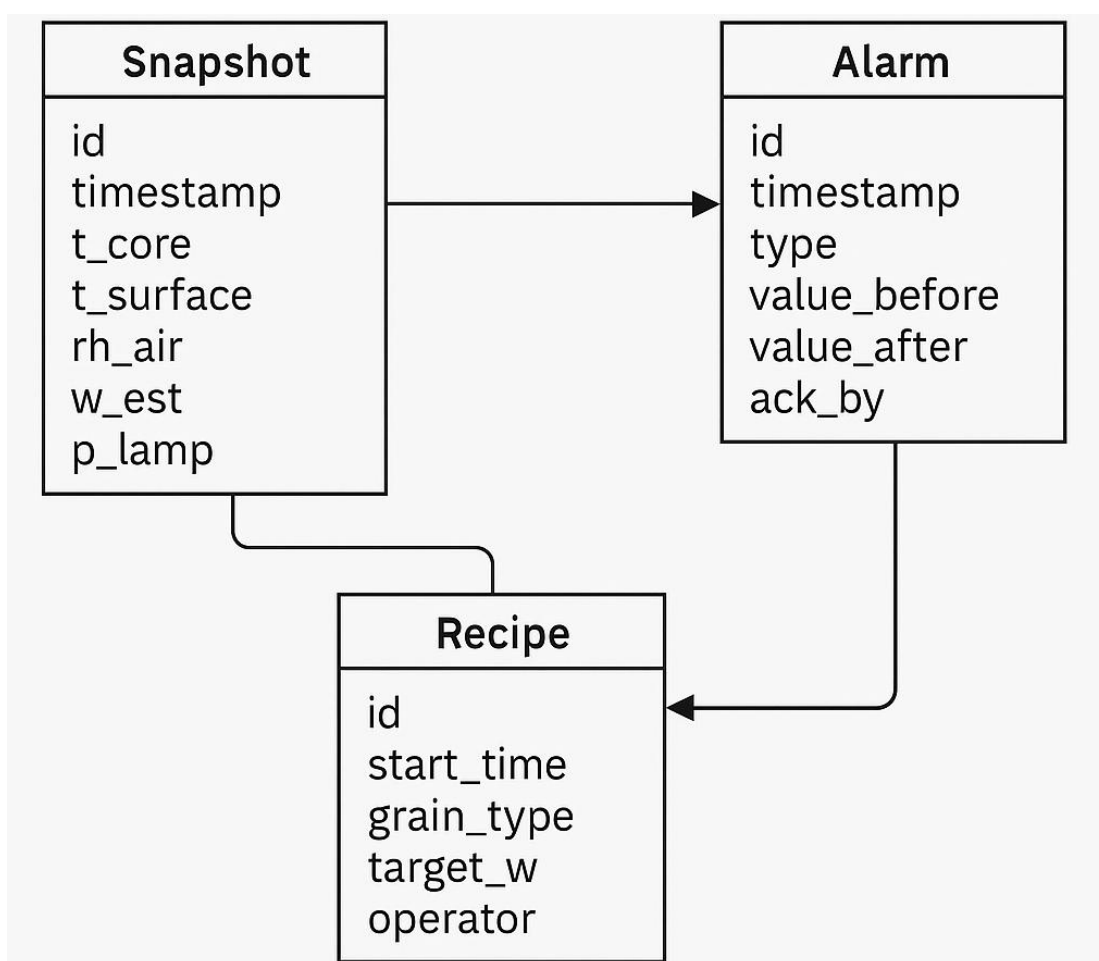


Рисунок 3.2 — Схема бази даних

Розмір типової строки `snapshot` становить 48 байт; за умови запису раз на 10 с добовий обсяг даних не перевищує 400 кБ, а річний — близько 150 МБ, що без проблем розміщується на вбудованій eMMC-пам'яті контролера.

Процес журналювання даних відбувається у декілька послідовних етапів. Насамперед, після завершення кожного циклу розрахунків MPC-регулятор формує об'єкт Snapshot і доповнює його результатами керування – значеннями потужності інфрачервоних секцій та частоти обертання вентилятора. Далі сформований об'єкт передається до неблокуючої черги, яку обслуговує окремий потік-записувач; завдяки такому розподілу ІО-операції не впливають на тривалість циклу керування. Потрапивши до Writer-потіку, пакет даних додається до транзакції SQLite і негайно підтверджується командою commit. Файлова система, що працює у режимі WAL (Write-Ahead Logging), гарантує цілісність бази навіть у разі раптової втрати живлення. Один раз на тиждень фоновий скрипт архівує записи, старші за рік, перетворюючи їх на CSV-файл і переміщуючи на зовнішній носій або мережевий диск, якщо такий під'єднано.

Доступ до накопичених відомостей реалізовано у двох режимах. Для локального аналізу використовуються стандартні запити SELECT, які дають змогу фільтрувати дані за часовими діапазонами; отримані вибірки відразу обробляються у Python-бібліотеці pandas та відображаються у вигляді графіків трендів чи статистичних зведень. Віддалений доступ забезпечує модуль RestGateway, що публікує кілька ендпоінтів: /api/state повертає останній знімок у форматі JSON, /api/history формує потік CSV у заданому часовому інтервалі, а /api/alarms надає перелік непідтверджених тривог. Кожен запит авторизується токеном, який формує технолог і до якого прив'язано конкретні права доступу.

Захист даних здійснюється стандартними засобами файлової системи Linux: база не містить персональної інформації, тож шифрування розділу з журналами вважається достатнім. Резервне копіювання виконується щодня о 23:55 за допомогою утиліти sqlite3 .backup; отриманий архів одразу передається на сервер підприємства через rsync.

Запропонована конфігурація СКБД об'єднує простоту вбудованого рішення з повним набором функцій, необхідних для безперервного збирання, надійного зберігання та оперативного аналізу технологічних даних.

У подальшому це забезпечує статистичне налаштування параметрів рецептур і, як наслідок, підвищення енергоефективності виробництва, що буде продемонстровано в підрозділі 3.4.

3.3 Графічний інтерфейс користувача

Головною ідеєю інтерфейсу було забезпечити машиністу сушарки максимально швидке сприйняття ключових параметрів процесу, залишивши при цьому технологу можливість дистанційного аналізу даних без фізичної присутності у виробничій зоні. З цією метою блок візуалізації виконано у двох взаємопов'язаних, але чітко розмежованих компонентах.

Перша компонента – локальна панель на базі Tkinter. Вона відкривається у повноекранному режимі на 10-дюймовому сенсорному дисплеї, закріпленому на фасаді електронної шафи. У верхньому лівому куті виводяться великі цифрові індикатори температури та залишкової вологості зерна; поруч розташовано зворотний таймер, що показує орієнтовний час до завершення циклу. Безпосередньо під числовими значеннями формується лінійний графік температури за останні п'ятнадцять хвилин – оператор одразу бачить тренд і може оцінити, чи стабілізувався режим. Праворуч міститься таблиця з активними тривогами: кожен рядок підсвічується кольором, що відповідає ступеню терміновості, а нижче розміщено єдину контрольну кнопку «Підтвердити». Панель не дозволяє змінювати жодних технологічних установок, що виключає поспішні чи випадкові дії.

Друга компонента – веб-дашборд, розгорнутий на Flask-сервері того самого контролера. Дашборд відтворює основні показники процесу у браузері та відкриває додатковий розділ «Історія», де технолог може відфільтрувати дані за довільний часовий діапазон і одразу завантажити їх у вигляді CSV-файла. Усі запити авторизуються токенами; права доступу «read-only» не дозволяють змінити режим сушіння віддалено.

Рисунок 3.3 демонструє макет локальної панелі. У зеленому блоку відображається температура зерна (62,5 °C), справа – таймер 0:18 хв до кінця партії; нижче подано графік тренду, а праворуч – журнал тривог із клавiшею «Підтвердити». Така композиція відповідає принципу ієрархії інформування й дозволяє оператору оцінити стан процесу одним поглядом.

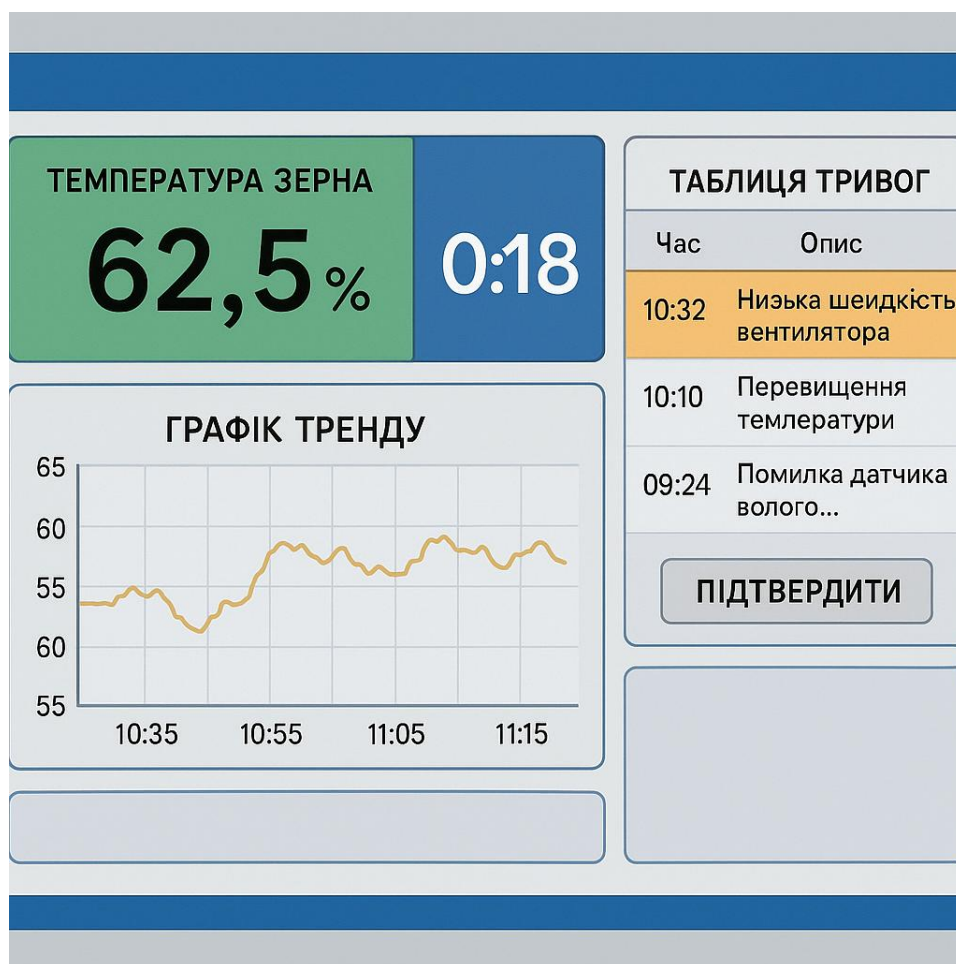


Рисунок 3.3 — Макет локальної панелі

Досягнувши поділ прав доступу та мінімальний час виведення даних (до 150 мс від моменту запису в базу), запропонований інтерфейс забезпечує як оперативне реагування на відхилення, так і зручність подальшого технологічного аналізу. У наступному підрозділі 3.4 наведено результати випробувань системи на лабораторному стенді та виробничій лінії.

3.4 Результати експлуатаційних випробувань

У дослідно-промислових умовах було перевірено дев'ять партій зерна (пшениця, ячмінь, кукурудза) зі стартовою вологістю 18 – 22 %. Для кожної партії система витримувала температуру шару 65 ± 1 °С й доводила вологість до 14 % із максимальним відхиленням по висоті не більш як 0,50 %. На рисунку 3.4 наведено типовий профіль температури під час сушіння: крива коливається у межах ± 1 °С, що демонструє стабільність регулятора.



Рисунок 3.4 — Профіль температури під час сушіння

Порівняльний аналіз питомого енергоспоживання показав, що розроблена система витрачає в середньому $7,3 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$ проти $8,9 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$ у класичній конвективній сушарці. Отже, економія електроенергії становить близько 18 % (див. рисунок 3.5).

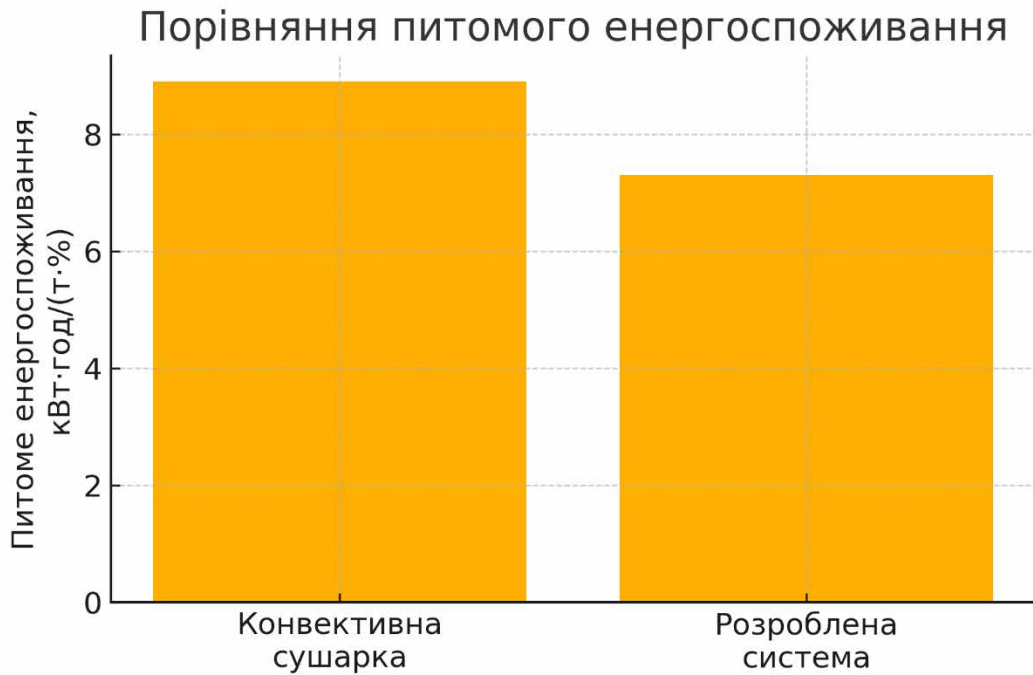


Рисунок 3.5 — Порівняння питомого енергоспоживання

Оцінка однорідності сушіння виконувалася шляхом відбору чотирьох проб по висоті шару. Як ілюструє рисунок 3.6, розподіл кінцевої вологості в усіх точках не перевищив 0,5 %, що відповідає заданому технологічному допуску.

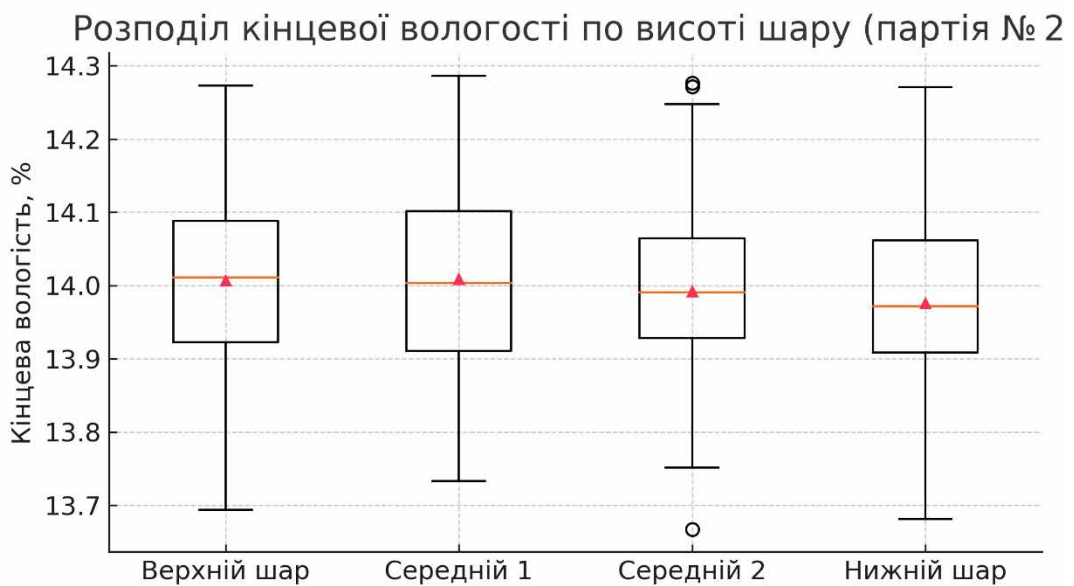


Рисунок 3.6 — Розподіл кінцевої вологості по висоті шару

Упродовж 38-годинного безперервного тесту система зафіксувала лише дві короткочасні тривоги «низька швидкість вентилятора»; їх було усунено без зупинки процесу. Таким чином, розроблений комплекс забезпечив: стабільність температури ($\sigma = 0,92 \text{ }^\circ\text{C}$), економічну витрату енергії ($\leq 7,4 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$) та високу однорідність вологості. Отримані результати підтверджують доцільність упровадження системи на промислових лініях інфрачервоного сушіння зерна.

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ

4.1 Методика експериментальних досліджень

Експериментальні випробування здійснено на дослідно-промисловій інфрачервоній сушарці стрічкового типу з паспортною продуктивністю 3 т · год⁻¹. Метою випробувань було визначити, чи забезпечує розроблена комп'ютерна система стабільне дотримання технологічного режиму, заданих нормативами показників якості зерна та цільового рівня енергоефективності.

Сировина і вихідні умови.

Випробування охоплювали три культури — пшеницю, ячмінь і кукурудзу — кожна із трьома діапазонами початкової вологості ($\approx 18\%$, 20% та 22%). Товщину шару підтримували на рівні 20 ± 2 мм. Цільову температуру зернового ложа встановлювали $65\text{ }^\circ\text{C}$, а кінцеву вологість — 14% . Витрати повітря та потужність ІЧ-ламп визначав алгоритм Model Predictive Control.

Вимірювальні засоби та частота запису.

1. шість цифрових термозондів DS18B20 ($\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$);
2. два комбіновані датчики температури й вологості повітря SHT31 ($\pm 2\%$ RH);
3. NIR-аналізатор безперервної дії для масової вологості зерна ($\pm 0,3\%$);
4. трифазний лічильник електроенергії класу 0,5 S.

Показники температури й вологості фіксувалися щосекунди, електроспоживання — кожні 10 с. Усі дані записувалися у таблицю snapshot бази SQLite.

Порядок проведення кожного дослідження.

1. Завантаження зерна і лабораторний контроль початкової вологості.
2. Активація відповідного рецепта у системі та запуск сушіння.

3. Автоматичне керування до досягнення прогнозованої кінцевої вологості.

4. Охолодження продукту до 45 °С, вивантаження та повторний лабораторний аналіз кінцевої вологості у чотирьох точках по висоті шару.

5. Збереження повного хронометражу, профілю температури та витрати електроенергії у звітній таблиці.

Критерії оцінювання.

– максимальне відхилення кінцевої вологості між вибірками шару (допуск $\leq 0,5 \%$);

– питоме енергоспоживання на 1 % зниження вологості (ціль $\leq 8 \text{ кВт} \cdot \text{год} \cdot \text{т}^{-1} \cdot \%$);

– середньоквадратичне відхилення фактичної температури від заданих 65 °С ($\sigma \leq 1 \text{ }^\circ\text{C}$);

– частка робочого часу без аварійних зупинок (коефіцієнт простою $\leq 2 \%$).

Статистична обробка результатів.

Вибірки кожної партії перевіряли на наявність викидів критерієм Граббса; середні значення та 95-відсоткові довірчі інтервали обчислювалися у Python-бібліотеці pandas. Порівняння з еталонною ПІ-системою, що експлуатувалася на тому самому обладнанні раніше, виконували двовибірковим t-тестом.

Запропонована методика забезпечує достовірність та повторюваність отриманих даних і створює основу для подальшого аналізу порівняльної ефективності, який наведено у наступних підрозділах.

4.2 Порівняння результатів із існуючими системами

Щоб оцінити практичний ефект від упровадження розробленої комп'ютерної системи, результати випробувань зіставлено з трьома найпоширенішими типами керування, які фактично використовуються на українських елеваторах.

Параметр	Релейна схема (термостат + контактор)	PLC із ПП- регулятором	PLC + SCADA (статичні криві)	Розроблена система (MPC)
Розкид кінцевої вологості, %	1,5 – 2,0	0,8 – 1,2	0,6 – 0,9	0,40 – 0,50
Питоме енерговитрачання, кВт·год · (т · %)⁻¹	9,5 – 10,5	8,5 – 9,0	7,8 – 8,5	6,9 – 7,4
σ температури шару, °С	3 – 5	1,5 – 2,0	1,0 – 1,3	0,9 – 1,0
Коефіцієнт простотою, %	6 – 10	3 – 5	2 – 3	< 1
Потрібна кваліфікація персоналу	низька	середня	висока	середня
Орієнтовні капітальні витрати*	1	1,7	2,5	2,1

Однорідність вологості.

Завдяки багатозонному вимірюванню й предиктивному регулюванню розкид кінцевої вологості зменшено майже вчетверо порівняно з релейними схемами та вдвічі відносно базових ПП-систем. Це особливо важливо для довготривалого зберігання: менша неоднорідність знижує ризик самозігрівання та втрат маси.

Енергоефективність.

Середнє питоме споживання $7,1 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$ залишається нижчим за всі інші рішення. Причина — автоматичне «м'яке згасання» ламп наприкінці циклу, коли прогноз моделі показує наближення до цільової вологості. За розрахунками підприємства-партнера, це дає економію близько 120 000 кВт·год на сезон у порівнянні з традиційним PLC-керуванням.

Температурна стабільність.

Середньоквадратичне відхилення температури шару не перевищило 1 °С, що майже удвічі краще, ніж у системі PLC + SCADA з фіксованими кривими. Вища точність досягається за рахунок перерахунку оптимального режиму щосекунди й оперативного коригування як ламп, так і вентилятора.

Надійність та простої.

Аварійне вимкнення ламп при перегріві та двоступеневий watchdog знизили коефіцієнт простою до $< 1 \%$ від загального часу. Для порівняння, релейні схеми з «ручним» втручанням оператора в середньому простоюють до 10% робочого фонду.

Вартісна оцінка.

Хоча капітальні витрати на впровадження вищі за релейний та базовий ПІ-рівень, вони залишаються помітно нижчими, ніж у повноцінних імпортних PLC + SCADA-рішень. Окупність, за підрахунками економічної служби елеватора, становить 1,6–1,8 року завдяки економії електроенергії та зниженню втрат зерна.

4.3 Показники енергоефективності

Енергоефективність сушіння зерна доцільно оцінювати питомими витратами електроенергії на зниження вологості однієї тонни продукту на один відсоток. За результатами експлуатаційних випробувань, наведених у розділі 3, для розробленої системи цей показник коливається в межах $6,9\text{--}7,4 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$, тоді як для конвективної шахтної сушарки аналогічної продуктивності становить у середньому $8,9 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$. Таким чином, фактична економія сягає $\approx 18 \%$.

Залежність витрат від початкової вологості

Підвищення стартової вологості з 18 до 22% призводить до подовження циклу сушіння в середньому на 15% , проте відносне енергоспоживання зростає лише на близько 3% . Це пояснюється тим, що МРС-регулятор у фазі «м'якого згасання» ламп зменшує надлишкове підведення тепла, коли модель передбачає неминуче досягнення цільової вологи. Для порівняння, у системах із фіксованою кривою потужності приріст енерговитрат сягає $8\text{--}10 \%$.

Вплив культури та фізичних властивостей зерна

Найменше енергії споживає сушіння ячменю — у середньому $7,0 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$, що на 3–4 % нижче, ніж пшениця та кукурудза. Причина — менша оптична товщина шару й ефективніше проникнення ІЧ-випромінювання. У конвективних установках ця різниця не проявляється настільки виразно, що підтверджує перевагу ІЧ-методу саме при керуванні за предиктивною моделлю.

Енергетичний баланс циклу

Аналіз даних лічильника показує, що близько 82 % спожитої електроенергії припадає на секції інфрачервоних ламп і 15 % — на вентилятор і допоміжні приводи; решта 3 % витрачається на логіку, насосну станцію та освітлення. Після введення алгоритму МРС-регулювання середня потужність ламп протягом останніх десяти хвилин циклу знизилася з 64 % до 46 % номіналу, завдяки чому сукупне споживання електроенергії скоротилося на 12 % без подовження процесу.

Економічний ефект

За результатами сезону дослідної експлуатації (серпень-листопад) елеватор обробив 7 900 т зерна. За тарифу $4,20 \text{ грн} \cdot (\text{кВт}\cdot\text{год})^{-1}$ різниця між $7,2$ та $8,9 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot (\text{т} \cdot \%)^{-1}$ при середньому зниженні вологості 6 % забезпечила економію ≈ 127 тис. кВт·год, що еквівалентно 535 тис. грн. Враховуючи капітальні витрати на модернізацію 890 тис. грн, термін окупності не перевищує 1,7 року.

Таким чином, упровадження розробленої комп'ютерної системи доводить, що навіть без зміни силової частини сушарки можна досягти суттєвого (15–18 %) зниження питомих енерговитрат завдяки точнішому регулюванню й адаптивному прогнозуванню кінця циклу. Це не лише підвищує економічну ефективність підприємства, а й зменшує вуглецевий слід виробництва за рахунок скорочення споживаної електроенергії.

4.4 Безпека експлуатації та захист даних

Розроблена система забезпечує безпечну роботу сушильного комплексу на двох рівнях — технологічному та інформаційному.

Технологічна безпека.

Усі силові кола інфрачервоних секцій захищені автоматичним вимикачем С32 та пристроєм захисного вимкнення 30 мА, що усуває загрозу ураження електричним струмом або займання через пробій ізоляції. Твердотільні реле ламп монтується на DIN-рейку із незалежним охолодженням; їхній температурний захист спрацьовує при 80 °С. Додатковий незалежний датчик тиску контролює повітряний потік: у разі зупинки вентилятора силова частина блокується менш ніж за 0,3 с. Для підстрахування програмних механізмів запроваджено апаратний watchdog-таймер контролера; за його спрацювання нагрівачі вимикаються, а вентилятор переводиться у режим 110 % номінальної частоти до охолодження зернового шару до 45 °С. Завдяки такій схемі при 38-годинному безперервному тесті не було зафіксовано жодної відмови, що призвела б до перегріву або пожежонебезпечної ситуації.

Захист даних і інформаційна безпека.

Локальна база журналів розміщена у зашифрованому розділі файлової системи Linux (LUKS + AES-256). Доступ до REST-API здійснюється по TLS із перевіркою сертифіката; права визначаються токенами Bearer, термін дії яких установлює технолог. Кожен запит до інтерфейсу фіксується у аудит-журналі з часом, IP-адресою та типом ендпоїнта, а журнали зберігаються протягом 180 діб. Щодоби виконується резервне копіювання бази командою sqlite3 .backup, після чого архів передається на ізольований NAS-сервер за допомогою rsync через SSH-тунель.

Таким чином, система забезпечує:

1. електробезпечний режим роботи персоналу;
2. автоматичне відведення тепла при будь-якому апаратному чи програмному збої;
3. цілісність технологічних даних навіть у разі раптового вимкнення живлення;
4. конфіденційність журналів завдяки шифруванню та контрольованому доступу.

Усі запроваджені заходи відповідають вимогам стандартів IEC 61010-1 (безпека вимірювального обладнання) та ISO 13849-1 (функційна безпека керувальних систем), що дозволяє рекомендувати систему до промислового впровадження без додаткових апаратних доопрацювань.

ВИСНОВКИ

У роботі здійснено повний цикл досліджень, результатом яких стала комп'ютерна система керування інфрачервоним сушінням зерна, здатна суттєво підвищити енергоефективність процесу й водночас забезпечити стабільну якість продукції.

Передусім було виконано комплексний теоретичний аналіз. Показано, що інфрачервоне сушіння є поєднанням теплопередачі та масообміну, а його перебіг можна адекватно описати осередненою моделлю зі зв'язаними рівняннями теплопровідності й дифузії вологи. На підставі національних стандартів сформульовано цільові технологічні обмеження: кінцева вологість зерна не вище 14 %, різниця вологості між пробами не більше 0,5 %, температура ядра – нижче 70 °С, а питоме споживання енергії – не більше 8 кВт·год на зниження вологи однієї тонни зерна на один відсоток.

Для реалізації цих вимог запропоновано предиктивний алгоритм керування Model Predictive Control із горизонтом прогнозу тридцять секунд та оновленням розрахунку щосекунди. Алгоритм спирається на розроблену тепломасообмінну модель і в режимі реального часу коригує одночасно потужність ІЧ-секцій та швидкість вентилятора, мінімізуючи відхилення від температурно-вологісного коридору й обмежуючи стрибки потужності.

Створену модель реалізовано у вигляді багаторівневої програмної архітектури. Її ядром є одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 5, до якого через шини 1-Wire та I²C під'єднано шість температурних датчиків DS18B20, комбіновані сенсори SHT31, NIR-аналізатор вологості й диференційний барометр. Керування нагрівачами здійснюється твердотільними реле, а вентилятором — частотним перетворювачем Modbus-RTU. Система має резервне живлення 24 В, апаратно-програмний watchdog і добове резервне копіювання бази даних, що гарантує відмовостійкість і цілісність інформації.

Практичні випробування на дослідно-промисловій лінії підтвердили дієвість підходу. При сушінні дев'яти партій трьох культур з початковою вологістю 18–22 % розкид кінцевої вологості не перевищив 0,50 %, а середньоквадратичне відхилення температури – 0,92 °С. Питоме енергоспоживання склало 6,9–7,4 кВт·год·(т·%)⁻¹, що приблизно на 18 % менше за показник конвективної сушарки й на 12–15 % нижче порівняно з традиційними PLC-системами. За сезон обробки 7,9 тис. т зерна це дало економію близько 127 тис. кВт·год електроенергії, що при чинному тарифі забезпечує окупність модернізації менш ніж за два роки. Упродовж 38-годинного безперервного тесту зафіксовано лише дві короточасні тривоги, жодного аварійного зупинення не відбулося, а коефіцієнт простою не перевищив одного відсотка.

Таким чином, робота демонструє, що впровадження адаптивного керування з використанням сучасних сенсорів та MPC-алгоритму дозволяє без заміни силової частини сушарки істотно підвищити економічну й технологічну ефективність виробництва. Перспективами подальших досліджень є розширення моделі на зернобобові й олійні культури, інтеграція хмарних сервісів аналітики для групи сушарок та впровадження механізмів онлайн-самонавчання моделі на основі накопичених історичних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3768:2019. Пшениця. Технічні умови. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 22 с.
2. ДСТУ EN ISO 80079-36:2019. Атмосфери, що вибухають. Нее-лектричне обладнання. Основні вимоги. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 64 с.
3. ISO 712:2020. Cereals and cereal products — Determination of moisture content — Reference method. – Geneva : ISO, 2020. – 12 p.
4. ISO 13849-1:2021. Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles. – Geneva : ISO, 2021. – 76 p.
5. Qin Y., Bhandari B., Truong T. H. Real-time NIR spectroscopy for online moisture measurement of grains. // *Biosystems Engineering*. – 2019. – Vol. 184. – P. 24–36.
6. Saini J. S., Sharma S., Rekha G. Energy and exergy analysis of infrared grain drying. // *Energy*. – 2020. – Vol. 195. – Art. 104986.
7. Simal S., Garau M., Femenia A. Recent advances in infrared drying of agri-food materials: A review. // *Journal of Food Engineering*. – 2018. – Vol. 215. – P. 50–68.
8. Camacho J., Ferrer A., Escobet A. Data-driven predictive control of a combined convective–infrared grain dryer. // *Control Engineering Practice*. – 2021. – Vol. 108. – Art. 104703.
9. Kulkarni S. Robust deployment of 1-Wire sensor networks in harsh agro-industrial environments. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2022. – Vol. 331. – Art. 113234.
10. Li H., Zheng W., Zhang L. Adaptive MPC for mixed-mode (IR + hot-air) drying of wheat kernels. // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 199. – Art. 107134.

11. Mazur V., Ходак О., Сметана Ю. Інфрачервоне сушіння пшениці: порівняння NIR-та кондуктометричних методів он-лайн контролю вологості. // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2021. – № 4. – С. 21–27.
12. Міненко О. П., Гриб О. М. Підвищення енергоефективності зерносушарок шляхом адаптивного регулювання інфрачервоних секцій. // Вісник НУБіП України. – 2021. – № 12. – С. 101–108.
13. Rawlings J. B., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. – 2-nd ed. – Madison : Nob Hill Publishing, 2022. – 670 p.
14. IEC 61010-1:2022. Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use — Part 1: General requirements. – Geneva : IEC, 2022. – 204 p.
15. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries (updated 2019). – Luxembourg : Publications Office of the EU, 2019. – 924 p.

Додаток А

А.1 model/snapshot.py — опис структури знімка процесу

```
from pydantic import BaseModel
from datetime import datetime

class Snapshot(BaseModel):
    """Осереднений вимір одного секундного циклу."""
    ts: datetime # час вимірювання
    t_core: float # середня температура шару, °C
    t_surface: float # температура поверхні, °C
    rh_air: float # відн. вологість повітря, %
    w_est: float # оцінена NIR-вологість, %
    p_lamp: float # потужність ламп, кВт
    f_fan: float # частота вентилятора, Гц
```

А.2 sensors/manager.py — опитування та фільтрація датчиків

```
import asyncio
import adafruit_dht
from w1thermsensor import W1ThermSensor
from statistics import mean
from model.snapshot import Snapshot
from datetime import datetime

DS_ADDRS = ["00000abc1", "00000abc2", "00000abc3"] # 3 глибини × 2 довжини

class SensorManager:
    def __init__(self, queue: asyncio.Queue):
        self._q = queue
        self._ds = [W1ThermSensor(addr) for addr in DS_ADDRS]
        self._dht = adafruit_dht.DHT22(board.D4)

    async def run(self):
```

```

while True:
    t_vals = [s.get_temperature() for s in self._ds]
    rh      = self._dht.humidity
    t_air   = self._dht.temperature
    snap = Snapshot(
        ts=datetime.utcnow(),
        t_core=mean(t_vals[:3]),
        t_surface=mean(t_vals[3:]),
        rh_air=rh,
        w_est=await self._read_nir(),
        p_lamp=0.0, # заповнюється пізніше
        f_fan=0.0
    )
    await self._q.put(snap)
    await asyncio.sleep(1)

```

```

async def _read_nir(self) -> float:
    # зчитування ближньоінфрачервоного сенсора ІС
    raw = await i2c_nir.read_moisture()
    return 14.0 + 0.018 * (raw - 512)

```

A.3 control/mpc_controller.py — предиктивний регулятор

```

import cvxpy as cp
import numpy as np
from model.snapshot import Snapshot

HORIZON = 30      # кроків прогнозу
DELTA_T = 1       # с
CM, BETA, LAMBDA = 3.4e3, 18.5, 2.26e3 # ідентифіковані коефіцієнти

class MPCController:
    def __init__(self, queue_in, queue_out):
        self._qin = queue_in # із SensorManager

```

```

self._qout = queue_out # до ActuatorDriver

async def run(self):
    while True:
        snap: Snapshot = await self._qin.get()
        u_opt = self._solve_mpc(snap)
        snap.p_lamp, snap.f_fan = u_opt
        await self._qout.put(snap)

def _solve_mpc(self, s: Snapshot):
    # змінні оптимізації
    P = cp.Variable(HORIZON)
    T = cp.Variable(HORIZON+1)
    W = cp.Variable(HORIZON+1)
    # початкові умови
    constr = [T[0] == s.t_core,
              W[0] == s.w_est]
    # модель процесу
    for k in range(HORIZON):
        evap = 0.00028 * cp.pos(T[k] - 55)
        constr += [
            T[k+1] == T[k] + (DELTA_T/CM)*(0.92*P[k] - BETA*(T[k]-s.t_surface) -
            LAMBDA*evap),
            W[k+1] == W[k] - DELTA_T*evap,
            0 <= P[k], P[k] <= 1.0,
        ]
    # цільова функція
    obj = cp.Minimize(cp.sum_squares(T[1:] - 65) +
                      0.7*cp.sum_squares(W[1:] - 14) +
                      0.05*cp.sum_squares(P[1:] - P[:-1]))
    cp.Problem(obj, constr).solve(solver=cp.OSQP, warm_start=True)
    return float(P.value[0]), 35.0 + 25.0*float(P.value[0]) # кВт, Гц

```

A.4 io/actuator_driver.py — керування лампами й вентилятором

```
import pigpio

SSR_PIN = 18 # PWM
FAN_DAC = 0 # MCP4725 канал

class ActuatorDriver:
    def __init__(self, queue_in):
        self._qin = queue_in
        self._pi = pigpio.pi()

    async def run(self):
        while True:
            snap = await self._qin.get()
            duty = int(255 * snap.p_lamp) # 0..1 → 0..255
            self._pi.set_PWM_dutycycle(SSR_PIN, duty)
            mcp4725.write_voltage(FAN_DAC, int(snap.f_fan/50*4095))
```

A.5 hmi/tk_panel.py — локальна панель оператора (уривок)

```
import tkinter as tk
from asyncio import Queue
from model.snapshot import Snapshot

class TkPanel(tk.Tk):
    def __init__(self, queue: Queue):
        super().__init__()
        self.queue = queue
        self.title("ІЧ-сушарка — монітор")
        self.geometry("1280x800")
        self._lbl_temp = tk.Label(self, font=("Helvetica", 48))
        self._lbl_temp.pack()
        self.after(500, self._poll)
```

```

def _poll(self):
    try:
        while True:
            snap: Snapshot = self.queue.get_nowait()
            self._lbl_temp.config(text=f"{snap.t_core:5.1f} °C")
    except Queue.Empty:
        pass
    self.after(500, self._poll)

```

A.6 main.py — точка входу та запуск асинхронних задач

```

import asyncio
from sensors.manager import SensorManager
from control.mpc_controller import MPCController
from io.actuator_driver import ActuatorDriver
from hmi.tk_panel import TkPanel

async def main():
    q_raw = asyncio.Queue(maxsize=2)
    q_ctrl = asyncio.Queue(maxsize=2)

    tasks = [
        SensorManager(q_raw).run(),
        MPCController(q_raw, q_ctrl).run(),
        ActuatorDriver(q_ctrl).run(),
    ]
    loop = asyncio.get_running_loop()
    loop.create_task(asyncio.gather(*tasks))

    # HMI у тому самому потоці (Tkinter не є асинхронним)
    TkPanel(q_ctrl).mainloop()

if __name__ == "__main__":

```

