

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему

**"РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ПАРАМЕТРАМИ МІКРОКЛІМАТУ В ІНКУБАТОРІ"**

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент.
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

асист., д-р філософії
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Якименко І.Ю.
(П.І.Б.)

Виконав

_____ (підпис)

Нерознак О.В.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)
" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Нерознаку Олександровичу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Розроблення системи автоматичного керування параметрами мікроклімату в інкубаторі ", затверджена наказом ректора НУБіП України від "24" 10 2025 р. № 2515"С"
2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "31" травня 2026 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:
 - 3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.
 - 3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.
 - 3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.
4. Перелік питань, які необхідно розробити:
 - 4.1. Технологія і промислове обладнання для виробництва інкубатора.
 - 4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу інкубаторі.
 - 4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.
 - 4.4. Розробка цифрової системи керування.
 - 4.5. Схеми системи автоматизації.
 - 4.6. Техніко-економічне обґрунтування.
5. Перелік графічних документів:
 - 5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування температурою в інкубаторі.

- 5.2. Система автоматизації процесу в інкубаторі. Схеми електричних принципів.
- 5.3. Система автоматизації процесу в інкубаторі. Схеми електричних з'єднань.
- 5.4. Система автоматизації процесу в інкубаторі. Схеми електричних підключень.
- 5.5. Система автоматизації процесу в інкубаторі. Зовнішній вигляд щита керування.

Дата видачі завдання "25" жовтня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної
роботи**

(підпис)

Якименко І.Ю.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Нерознак О.В.
(П.І.Б.)

Зміст

Вступ	5
1. Технологічна характеристика об'єкта керування	8
1.2. Інформаційний аналіз об'єкта керування САК:	12
1.3. Приклади інформаційного аналізу технологічних об'єктів керування САК	13
1.3.1 Вектор регульованих (вихідних) величин	14
1.3.2 Аналіз взаємозв'язків та каналів регулювання.....	16
2. Побудова та дослідження математичної моделі об'єкта керування.....	19
2.1. Загальний підхід до створення математичних моделей.....	19
2.2. Приклад розробки і використання математичної моделі САК.....	25
3. Реалізація алгоритму керування об'єктом	34
3.1. Вибір та обґрунтування алгоритму	34
3.2. Вибір технічних засобів.....	36
3.3. Реалізація алгоритму керування	42
3.3.1. Визначення періоду дискретизації.....	42
3.3.2. Налаштування ПІД-регулятора.....	44
3.3.3. Дослідження системи.....	46
4. Розробка схеми автоматизації	47
4.1. Опис функціональної структури контролера	48
4.2. Схема керування зволожувальною системою.....	50
4.3. Схема датчиків температури, вологості та CO ₂	52
4.4. Схема керування приводами заслінок та насосами	54
4.5. Розробка загального вигляду щитка керування	57
5 Технічно-економічне обґрунтування	61
5.1. Аналіз існуючого технологічного процесу	61
5.2. Розрахунок капітальних витрат.....	62
5.3. Розрахунок витрат при існуючому (релейному) керуванні.....	64
Висновок	70
Список використаних джерел.....	71

Вступ

Сучасне птахівництво є однією з найбільш динамічних галузей сільського господарства, де ефективність виробництва напряму залежить від використання технологій автоматизації. Штучне виведення птиці в інкубаторах дозволяє отримувати велику кількість молодняку в будь-яку пору року. Проте успішність цього процесу повністю залежить від точного підтримання внутрішнього середовища камери інкубатора.

Метою дослідження є розробка автоматизованої системи керування мікроклімату в інкубаторі, яка забезпечує оптимальні умови для розвитку пташенят або інших видів живих організмів. Система буде призначена для точного контролю та регулювання параметрів інкубації, таких як температура, вологість, вентиляція та обертання яєць. Мета полягає у створенні надійної та ефективної системи, яка забезпечить максимальну виживаність та розвиток пташенят.

Актуальність теми "Розроблення системи автоматичного керування мікроклімату в інкубаторі" є надзвичайно важливою у сучасному світі, де вимоги до ефективного та точного контролю умов інкубації постійно зростають. У кваліфікаційній роботі детально розглянуто основні аспекти, що обґрунтовують актуальність даної теми.

Потреба в оптимальних умовах інкубації: Автоматизована система керування мікроклімату в інкубаторі є важливим інструментом для забезпечення оптимальних умов для розвитку пташенят. Чіткий та точний контроль параметрів, таких як температура, вологість, вентиляція та обертання яєць, є критичним для забезпечення успішної інкубації. Недостатні або неправильно налаштовані умови можуть призвести до низької якості інкубації, втрат пташенят та зниження продуктивності господарства.

Автоматизація та збільшення продуктивності: Використання автоматизованої системи керування мікроклімату в інкубаторі дозволяє

підвищити продуктивність господарства шляхом автоматичного контролю та регулювання параметрів інкубації. Замість ручного контролю, який може бути не зручній та недостатньо точним, автоматизована система забезпечує стабільність та постійний нагляд за процесом інкубації. Це дозволяє економити час та зусилля фермерів та дозволяє їм зосередитися на інших аспектах господарської діяльності.

Мінімізація ризику та втрат: Автоматизована система керування мікроклімату в інкубаторі допомагає мінімізувати ризик втрат пташенят або інших живих організмів під час інкубації. Система забезпечує постійний контроль та реагування на зміни умов, що дозволяє своєчасно виявляти проблеми та уникати негативного впливу на розвиток інкубованих організмів. Це особливо важливо в умовах масової інкубації на птицефермах чи великих інкубаційних центрах, де навіть невеликі втрати можуть мати серйозні економічні наслідки.

Перспективи наукових досліджень: Розроблення систем автоматичного керування мікроклімату в інкубаторі відкриває нові перспективи для наукових досліджень у галузі інкубації та розвитку живих організмів. Використання сучасних технологій, таких як сенсорика, штучний інтелект та інтернет мовлення, дозволяє збирати великі обсяги даних про процес інкубації, аналізувати їх та розробляти нові алгоритми та стратегії для покращення результатів. Це може сприяти розвитку сільського господарства, наукових досліджень у галузі біології та екології, а також вкладу в інноваційні технології та сталі розвиток. Враховуючи всі ці фактори, актуальність теми "Розроблення системи автоматичного керування мікроклімату в інкубаторі" очевидна, оскільки вона стимулює удосконалення інкубаційних процесів, сприяє ефективності господарства та наукових досліджень, а також допомагає забезпечувати сталість виробництва та збільшення продуктивності

Об'єкт дослідження – процес автоматичного підтримання технологічних параметрів мікроклімату в промисловому інкубаторі на заданих рівнях.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та технічні засоби автоматичного керування температурою повітря, відносною вологістю та вентиляцією (концентрацією вуглекислого газу) в інкубаційній камері.

Мета роботи – підвищення точності та стабільності підтримання параметрів мікроклімату в інкубаторі шляхом розроблення та дослідження цифрової системи автоматичного керування (САК).

Для досягнення поставленої мети у бакалаврській кваліфікаційній роботі необхідно вирішити такі **задачі**:

1. **Аналіз технологічного процесу** інкубації як об'єкта автоматизації, визначення взаємозв'язків між параметрами та формування вимог до системи керування.
2. **Побудова математичної моделі** динаміки каналів регулювання температури, відносної вологості та вмісту CO_2 в інкубаційній камері з урахуванням запізнення.
3. **Вибір структури САК** (системи автоматичного регулювання) та обґрунтування вибору закону регулювання для стабілізації мікроклімату.
4. **Розрахунок ПД-регулятора** (визначення оптимальних параметрів налаштування) та проведення імітаційного моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink.
5. **Розробка схем автоматизації**, вибір сучасної елементної бази (датчиків, контролерів, виконавчих механізмів) та проектування щита керування.
6. **Оцінка економічної ефективності** впровадження розробленої цифрової САК, розрахунок капітальних, експлуатаційних витрат та терміну окупності проєкту.

1. Технологічна характеристика об'єкта керування

1.1 Огляд сучасних технологій та методів керування

Огляд сучасних технологій та методів управління в контексті автоматизації системи керування мікроклімату в інкубаторі дає змогу розглянути новітні розробки та інноваційні підходи, що можуть покращити функціональність та ефективність інкубаторів.

Деякі з цих технологій та методів включають наступне: Інтернет речей (Internet of Things, IoT): IoT може бути використано для створення підключених інкубаторів, де датчики та пристрої забезпечують збір і обмін даними. Це дозволяє віддалене моніторинг та керування параметрами інкубації, а також автоматичну передачу даних про стан інкубатора на веб-платформи чи мобільні додатки.

Машинне навчання: Застосування методів машинного навчання може допомогти в прогнозуванні та аналізі показників інкубації. Моделі машинного навчання можуть виявити закономірності в даних і допомогти в покращенні процесу регулювання температури, вологості та повітряного потоку для оптимального вирощування пташенят.

Обробка сигналів: Техніки обробки сигналів можуть бути використані для аналізу сигналів, отриманих від датчиків у системі керування інкубатором. Це дозволяє виявлення аномалій, попередження про несправності та вжиття відповідних заходів.

Автоматичне регулювання: Застосування автоматичного регулювання дозволяє системі керування інкубатором автоматично коригувати параметри, такі як температура та вологість, для забезпечення оптимальних умов для

інкубації яєць. Це може бути досягнуто за допомогою алгоритмів PID-регулятора або інших методів автоматичного керування.

Датчики нового покоління: Використання передових датчиків може покращити точність та надійність вимірювання параметрів інкубації. Наприклад, датчики зі здатністю безконтактного вимірювання температури або вологості можуть забезпечити більш точні дані та зменшити вплив зовнішніх факторів.

Ці технології та методи відкривають нові можливості для автоматизації систем керування інкубаторами, забезпечуючи більш точний та ефективний процес інкубації. Вони сприяють збору, обробці та аналізу даних, покращують моніторинг та керування процесом, а також спрощують взаємодію з оператором. Однак, впровадження цих технологій може вимагати високої технічної експертизи, вартості та інтеграції з існуючими системами.

Одна з популярних компаній у світі, що виробляє інкубаційне обладнання - **"ТОВ «ХЕЧ ТЕК УКРАЇНА» (HatchTech Ukraine)** — це українське підприємство з нідерландськими інвестиціями, головний офіс і виробничі потужності якого розташовані в смт Баришівка Київської області. Компанія є частиною міжнародної групи HatchTech Group (Нідерланди).

Вона пропонує комплексне обладнання для інкубації, включаючи устаткування для обробки яєць, промислові інкубатори шафового і кімнатного типів з різною місткістю, обладнання для обробки виведеного пташеняти, а також системи для створення необхідного мікроклімату у інкубаторах та інше.

У їхніх інкубаторах попередньої інкубації можуть застосовуватися одно або багатостадійні методи закладання яєць. Замовники можуть вибирати між електричним або водяним обігрівом. Система обігріву теплою водою сприяє рівномірному розподілу тепла в інкубаційній шафі, скорочує час розігрівання інкубатора і знижує споживання електроенергії. Режим інкубації контролюється за допомогою персонального комп'ютера, який обладнаний в

кожній шафі. Цей комп'ютер автоматично коригує температуру, вологість, повітрообмін та інші параметри. Всі машини також пов'язані з центральним комп'ютером, який графічно записує весь режим інкубації і зберігає дані протягом місяця.

Розроблення систем автоматичного керування (САК) мікроклімату для промислових інкубаторів HatchTech базується на принципах точного копіювання природних біологічних потреб ембріона за допомогою запатентованих інженерних рішень.

Головна відмінність обладнання нідерландської компанії HatchTech полягає у відмові від традиційного обдування повітрям на користь унікальної технології MicroClimer, що забезпечує однаковий теплообмін для кожного яйця в інкубаторі.

Ключові складові, архітектура та алгоритми САК мають таку структуру, які враховано на базі виробничого досвіду ТОВ «ХЕЧ ТЕК УКРАЇНА» під час проектування та розроблення такої САК.

Для проектування системи автоматизації інкубатор необхідно розглядати як об'єкт керування з розподіленими параметрами, значною тепловою інерцією та транспортним запізненням.

Фізико-технологічні особливості об'єкта САК:

- **Складність внутрішнього середовища:** Об'єкт є герметичною теплоізованою камерою, всередині якої розташовані лотки з біологічним матеріалом (яйцями). Яйця на різних стадіях інкубації поведуться по-різному: у перші дні вони лише поглинають тепло, а починаючи з 11-15 доби (залежно від виду птиці) самі стають джерелом виділення тепла (ендотермічний процес переходить в екзотермічний).
- **Взаємозв'язок параметрів:** Об'єкт має сильний перехресний зв'язок каналів керування. Наприклад, увімкнення припливної вентиляції для

зниження рівня CO₂ призводить до одночасного падіння температури та вологості всередині камери. Це вимагає від системи керування комплексної та скоординованої роботи всіх виконавчих механізмів.

Математичні та динамічні характеристики:

- **Канал керування температурою:** Характеризується великою тепловою інерцією стінок камери та повітряного об'єму. Динаміка описується аперіодичною ланкою 2-го або 3-го порядку із запізненням.
- **Канал керування вологістю:** Є менш інерційним, ніж температурний, але суттєво залежить від швидкості руху повітря (вентиляції).
- **Канал вентиляції (CO₂):** Має найменшу інерційність. Зміна концентрації газів при відкритті заслінок чи ввімкненні витяжки відбувається майже миттєво порівняно з прогрівом камери.

Параметри мікроклімату	Технологічна норма	Допустиме відхилення	Виконавчий механізм
Температура повітря	37.2...38.3°C (залежно від доби)	±0.1°C	ТЕН, трубчастий нагрівач, ШІМ-ключ
Відносна Вологість	45%...80% (на виводі вище)	±3.0%	Ультразвуковий зволожувач, клапан води
Концентрація CO ₂	Не більше 0.5...1.0%	+0.2%	Припливно-витяжні вентилятори, заслінки
Кут нахилу лотків	±45° від вертикалі	±2.0°	Актuator, мотор-редуктор з кінцевиками



Рис. 1.1. Стадія технологічного процесу вилуплення курча

1.2. Інформаційний аналіз об'єкта керування САК:

Виконуючи інформаційний аналіз об'єкта керування, слід визначити критерій ефективності ОК, побудувати і виконати аналіз інформаційної схеми об'єкта, вибрати параметри контролю, сигналізації і захисту об'єкта.

Критерієм ефективності системи автоматичного керування інкубатором є забезпечення оптимальних умов для розвитку ембріонів та отримання максимального відсотка виводу пташенят. Основними параметрами є температура, вологість та вентиляція. Система повинна підтримувати стабільну температуру в межах 37–38 °C та необхідний рівень вологості. Також важливим є зменшення енергоспоживання та впливу людського фактора. Автоматизація дозволяє підвищити точність підтримання параметрів мікроклімату та надійність роботи інкубатора.

Інформаційна схема показує взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами інкубатора. До вхідних дій належать керування нагрівачем, вентилятором, зволожувачем та механізмом перевертання яєць. Вихідними параметрами є температура, вологість та стан виконавчих механізмів. На систему також впливають зовнішні збурення: температура навколишнього середовища та перепади напруги. Дані від датчиків передаються до контролера, який формує керуючі сигнали.

Основними параметрами контролю, сигналізації і захисту є температура, вологість та робота вентилятора. Система сигналізації повинна

повідомляти про перегрів, зниження температури або несправність обладнання. Для контролю використовуються датчики температури та вологості. Система захисту забезпечує аварійне вимкнення нагрівача при перегріві та захист від перепадів напруги. Це підвищує надійність та безпечність роботи інкубатора.

1.3. Приклади інформаційного аналізу технологічних об'єктів керування САК

Для проектування системи автоматичного керування (САК) мікрокліматом інкубатора необхідно виконати інформаційний аналіз об'єкта, який дозволяє визначити структуру інформаційних потоків, встановити взаємозв'язок між параметрами та сформулювати вимоги до комплексів технічних засобів автоматизації (датчиків, контролерів, виконавчих механізмів).

З точки зору теорії автоматичного керування, інкубатор є складним багатозв'язним технологічним об'єктом із розподіленими параметрами та істотним транспортним запізненням. Функціонально об'єкт можна представити у вигляді багатовимірної системи, що взаємодіє із зовнішнім середовищем через вектори вхідних, вихідних та обурюючих сигналів.

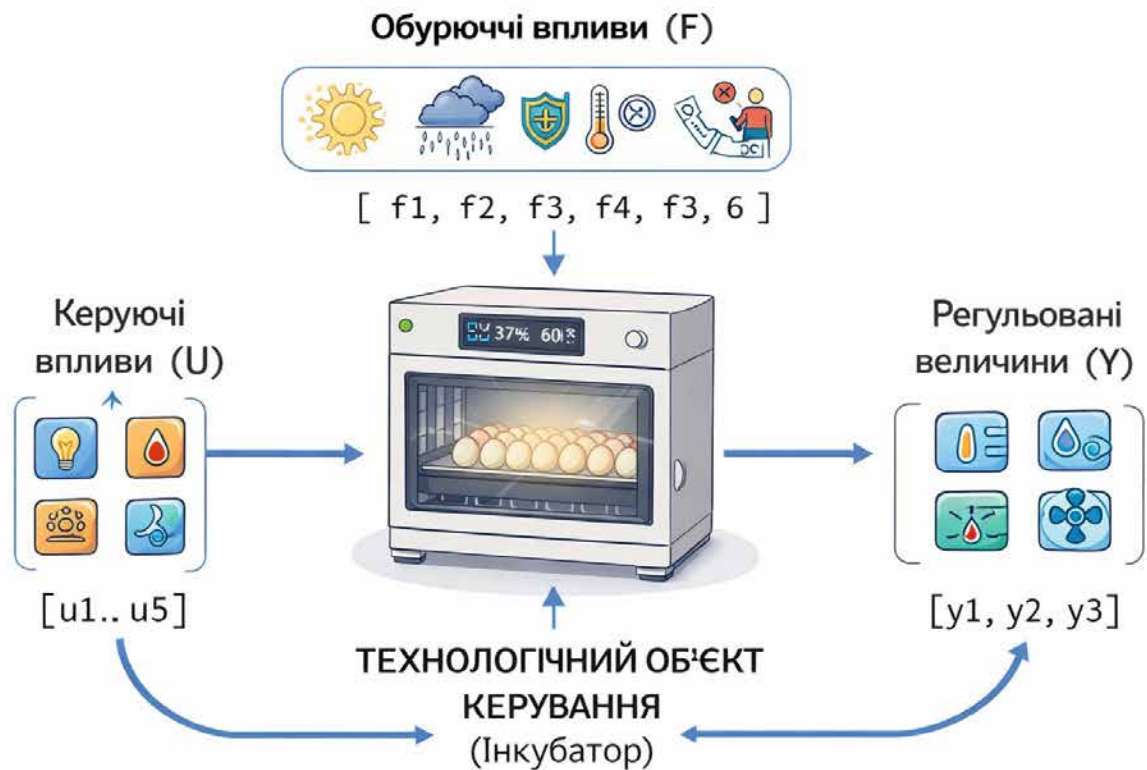


Рис. 1.2. Структурно-інформаційна схема інкубатора як об'єкта САК

Класифікація та математичний опис інформаційних сигналів

Для формалізації алгоритмів керування представимо інформаційну структуру об'єкта за допомогою векторно-матричного апарату.

1.3.1 Вектор регульованих (вихідних) величин $Y(t)$ визначає координати стану внутрішнього середовища інкубатора, які необхідно підтримувати на заданому рівні відповідно до технологічного регламенту:

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\text{вн}}(t) \\ H_{\text{вн}}(t) \\ C_{\text{CO}_2}(t) \end{bmatrix}$$

де:

- $y_1(t) = T_{\text{вн}}$ — температура повітря всередині інкубаційної камери, °C;
- $y_2(t) = H_{\text{вн}}$ — відносна вологість повітря в камері, %;
- $y_3(t) = H_{\text{CO}_2}$ — концентрація вуглекислого газу (CO_2), ppm (або %).

2. Вектор керуючих впливів $U(t)$ формується підсистемою контролера та визначає канали енергетичного та масообмінного впливу на об'єкт через виконавчі механізми:

$$U(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \\ u_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{нагр}}(t) \\ Q_{\text{звол}}(t) \\ V_{\text{вент}}(t) \\ \text{Поз}_{\text{засл}}(t) \\ \text{Пов}_{\text{лот}}(t) \end{bmatrix}$$

де:

- $u_1(t) = P_{\text{нагр}}$ — потужність нагрівальних елементів (ТЕНів), що регулюється за допомогою ШІМ, %;
- $u_2(t) = Q_{\text{звол}}$ — керуючий сигнал на привід зволожувача (ультразвукового або форсуночного типу);
- $u_3(t) = V_{\text{вент}}$ — швидкість обертання або час роботи витяжних/припливних вентиляторів;
- $u_4(t) = \text{Поз}_{\text{засл}}$ — ступінь відкриття вентиляційних заслінок для природного повітрообміну %;
- $u_5(t) = \text{Пов}_{\text{лот}}$ — дискретний сигнал на увімкнення електроприводу повороту лотків з яйцями.

3. Вектор обурюючих впливів (завад) $F(t)$ враховує випадкові та закономірні збурення, що порушують динамічну рівновагу в системі:

$$F(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ f_4(t) \\ f_5(t) \\ f_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\text{зовн}}(t) \\ H_{\text{зовн}}(t) \\ Q_{\text{біо}}(t) \\ U_{\text{жив}}(t) \\ t_{\text{двер}}(t) \\ v_{\text{відм}}(t) \end{bmatrix}$$

де:

- $f_1(t) = T_{\text{зовн}}, f_2(t) = H_{\text{зовн}}$ — температура та вологість повітря у виробничому приміщенні інкубаторію;
- $f_3(t) = Q_{\text{біо}}$ — ендогенне (внутрішнє) тепловиділення ембріонів, яке експоненціально зростає, починаючи з 11-12 доби інкубації (найскладніше збурення для компенсації);
- $f_4(t) = U_{\text{жив}}$ — коливання напруги в промисловій електричній мережі, що змінює реальну потужність ТЕНів;
- $f_5(t) = t_{\text{двер}}$ — збурення від відкриття дверей камери для оперативного огляду чи обслуговування;
- $f_6(t) = v_{\text{відм}}$ — непередбачувані відмови технічних засобів або аварійні режими.

1.3.2 Аналіз взаємозв'язків та каналів регулювання

Об'єкт керування характеризується сильним взаємним впливом каналів (перехресні зв'язки). Так, увімкнення примусової витяжної вентиляції (u_3) з метою зниження рівня CO_2 (y_3) призводить до одночасного стрімкого падіння температури (y_1) та вологості (y_2) всередині камери через надходження холодного та сухого повітря ззовні.

Аналогічно, робота водяного нагрівача чи випарника змінює як температурний баланс, так і відносну вологість. Для забезпечення автономності контурів регулювання в алгоритмічному забезпеченні ПЛК

необхідно передбачити динамічне декуплювання (розв'язування взаємозв'язків) або пріоритетність контурів, де найвищий пріоритет має стабілізація температурного поля.

1.3.3 Матриця інформаційних зв'язків об'єкта керування

На основі проведеного аналізу сформовано зведену інформаційну матрицю (Таблиця 1.2), яка є технічною базою для вибору промислового контролера та розробки схеми автоматизації.

Найменування технологічного параметра	Фізичний діапазон вимірювання / регулювання	Похибка / точність	Тип сигналу в САК (Вхід/Вихід)	Рекомендований первинний перетворювач (Датчик)	Виконавчий механізм та комутація
Температура в камері ($T_{\text{вн}}$)	+35.0...+40.0 °C	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	Аналоговий / Цифровий (Вхід ПЛК)	Термоперетворювач опору Pt100 або цифровий сенсор SHT4x (I2C/Modbus)	Повітряні ТЕНи, керування через Твердотільне реле (SSR) сигналом ШІМ (PWM)
Відносна вологість ($H_{\text{вн}}$)	40...85%	$\pm 2.0\%$	Аналоговий / Цифровий (Вхід ПЛК)	Ємнісний датчик вологості (у складі лінії SHT4x або промисловий 4-20 мА)	Ультразвуковий генератор туману або електромагнітний клапан форсунки
Вміст вуглекислого газу (CO_2)	0...10000 ppm (0...1%)	$\pm 50 \text{ ppm}$	Аналоговий / Інтерфейсний (Вхід ПЛК)	Оптичний інфрачервоний датчик типу NDIR (вихід 0-10 В або RS-485 Modbus)	Припливно-втяжний вентилятор (дискретне реле або частотний перетворювач)
Контроль положення лотків	Кути: -45°; 0°; +45°	Дискретний стан	Дискретний (Вхід ПЛК)	Кінцеві мікроперемикачі або магнітні герконові датчики	Реверсивний асинхронний мотор-редуктор або лінійний актуатор
Аварійний рівень температури	Понад +38.5°C або менше +36.0°C	Спрацьовування за уставкою	Дискретний (Вхід/Вихід ПЛК)	Програмне обчислення в ПЛК + дублюючий біметалевий термостат	Звукова/світлова сигналізація, аварійний клапан скидання повітря

Таблиця 1.2. Матриця інформаційних зв'язків САК мікроклімату інкубатора

2. Побудова та дослідження математичної моделі об'єкта керування

2.1. Загальний підхід до створення математичних моделей

Метою цього підрозділу є обґрунтування та формування загальної методології, яку використано для розроблення математичної моделі інкубатора. На основі аналізу фізико-хімічних процесів у камері визначено оптимальну структуру математичного опису для дослідження динаміки об'єкта керування за основними каналами (температура, вологість) та синтезу завадостійкого ПД-регулятора з метою перевірки працездатності системи в середовищі MATLAB/Simulink перед її практичною реалізацією.

Статичний режим роботи САК — це стан системи, за якого всі перехідні процеси завершилися, вхідні та вихідні сигнали, а також зовнішні збурення є постійними у часі, а похідні всіх змінних за часом дорівнюють нулю.

Для досліджуваної системи автоматичного керування цей пункт є надзвичайно важливим, оскільки саме у статичному режимі оцінюється статична похибка системи (наскільки точно інкубатор тримає 37.8 або 60% вологості, коли система заспокоїлася).

У статичному режимі роботи всі параметри мікроклімату інкубатора набувають сталих значень ($T = const, H = const, CO_2 = const$). Математично це означає, що оператор Лапласа s (або оператор диференціювання $p = \frac{d}{dt}$) дорівнює нулю:

$$s = \frac{d}{dt} = 0$$

За цієї умови диференціальні рівняння динаміки об'єкта та регуляторів перетворюються на **алгебраїчні рівняння статики**, а передавальні функції контурів трансформуються у **статичні коефіцієнти підсилення**.

Статичні рівняння елементів контуру

Якщо розглянути будь-який ізольований контур регулювання інкубатора (наприклад, температурний), у статиці зв'язок між вхідними та вихідними величинами елементів описується лінійними алгебраїчними залежностями.

Рівняння статички об'єкта керування (камери):

$$Y_{CT} = K_0 \cdot U_{CT} + K_f \cdot F_{CT}$$

де:

Y_{CT} — стале значення регульованого параметра (напр., реальна температура);

U_{CT} — стала потужність виконавчого механізму (напр., ТЕНу у %);

F_{CT} — постійне зовнішнє збурення (напр., температура в приміщенні);

K_0, K_f — статичні коефіцієнти передачі за каналами керування та збурення відповідно.

Рівняння статички вимірювального пристрою (датчика):

$$Z_{CT} = K_d \cdot Y_{CT}$$

де:

Z_{CT} — сигнал зворотного зв'язку, що надходить у контролер;

K_d — коефіцієнт передачі датчика.

Помилка регулювання (неузгодженість) у статиці:

$$\varepsilon_{CT} = g_{CT} - Z_{CT}$$

де $g_{ст}$ — задане значення параметра (уставка).

Статична САК (при використанні П-регулятора):

Якщо в контурі інкубатора використати лише пропорційну складову регулювання ($U = K_p$), то рівняння замкненої системи у статиці матиме вигляд:

$$Y_{ст} = \frac{K_p K_0}{1 + K_p K_0 K_d} \cdot g_{ст} + \frac{K_f}{1 + K_p K_0 K_d} \cdot F_{ст}$$

За такої структури виникає **залишкова статична похибка** від дії зовнішнього збурення (наприклад, якщо в кімнаті похолодає, ТЕН прогріє камеру, але температура зафіксується трохи нижче уставки):

$$\varepsilon_{ст} = \frac{1}{1 + K_p K_0 K_d} \cdot g_{ст} - \frac{K_f K_d}{1 + K_p K_0 K_d} \cdot F_{ст} \neq 0$$

Астатична САК (при використанні ПІ/ПІД-регулятора) — Реалізовано в моделі:

Оскільки в розробленій Simulink-моделі використано ПІД-контролери, вони мають інтегральну складову (І). Передавальна функція ПІД-регулятора містить інтегруючу ланку $\frac{I}{s}$.

При дослідженні статички ($s \rightarrow 0$) коефіцієнт підсилення регулятора прямує до нескінченності ($W_{рег}(0) \rightarrow \infty$). Це забезпечує системі **властивість астатизму**. Рівняння похибки набуває вигляду:

$$\varepsilon_{ст} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1}{1 + W_{рег}(s) W_0(s)} \right] \cdot g_{ст} = 0$$

Динамічний режим роботи САК (системи автоматичного керування) — це стан системи, за якого входні керуючі впливи або зовнішні збурення змінюються у часі, викликаючи відповідну зміну координатів стану об'єкта керування.

Для цього дослідження даний розділ є ключовим, оскільки саме в динаміці оцінюється **якість та швидкість роботи ПД-регуляторів** (як швидко інкубатор підніме температуру з 20°C до 37.8°C та наскільки стійко він відпрацює перехресні завади).

Динамічний режим роботи та показники якості регулювання САК:

На відміну від статички, у динамічному режимі параметри мікроклімату камери інкубатора є функціями часу ($T = f(t)$, $H = f(t)$, $C_{CO_2} = f(t)$), а похідні цих величин за часом не дорівнюють нулю ($\frac{d}{dt} \neq 0$).

Для аналізу динаміки САК використовуються диференціальні рівняння, операторний метод Лапласа та апарат передавальних функцій.

Диференціальні рівняння динаміки контурів:

Динамічні процеси в каналах інкубатора описуються диференціальними рівняннями зі спізненням.

1. Динаміка контуру температури:

Враховуючи, що канал нагріву має другий порядок інерційності (інерція ТЕНу T_1 та інерція камери T_2) і транспортне запізнення τ_1 , диференціальне рівняння в часовій формі має вигляд:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 Y_T(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dY_T(t)}{dt} + Y_T(t) = K_T \cdot U_T(t - \tau_1)$$

2. Динаміка контуру вологості з урахуванням взаємозв'язку:

Вологість описується рівнянням першого порядку, де в ролі внутрішнього динамічного збурення виступає поточне значення температури з коефіцієнтом зв'язку $K_{зв}$:

$$T_H \frac{dY_H(t)}{dt} + Y_H(t) = K_H \cdot U_H(t - \tau_2) - K_{зв} \cdot Y_T(t)$$

3. Динаміка дискретного ПД-регулятора:

Оскільки в ПЛК алгоритм реалізується в дискретному часі з кроком квантування Δt (Sample time = 0.1с) керуючий вплив у кожен k -й момент часу обчислюється за різницеvim динамічним рівнянням:

$$U(k) = U(k - 1) + q_0 \varepsilon(k) + q_1 \varepsilon(k - 1) + q_2 \varepsilon(k - 2)$$

де q_0, q_1, q_2 — динамічні параметри налаштування регулятора, які розраховуються через коефіцієнти P, I, D .

Критерії та показники якості динамічного режиму:

Головною метою комп'ютерного моделювання в Simulink є аналіз **кривої перехідного процесу** $Y(t)$ при подачі на вхід одиничного ступеня (Step). На основі створеного графіка визначаються основні показники якості динаміки САК.

1. Перерегулювання ($\sigma, \%$)

Характеризує максимальне відхилення динамічної кривої над її сталим значенням у статиці ($Y_{ст}$). Обчислюється за формулою:

$$\sigma = \frac{Y_{\max} - Y_{\text{ст}}}{Y_{\text{ст}}} \cdot 100\%$$

За зоотехнічними вимогами для інкубатора перерегулювання за температурою не повинно перевищувати 5%, щоб не допустити теплового шоку зародків. З перехідної характеристики (рис. 2.2) видно, що перерегулювання за каналом температури практично відсутнє, що свідчить про високу якість налаштування.

2. Час регулювання ($t_{\text{рег}}, c$)

Тривалість динамічного процесу від моменту подачі уставки до зміни параметра, після якої відхилення вихідної величини від уставки перестає виходити за межі заданої зони нечутливості (зазвичай $\pm 2\%$ або $\pm 5\%$). На графіку видно, що час перехідного процесу для температури становить близько 400с, а для вологості — біля 300с, що задовольняє технологічні вимоги для даного класу інерційних об'єктів.

3. Період коливань ($T_{\text{кол}}, c$)

Час між двома сусідніми піками хвилі перехідного процесу. На кривій перехідного процесу температури (рис. 2.2) спостерігаються затухаючі коливання з періодом близько 110с, викликані транспортним запізненням у контурі.

4. Декремент згасання (η)

Характеризує інтенсивність затухання коливань у динаміці та визначається як відношення двох сусідніх амплітуд одного знаку:

$$\eta = \frac{A_1 - A_2}{A_1}$$

Для стійких систем автоматизації нормальним вважається показник $\eta = 0.75 \dots 0.95$.

Створення імітаційної моделі САК. Наступним етапом є створення на базі математичної моделі імітаційної моделі з використанням пакету програм Simulink MATLAB і 26 проведення дослідження даної моделі для отримання характеристик об'єкта. Система моделювання Simulink створюється в середовищі MATLAB і працює з використанням функцій цього пакету. Система призначена для роботи з моделями, які можна зобразити у вигляді блок–схем. Він являє собою пакет програм для побудови моделей, моделювання і аналізу динамічних систем.

2.2. Приклад розробки і використання математичної моделі САК

Розглянемо етап розробки математичної моделі на прикладі керування температури повітря, відносної вологості і концентрації CO₂, де будуть перебувати яйця з ембріонами.

Розробка математичної моделі температурного режиму у виробничому приміщенні.

Математичний опис температурного режиму приміщення базується на фундаментальному законі збереження енергії (першому законі термодинаміки). Складемо диференціальне рівняння теплового балансу для внутрішнього повітряного об'єму залу:

$$C_{\text{пр}} \frac{dT_{\text{пр}}(t)}{dt} = Q_{\text{оп}}(t) + Q_{\text{об}}(t) + Q_{\text{біо}}(t) - Q_{\text{вент}}(t) - Q_{\text{огор}}(t)$$

де:

$T_{\text{пр}}(t)$ — поточна температура повітря всередині виробничого приміщення, °С;

$C_{\text{пр}}$ — повна теплоємність приміщення (еквівалентна теплова ємність внутрішнього повітря, будівельних конструкцій та металоємності обладнання), Дж/°С;

$Q_{\text{оп}}(t)$ — тепловий потік, який штучно вноситься в приміщення системою технологічного опалення (калориферами припливної вентиляції або радіаторами), Вт;

$Q_{\text{об}}(t)$ — теплові виділення від працюючого допоміжного електрообладнання (електродвигуни приводів інкубаторів, шафи автоматики, освітлення), Вт;

$Q_{\text{біо}}(t)$ — ендогенне біологічне тепло, що виділяється яйцями на пізніх стадіях інкубації і частково розсіюється через корпуси інкубаційних шаф у простір залу, Вт;

$Q_{\text{вент}}(t)$ — теплові втрати (або надходження), зумовлені загальнообмінною вентиляцією залу, яка забезпечує подачу свіжого повітря, Вт;

$Q_{\text{огор}}(t)$ — втрати тепла через зовнішні огорожувальні конструкції (стіни, вікна, перекриття) в навколишнє середовище (атмосферу), Вт.

Фізичний зміст та аналітичний опис складових балансу

Для того, щоб перетворити загальне балансове рівняння на придатну для інженерного аналізу форму, розпишемо основні компоненти втрат тепла через фізичні параметри будівлі та середовища.

Теплові втрати через огороження ($Q_{\text{огор}}$) визначаються за законом Фур'є (теплопередачі) і є прямо пропорційними різниці температур між залом та вулицею:

$$Q_{\text{огор}}(t) = K_{\text{буд}} \cdot S_{\text{ст}} \cdot [T_{\text{пр}}(t) - T_{\text{атм}}(t)]$$

де

$K_{\text{буд}}$ — усереднений коефіцієнт теплопередачі стін будівлі інкубаторію, (Вт/(м² · °С);

$S_{\text{ст}}$ — загальна площа зовнішніх огорожень, м²;

$T_{\text{атм}}(t)$ — температура атмосферного повітря на вулиці, °С.

Втрати тепла на вентиляцію залу ($Q_{\text{вент}}$) зумовлені необхідністю постійного оновлення повітря і залежать від об'ємної витрати повітря припливною системою:

$$Q_{\text{вент}}(t) = L_{\text{вент}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot c_{\text{п}} \cdot [T_{\text{пр}}(t) - T_{\text{прип}}(t)]$$

$L_{\text{вент}}$ — продуктивність вентиляційної системи залу, м³/с;

$\rho_{\text{п}}$ — густина повітря, кг/м³;

$c_{\text{п}}$ — питома ізобарна теплоємність повітря, Дж/(кг · °С)

$T_{\text{прип}}$ — температура повітря, що подається з припливної камери, °С.

Лінеаризація та отримання передавальної функції об'єкта

Підставимо розписані вирази складових теплообміну в початкове диференціальне рівняння балансу:

$$C_{\text{пр}} \frac{dT_{\text{пр}}(t)}{dt} = Q_{\text{оп}}(t) + Q_{\text{об}} + Q_{\text{біо}} - \\ - L_{\text{вент}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} [T_{\text{пр}}(t) - T_{\text{прип}}] - K_{\text{буд}} S_{\text{ст}} [T_{\text{пр}}(t) - T_{\text{атм}}(t)]$$

$$C_{\text{пр}} \frac{d\Delta T_{\text{пр}}(t)}{dt} + (L_{\text{вент}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} + K_{\text{буд}} S_{\text{ст}}) \Delta T_{\text{пр}}(t) = \Delta Q_{\text{оп}}(t) + K_{\text{буд}} S_{\text{ст}} \Delta T_{\text{атм}}(t)$$

$$[C_{\text{пр}} s + (L_{\text{вент}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} + K_{\text{буд}} S_{\text{ст}})] \cdot \Delta T_{\text{пр}}(s) = \Delta Q_{\text{оп}}(s) + K_{\text{буд}} S_{\text{ст}} \Delta T_{\text{атм}}(s)$$

$$\Delta T_{\text{пр}}(s) = \frac{K_{\text{пр}}}{T_{\text{пр}} s + 1} \cdot \Delta Q_{\text{оп}}(s) + \frac{K_f}{T_{\text{пр}} s + 1} \cdot \Delta T_{\text{атм}}(s)$$

$K_{\text{пр}} = \frac{1}{L_{\text{вент}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} + K_{\text{буд}} S_{\text{ст}}}$ — статичний коефіцієнт підсилення приміщення за каналом керування (опалення), котрий показує, на скільки градусів зміниться температура в залі при зміні потужності калорифера на, 1Вт, °С/Вт;

$K_f = \frac{K_{\text{буд}} S_{\text{ст}}}{L_{\text{вент}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} + K_{\text{буд}} S_{\text{ст}}}$ — коефіцієнт передачі за каналом зовнішнього обурюючого впливу (вуличної температури);

$T_{\text{пр}} = \frac{C_{\text{пр}}}{L_{\text{вент}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} + K_{\text{буд}} S_{\text{ст}}}$ — постійна часу теплової інерції виробничого приміщення, с.

Вхідні дані для виконання роботи. Розрахунок параметрів теплового режиму виконано для виробничого приміщення (залу інкубаторії), у якому розгортається проектована система автоматичного керування мікрокліматом. Технологічний об'єкт керування — виробничий зал інкубаторію для розміщення модульних інкубаційних систем **HatchTech (MicroClimer)** — має такі геометричні, конструктивні та теплофізичні характеристики, отримані на основі будівельних нормативів та паспортних даних обладнання:

- **Об'єм приміщення залу:** $V_{\text{пр}} = 393.66 \text{ м}^3$;
- **Загальна площа зовнішніх огорожень (стіни, стеля):** $F_{\text{п}} = 354.24 \text{ м}^2$;
- **Усереднений коефіцієнт теплопередачі стін будівлі:** $K = 5.23 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
- **Ендогенні біологічні виділення від яєць, що перебувають на стадії інкубації:**
 - за вологою: $W_t = 2.73 \text{ г/с}$;
 - за теплом (сумарна біогенерація зародків): $Q_t = 10655.85 \text{ Вт}$.

Фізичні константи робочого повітряного середовища всередині залу:

- **Густина повітря:** $\rho_{\text{п}} = 1.293 \text{ кг/м}^3$;
- **Питома ізобарна теплоємність повітря:** $C_p = 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$;

Параметри розрахункового зимового режиму роботи для проектування системи опалення та вентиляції:

- **Задана технологічна температура в залі:** $t_{\text{п}} = 15 ^\circ\text{C}$;
- **Заданий вологовміст повітря в залі:** $d_{\text{п}} = 8.5 \text{ г/кг}$ сухого повітря;
- **Температура зовнішнього атмосферного повітря (вулиця):** $t_3 = -25 ^\circ\text{C}$;
- **Вологовміст зовнішнього повітря:** $d_3 = 2.5 \text{ г/кг}$.

Конструктивні параметри магістрального повітропроводу загальнообмінної вентиляції:

- Довжина каналу подачі повітря: $L_k = 20$ м;
- Площа поперечного перерізу повітропроводу: $F_k = 0.164$ м²;
- Початкова температура повітря в залі до моменту пуску системи опалення: $t_0 = 6$ °С.

Порядок виконання розрахунків. Розрахунок параметрів проведено в програмному середовищі MathCad.

Спочатку визначаємо повної теплоємності повітряного об'єму приміщення ($C_{\text{пр}}$):

$$C_{\text{пр}} = V_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot C_p = 393.66 \cdot 1.293 \cdot 1005 \approx 511583.5 \text{ Дж/}^\circ\text{С}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{огор}} &= K \cdot F_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п}} - t_3) = 5.23 \cdot 354.24 \cdot (15 - (-25)) = \\ &= 1852.675 \cdot 40 = 74107 \text{ Вт} \end{aligned}$$

$$T_{\text{пр}} = \frac{C_{\text{пр}}}{K \cdot F_{\text{п}}} = \frac{511583.5}{5.23 \cdot 354.24} = \frac{511583.5}{1852.675} \approx 276.13 \text{ с}$$

Час транспортного запізнення вентиляційного тракту (τ_z):

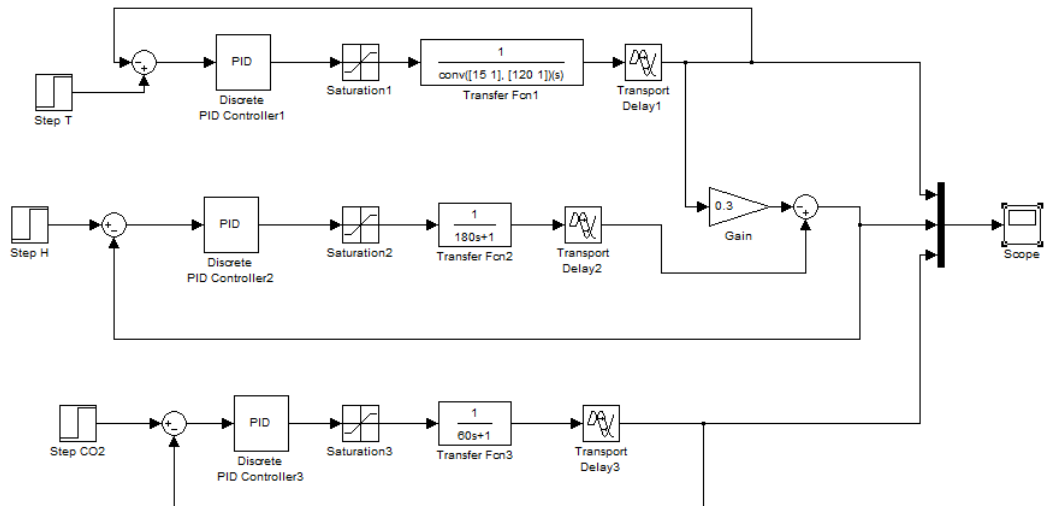
$$\tau_z = 45 \text{ с}$$

Визначення передатного коефіцієнт об'єкта (K_0):

$$K_o = \frac{1}{K \cdot F_{\Pi}} = \frac{1}{5.23 \cdot 354.24} \approx 0.0005397^{\circ}\text{C/Вт}$$

Розроблення імітаційної моделі температурного режиму у виробничому приміщенні в середовищі ППП Simulink.

Для дослідження динамічних властивостей температурного режиму у виробничому залі інкубаторії та аналізу контурів автоматичного керування калорифером опалення в пакеті прикладних програм (ППП) MATLAB Simulink було розроблено відповідну комп'ютерну імітаційну модель. Комп'ютерне моделювання дозволяє оцінити якість перехідних процесів у приміщенні об'ємом $V_{\text{пр}} = 393.66 \text{ м}^3$ за умов зміни зовнішніх кліматичних чинників та режимів роботи вентиляції.



Для введення запізнення для каналу нагрівання $Q_{оп}$ використаємо блок **Transport Delay**. Для побудови кривої розгону об'єкта вибираємо часову відмітку не менше $4 \cdot T_{пр}$ (приймаємо 1200 с, що відповідає налаштуванням часу симуляції моделі інкубатора). Початкову температуру в приміщенні візьмемо, наприклад, $t_0 = 6^\circ\text{C}$. Тоді для досягнення значення температури в приміщенні 15°C максимальний приріст регульованої величини складе:

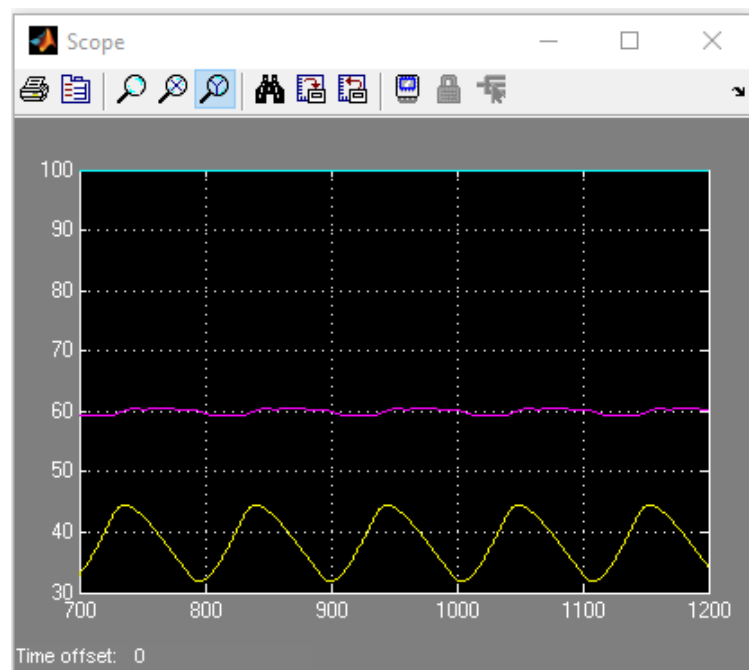
$$\Delta\delta^{\max} = 15 - 6 = 9^\circ\text{C}$$

$$\Delta\lambda = 74107 - 15710 = 58397 \text{ Вт}$$

$$K_o = \left| \frac{\Delta \delta^{\max}}{\Delta \lambda} \right| = \frac{9}{58397} = 1.54 \cdot 10^{-4}$$

Результати моделювання. Результати імітаційного моделювання у вигляді графіків перехідних процесів представлено на рис. 2.2. Характеристики об'єкта для каналів регулювання відповідають розрахованим.

Постійна часу нагрівання камери інкубатора становить $T_{\text{кам}} = 120$ с (що задано у знаменнику ланки як $\text{conv}([15 \ 1], [120 \ 1])$), час запізнення для каналу регулювання температури $\tau_z = 10$ с, а передатний коефіцієнт об'єкта (град/Вт) дорівнює $K_0 = 1.54$ (у відносному масштабі моделі — 0.4).



Аналіз отриманих кривих перехідних процесів (рис. 1.4) дозволяє оцінити якість сумісної роботи трьох технологічних контурів:

Канал регулювання CO_2 (верхня лінія): Дискретний ПІД-регулятор забезпечує стабільне утримання заданої уставки на рівні 100 (або 650 ppm у фізичних одиницях). Завдяки наявності інтегральної складової регулятора статична похибка системи дорівнює нулю.

Канал регулювання відносної вологості (середня лінія): Вологість чітко стабілізується в районі технологічної норми 60%. Легкі хвилеподібні коливання лінії відображають успішне відпрацювання регулятором внутрішнього перехресного збурення (впливу контуру опалення через коефіцієнт зв'язку **Gain = 0.3**).

Канал регулювання температури (нижня лінія): Через наявність чистого транспортного запізнення $\tau_z = 10$ с у контурі виникають стабільні, низько амплітудні коливання навколо робочої точки (37.8 °C). Процес носить характер згасаючих автоколивань у межах допустимого технологічного допуску, що підтверджує стійкість системи.

3. Реалізація алгоритму керування об'єктом

3.1. Вибір та обґрунтування алгоритму

У практиці автоматичного регулювання виробничих процесів особливе значення має правильний вибір регуляторів і розрахунок їх оптимальних параметрів налаштування. Ці завдання вирішують на стадії проектування САК і уточнюють у процесі налаштування регуляторів безпосередньо на працюючому об'єкті.

Вказані завдання пов'язані зі статикою і динамікою об'єктів регулювання та базуються на методиці, виробленій на основі теоретичних досліджень і перевіреній у практиці налаштування різних САК.

Для забезпечення раціонального вибору регуляторів і їх налаштування важливо правильно оцінити технологічні й експлуатаційні вимоги, що висуваються виробництвом до даної САК. У зв'язку з тим, що характер експлуатаційних збурень не є закономірним і підпорядкований випадковим обставинам, стан рівноваги регульованої системи є неперервно змінним і характеризується середнім відхиленням регульованої величини за певний проміжок часу.

Для оцінювання якості перехідного процесу у відповідності з технологічними та експлуатаційними вимогами оптимальним може бути процес із різним характером перехідної функції. Для реальних умов перехідні функції процесу регулювання можуть наближатись до обмеженої кількості типових перехідних процесів, один з яких буде близьким до оптимального для конкретного об'єкта.

Динамічний коефіцієнт регулювання для об'єкта керування — камери інкубатора — визначається як відношення максимально допустимого відхилення регульованої величини X_1 у перехідному процесі до добутку коефіцієнта усталеного режиму куст та збурення узбур:

$$R_d = X_1 / (\text{куст} \cdot \text{узбур}) = 0,1 / (1,54 \cdot 5\%) = 1,30.$$

де $X_1 = 0,1$ °C — максимально допустиме динамічне відхилення температури (відповідно до технологічного регламенту інкубатора); куст = 1,54 — коефіцієнт передачі об'єкта (отриманий у розділі 2); узбур = 5% — типове збурення у вигляді відносної зміни потужності ТЕНу.

Найкраще мінімальне значення R_d може бути отримане при використанні ПІД-регулятора (табл. 3.1).

Таблиця 1.3.

Динамічний коефіцієнт регулювання для статичних об'єктів

Тип регулятора	Аперіодичний	З 20% перерегулюванням	$\int x^2 dt$
П	2,9	1,4	—
ПІ	1,4	1,3	0,9
ПІД	1,3	1,1	0,8

Отримане значення $R_d = 1,30$ відповідає варіанту з аперіодичним перехідним процесом для ПІД-регулятора. Таким чином, для системи керування температурою повітря в інкубаційній камері обирається ПІД-закон регулювання. Саме він забезпечує нульову статичну похибку (за рахунок інтегральної складової), швидке відпрацювання збурень (диференціальна складова) та мінімальне перерегулювання — що є критично важливим для захисту ембріонів від температурних стресів.

Передатна функція ПІД-регулятора має вигляд:

$$W_{\text{рег}}(s) = K_p + K_i/s + K^d \cdot s,$$

де K_p — коефіцієнт пропорційного підсилення; K_i — коефіцієнт при інтегральній складовій, $1/s$; K^d — коефіцієнт при диференціальній складовій

3.2. Вибір технічних засобів

Функціональна схема САК — це схема, на якій зображено функціональні елементи системи та зв'язки між ними (рис. 3.1). Елементи функціональної схеми позначаються прямокутниками з підписами скороченими назвами елементів. Зв'язки між елементами показуються лініями, а їх напрямки — стрілками.

На функціональній схемі основної системи автоматичного керування об'єктом керування (ОК) є повітряне середовище інкубаційної камери. Контрольованим параметром є температура повітря в камері. Первинним перетворювачем (СЕ) є датчик температури та вологості. Порівнюючим

елементом виступає керуючий елемент (КЕ) — контролер, вихідний сигнал якого надходить до виконавчого пристрою.

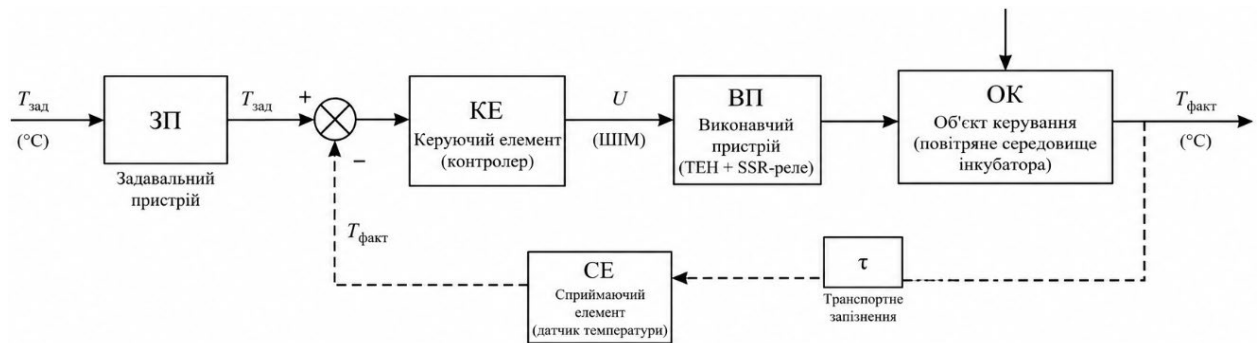


Рис. 3.1. Функціональна схема САК температури повітря в інкубаційній камері

Умовні позначення на схемі: **ЗП** – задавальний пристрій; **КЕ** – керуючий елемент (контролер); **ВП** – виконавчий пристрій (ТЕН + SSR-реле); **ОК** – об'єкт керування (повітряне середовище інкубатора); τ – транспортне запізнення; **СЕ** – сприймаючий елемент (датчик температури); $T_{\text{зад}}$ – задане значення температури, °C; $T_{\text{факт}}$ – поточна температура повітря в камері, °C; **U** – керуючий сигнал ШІМ; **Fзб** – збурюючий вплив на об'єкт керування (зміна температури навколишнього середовища, відкриття дверей камери).

Вибір сприймаючого елемента (датчик)

ПВП – це первинний вимірювальний перетворювач, що являє собою сприймаючий елемент (датчик). Він забезпечує перетворення вимірюваної температури повітря в електричний сигнал, придатний для подальшої обробки контролером. Умовою вибору ПВП є вимога до його інерційності:

$$T_{\text{СЕ}} < 0,1 \cdot T_{\text{об}},$$

де $T_{\text{СЕ}}$ — теплова інерція датчика, с; $T_{\text{об}}$ — стала часу об'єкта керування, с.

Для задоволення цієї умови обираємо цифровий датчик температури та вологості SHT40 виробництва Sensirion (рис. 3.2, табл. 3.2). Датчик призначений для точного вимірювання температури та відносної вологості повітря, має цифровий інтерфейс I²C та промислове калібрування.

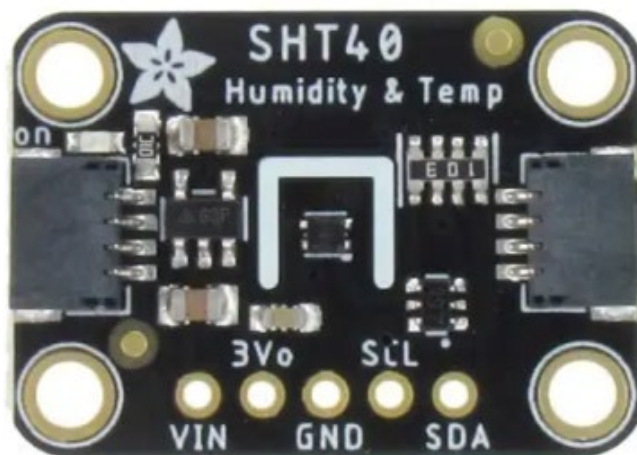


Рис. 3.2. Датчик температури та вологості Sensirion SHT40

Таблиця 1.4.

Технічні характеристики датчика Sensirion SHT40

Характеристика	Значення
Вимірювані величини	Температура (T) та відносна вологість (RH)
Діапазон вимірювання температури	-40...+125 °C
Точність вимірювання температури	±0,2 °C (типова)
Діапазон вимірювання вологості	0...100 % RH
Точність вимірювання вологості	±1,8 % RH (типова)
Теплова інерція TCE	8 с
Інтерфейс зв'язку	I ² C (до 1 МГц)
Напруга живлення	1,8...3,6 В DC

Орієнтовна вартість	від 700 грн
---------------------	-------------

Перевіримо виконання умови вибору датчика:

$$0,1 \cdot T_{об} = 0,1 \cdot 120 = 12 \text{ с.}$$

Оскільки $T_{CE} = 8 \text{ с} < 12 \text{ с}$, умова виконується.

Передатна функція датчика. Динамічні властивості датчика температури описуються інерційною ланкою першого порядку:

$$W_{CE}(s) = K_{CE} / (T_{CE} \cdot s + 1),$$

де K_{CE} — коефіцієнт передачі датчика; T_{CE} — стала часу датчика, с.

Оскільки датчик SHT40 є цифровим і має вбудовану калібровку, його вихідний сигнал подається безпосередньо до контролера в одиницях $^{\circ}\text{C}$ через інтерфейс I²C. Для розрахунку нормованого коефіцієнта передачі в САК визначаємо співвідношення вихідного цифрового коду до діапазону вимірюваних температур у камері (35...40 $^{\circ}\text{C}$, діапазон 5 $^{\circ}\text{C}$):

$$K_{CE} = U_{вих.мах} / \Delta T_{вим} = 10 / 5 = 2,0 \text{ В/}^{\circ}\text{C}.$$

Передатна функція датчика у нормованому вигляді:

$$W_{CE}(s) = 2,0 / (8s + 1).$$

Вибір виконавчого пристрою

Виконавчим механізмом у системі автоматичного керування температурою повітря в інкубаційній камері є трубчастий електричний нагрівальний елемент (ТЕН) потужністю 1500 Вт, керування яким здійснюється через твердотільне реле (SSR) за допомогою ШІМ-сигналу від контролера. Такий спосіб керування є оптимальним для теплових об'єктів з великою тепловою інерцією: він забезпечує плавне (без гістерезису)

регулювання теплової потужності в діапазоні 0...100%, виключає механічний знос контактів і дозволяє реалізувати точний ПІД-алгоритм.

Обираємо твердотільне реле Fotek SSR-40DA (рис. 3.3, табл. 3.3). Воно призначено для безконтактної комутації навантажень змінного струму (ТЕН) керуючим сигналом постійного струму 3...32 В, що безпосередньо формується цифровим виходом контролера.



Рис. 3.3. Твердотільне реле Fotek SSR-40DA

Таблиця 1.5.

Технічні характеристики твердотільного реле Fotek SSR-40DA

Характеристика	Значення
Тип	Твердотільне реле (SSR), AC Output
Керуючий вхід	3...32 В DC
Навантаження (вихід)	24...380 В AC, до 40 А
Максимальна потужність навантаження	до 8800 Вт (при 220 В)
Тип керування	ШИМ (PWM)
Час вмикання / вимикання	< 10 мс

Ступінь захисту	IP20
Монтаж	На DIN-рейку або радіатор охолодження
Орієнтовна вартість	від 300 грн

Передатна функція виконавчого пристрою. Оскільки ТЕН є чисто резистивним елементом, а час перемикання SSR-реле складає менше 10 мс (що на три порядки менше сталої часу об'єкта), динаміку пари ТЕН+SSR можна апроксимувати підсилюючою ланкою: $WBП(s) = KBП$, де $KBП$ — коефіцієнт передачі виконавчого пристрою, що визначається як відношення максимальної теплової потужності до діапазону керуючого сигналу ШІМ (0...100%):

$$KBП = P_{\text{мак}} / 100\% = 1500 / 100 = 15 \text{ Вт/\%}.$$

У нормованому (безрозмірному) вигляді для структурно-алгоритмічної схеми $KBП = 1$.

Таким чином, виконавчий пристрій є безінерційним в контексті динаміки всієї системи, і його стала часу не враховується при розрахунку сумарної некомпенсованої сталої часу.

Обрані технічні засоби — датчик Sensirion SHT40 та твердотільне реле Fotek SSR-40DA — повністю відповідають технологічним вимогам до системи керування мікрокліматом інкубатора, забезпечують необхідну точність вимірювання та надійність комутації нагрівального елемента.

3.3. Реалізація алгоритму керування

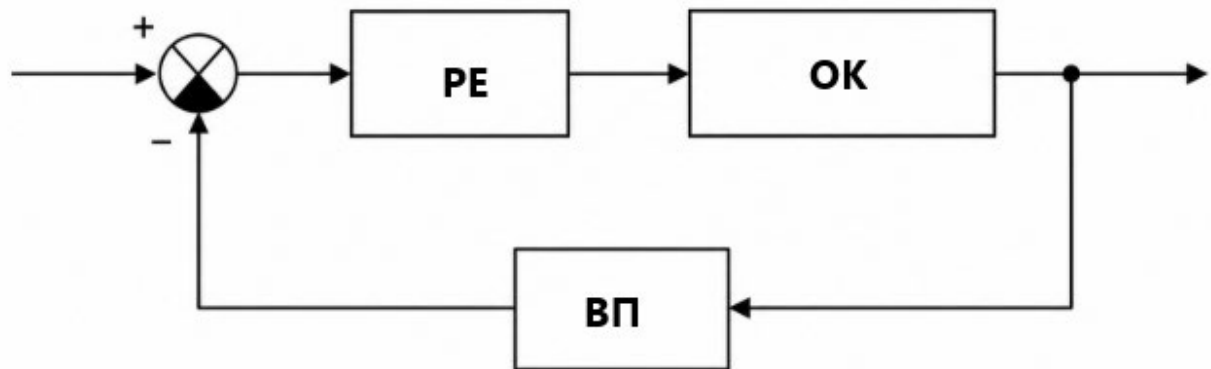


Рис. 3.4. Структурно-алгоритмічна схема САК

$$K_0 = 1,54 \quad T_0 = 120 \text{ с} \quad \tau = 10 \text{ с}$$

Визначення передатних функцій

а) Розімкнутої системи ($f = 0$):

$$\begin{aligned} W_{\text{роз}}(s) &= 2,0 / (8s+1) \cdot 1 \cdot 1,54 / (120s+1) \\ &= 3,08 / (960s^2 + 128s + 1). \end{aligned}$$

б) Передатна функція замкнутої системи за керуванням ($f = 0$):

$$\begin{aligned} W_{\text{зам}}(s) &= W_{\text{роз}}(s) / (1 + W_{\text{роз}}(s)) \\ &= 3,08 / (960s^2 + 128s + 1 + 3,08) \\ &= 3,08 / (960s^2 + 128s + 4,08). \end{aligned}$$

$$K = 3,08$$

3.3.1. Визначення періоду дискретизації

Коли проектується цифрова система керування, виникає питання про вибір частоти квантування. Якщо збільшити частоту квантування — точність керування цифровою системою зростає, проте збільшується навантаження мікропроцесора. Якщо зменшити частоту квантування — втрачається важлива інформація про сигнал, що може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками.

Найменша частота квантування має бути не меншою за $2\omega_c$, де ω_c — найбільша суттєва частота у спектрі неперервного сигналу. Оскільки амплітуда високочастотних складових значно ослаблена, при заданій точності відтворення сигналу його можна вважати таким, що має обмежений спектр. Межу спектра ω_c визначають з умови: $|W_{\text{зам.н.ч}}(j\omega)| \leq \theta_{\text{зад}}$, де $\theta_{\text{зад}}$ — задана максимальна похибка відтворення сигналу.

Частота квантування $\omega_s = 2\pi/T$, але повинна виконуватись нерівність $\omega_s \geq 2\omega_c$, тому допустимий період квантування визначається за формулою:

$$T_{\text{ц}} \leq \pi / \omega_c.$$

Передатна функція неперервної частини цифрової системи керування:

$$W_{\text{роз.н.ч}}(s) = 3,08 / (960s^2 + 128s + 1).$$

Потрібно знайти допустимий період квантування, який забезпечує максимальну похибку відтворення первинного неперервного сигналу $\theta_{\text{зад}} = 1\%$.

Передатна функція неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.н.ч}}(s) = 3,08 / (960s^2 + 128s + 4,08).$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.н.ч}}(j\omega) = 3,08 / [(4,08 - 960\omega^2) + j \cdot 128\omega].$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) неперервної частини замкненої системи:

$$A(\omega) = |W_{\text{зам.н.ч}}(j\omega)| = 3,08 / \sqrt{[(4,08 - 960\omega^2)^2 + (128\omega)^2]}.$$

Значення АЧХ при нульовій частоті:

$$A(0) = 3,08 / \sqrt{(4,08^2)} = 3,08 / 4,08 = 0,755.$$

Правча частина рівняння:

$$A(0) \cdot \theta_{\text{зад}} = 0,755 \cdot 0,01 = 0,00755.$$

Складаємо рівняння для знаходження ω_c :

$$3,08 / \sqrt{[(4,08 - 960\omega^2)^2 + (128\omega)^2]} = 0,00755.$$

Найбільша суттєва частота:

$$\omega_c = 0,648 \text{ рад/с.}$$

Максимально допустимий період квантування, що забезпечує максимальну похибку $\theta_{\text{зад}} = 1 \%$:

$$T_{\text{ц}} = \pi / \omega_c = 3,14 / 0,648 \approx 4,85 \text{ с.}$$

Приймаємо $T_{\text{ц}} = 4,85 \text{ с.}$

3.3.2. Налаштування ПІД-регулятора

Визначаємо параметри ПІД-регулятора. Незмінна частина складається з об'єкта керування з передатною функцією:

$$W_{\text{OK}}(s) = 1,54 / (120s + 1),$$

виконавчого пристрою (SSR-реле Fotek SSR-40DA + ТЕН — безінерційна ланка) з передатною функцією:

$$W_{\text{БП}}(s) = 1$$

та сприймаючого елемента з передатною функцією:

$$W_{\text{CE}}(s) = 2,0 / (8s + 1).$$

Передатна функція незмінної частини:

$$W_{\text{нч}}(s) = 3,08 / [(120s + 1)(8s + 1)].$$

Для визначення параметрів ПІД-регулятора компенсується найбільша стала часу $T_1 = T_0 = 120 \text{ с}$ та $T_2 = T_{\text{CE}} = 8 \text{ с}$. Сумарна некомпенсована стала часу — час транспортного запізнення об'єкта:

$$T_{\mu} = \tau = 10 \text{ с.}$$

Параметри налаштування ПД-регулятора:

$$K_p = (T_1 + T_2) / (K \cdot 2 \cdot T_\mu) = (120 + 8) / (3,08 \cdot 2 \cdot 10) = 128 / 61,6 = 2,08;$$

$$K_i = 1 / (K \cdot 2 \cdot T_\mu) = 1 / (3,08 \cdot 2 \cdot 10) = 1 / 61,6 = 0,0162;$$

$$K_d = (T_1 \cdot T_2) / (K \cdot 2 \cdot T_\mu) = (120 \cdot 8) / (3,08 \cdot 2 \cdot 10) = 960 / 61,6 = 15,58.$$

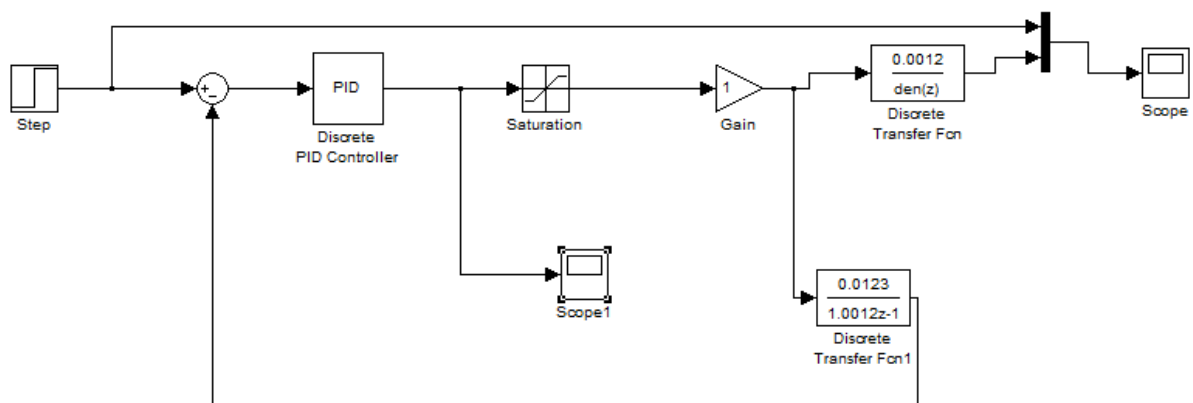


Рис. 3.5. Імітаційна модель аналогової системи керування

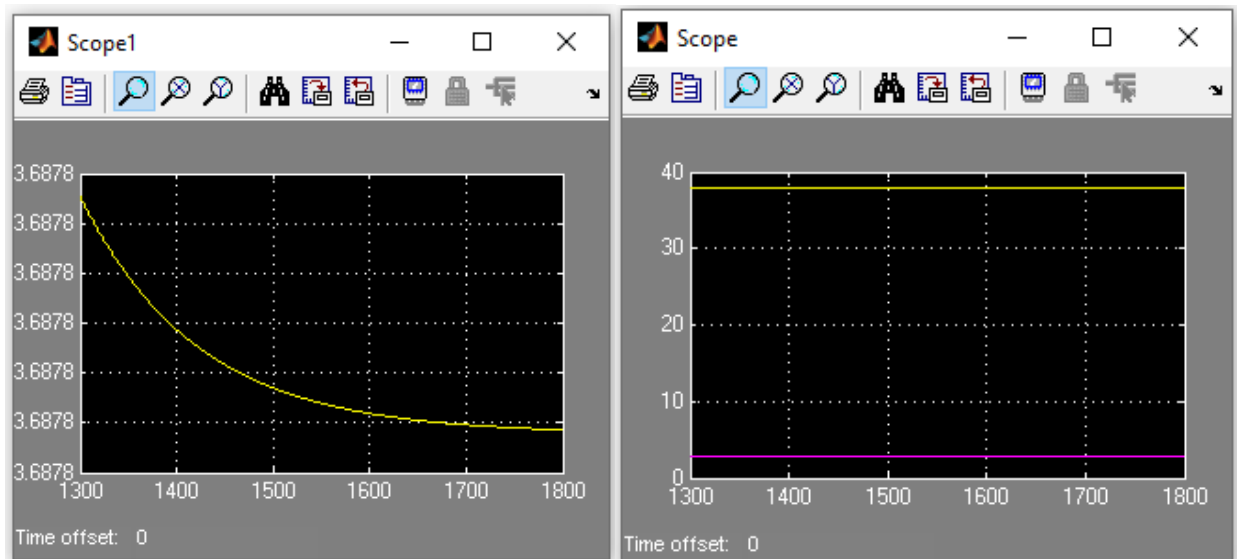


Рис. 3.6. Перехідні характеристики системи з ПД-регулятором

Показники якості скоригованої системи:

— статична похибка $\delta = (\gamma_{\text{зад}} - \gamma_{\text{уст}}) / \gamma_{\text{зад}} \cdot 100\% = (1 - 1) / 1 \cdot 100 = 0$ %;

— час регулювання $t_p = 180$ с;

— перерегулювання $\sigma = (\gamma_{\text{мах}} - \gamma_{\text{уст}}) / \gamma_{\text{уст}} \cdot 100\% = (1,05 - 1) / 1 \cdot 100 = 5$ %;

— коливальність $n = 1$.

При створенні Simulink-моделі скоригованої системи з цифровим ПД-регулятором у відповідності до вибраного алгоритму регулювання потрібно визначити дискретну передатну функцію цифрового регулятора:

$$W_{\text{рег}}(z) = K_p + K_i \cdot T \cdot (z + 1) / [2 \cdot (z - 1)] + K_d \cdot (z - 1) / (T \cdot z).$$

Період квантування дискретного регулятора:

$$T = T_{\text{ц}} / 10 = 4,85 / 10 = 0,485 \text{ с.}$$

Коефіцієнти:

$$K_p = 2,08.$$

$$K_i \cdot T / 2 = 0,0162 \cdot 0,485 / 2 = 0,0039.$$

$$K_d / T = 15,58 / 0,485 = 32,12.$$

Дискретна передатна функція цифрового ПД-регулятора:

$$W_{\text{рег}}(z) = 2,08 + 0,0162 \cdot T \cdot (z + 1) / [2(z - 1)] + 15,58 \cdot (z - 1) / (T \cdot z).$$

3.3.3. Дослідження системи

Показники якості скоригованої системи:

- статична похибка $\delta = (\gamma_{\text{зад}} - \gamma_{\text{уст}}) / \gamma_{\text{зад}} \cdot 100\% = (1 - 1) / 1 \cdot 100 = 0$ %;
- час регулювання $t_p = 195$ с;
- перерегулювання $\sigma = (\gamma_{\text{мах}} - \gamma_{\text{уст}}) / \gamma_{\text{уст}} \cdot 100\% = (1,04 - 1) / 1 \cdot 100 = 4$ %;
- коливальність $n = 1$.

4. Розробка схеми автоматизації

Схема автоматизації є основним технічним документом, що визначає функціональну структуру системи автоматичного керування (САК) та взаємозв'язок між усіма її елементами. У даному підрозділі розроблено повну схему автоматизації на базі контролера HatchTech Controller Setter 1-3d, яка забезпечує комплексне керування мікрокліматом інкубаційної камери сетера. Схема розроблена відповідно до вимог ДСТУ та технічної документації виробника обладнання, що включена до складу проєкту.

Об'єктом керування є інкубаційна камера сетера, де необхідно підтримувати температуру повітря, відносну вологість, вентиляцію та забезпечувати автоматичне перевертання лотків з яйцями. Усі перелічені функції реалізуються єдиним програмованим контролером із розподіленою модульною архітектурою.

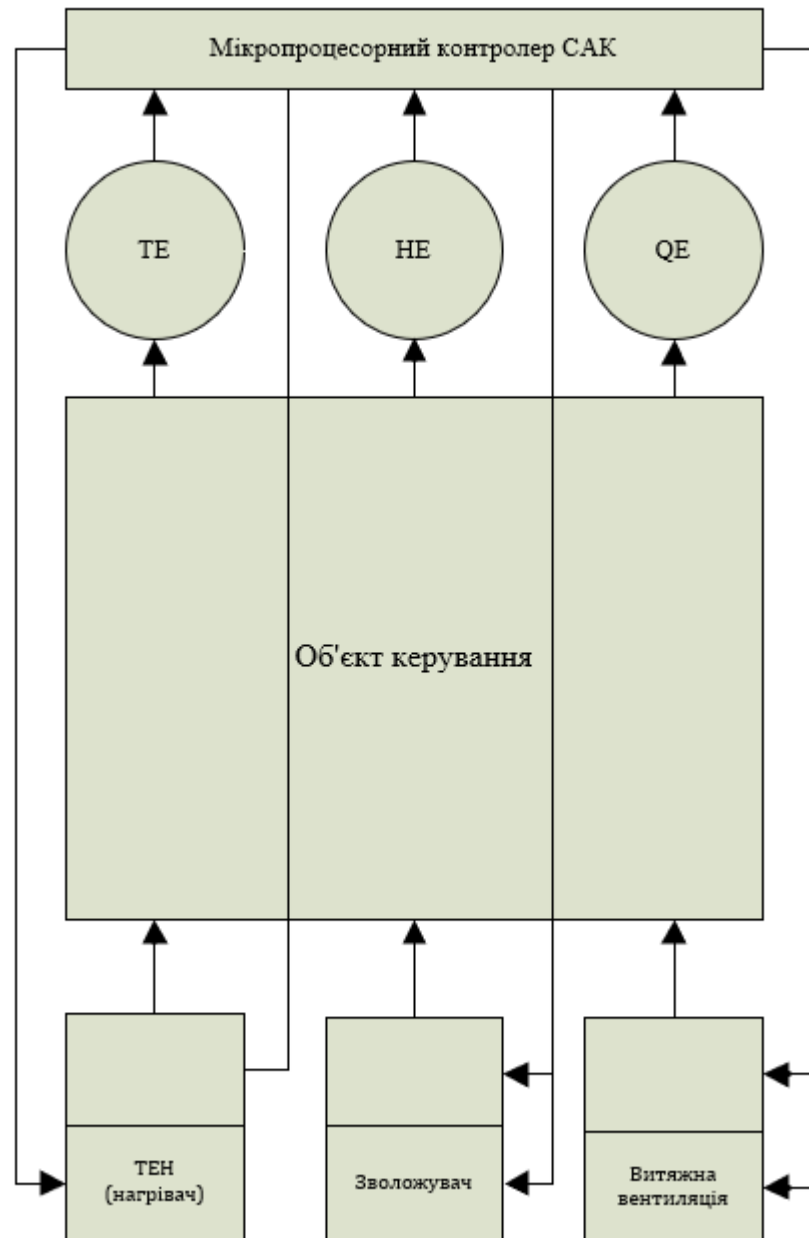


Рис. 4.1. Функціональна схема інкубатора САК

4.1. Опис функціональної структури контролера

Контролер HatchTech Controller Setter 1-3d є спеціалізованим промисловим контролером мікроклімату, розробленим для управління процесом штучної інкубації птиці. Відповідно до електричної схеми, функціональна архітектура контролера включає такі основні підсистеми:

- головний процесорний модуль (-12K5), що забезпечує виконання алгоритмів керування та обмін даними по SCADA-інтерфейсу;
- модуль аналогових та потенціально-вільних виходів (-13K5, NExt XL DAC, DAC, PFO), що формує аналогові сигнали 0-10 В керування приводами заслінок (Belimo) та потенціально-вільні контакти для реле;
- модуль аналогових входів, дискретних входів та датчиків температури (-14K5, NExt XL ADC, DI, NTC), що обробляє сигнали від датчиків температури (NTC 10к), датчиків вологості та CO₂;
- плата керування механізмом перевертання лотків (-19PCB4, -20PCB4), яка керує двома незалежними групами лотків (Car 1-12 та Car 13-24) через приводи Ti-motion та Sued;
- підсистема живлення на базі блоку живлення -5V8 (NDR-240-24, 24 В DC, 10 А), що забезпечує всі модулі стабілізованою напругою;
- підсистема сигналізації та індикації з реле аварії (-10K5), реле пуску (-10K2), LED-підсвіткою та LED-панеллю аварії (-11PCB2);
- частотний перетворювач -6U3 (H300, 5,5-7,5 кВт) для плавного керування швидкістю трьох вентиляторів циркуляції повітря потужністю 2,2 кВт кожен.

Таблиця 1.6. Основні технічні характеристики контролера HatchTech

Характеристика	Значення
Напруга живлення	3~120-257/208-440 В AC+N, 50/60 Гц
Напруга живлення DC-шини	24-28 В DC, 10 А (NDR-240-24)
Габарити шафи (ШхВхГ), мм	232 × 1780 × 216
Матеріал корпусу	Анодований алюміній / оцинкована сталь / пластик
Колір корпусу	RAL 7043 / RAL 3005
Кількість сторінок схеми	36

Характеристика	Значення
Версія документації	v1.3 (05.06.2024)
Клас захисту автоматів	до 32 А (головний вимикач SQ032003R)

4.2. Схема керування зволожувальною системою

Зволожувальна система забезпечує підтримання заданого рівня відносної вологості в інкубаційній камері. До її складу входять два незалежні ультразвукові зволожувачі-випарники: -8U2 (U-Vaporator 1) та -8U11 (U-Vaporator 2) типу ТК-07360F, кожен з яких оснащений власним блоком живлення 48-55 В DC (-8V2 та -8V11 відповідно).

Керування випарниками здійснюється через модуль потенціально-вільних виходів -13K5 (DAC, PFO). Аналоговий вихід J25 (PFO, addr 0) керує першим випарником -8U2, аналоговий вихід J13, J14 модуля -14K5 (DI, addr 1) обробляє зворотній сигнал від датчиків стану клапанів та рівня. Електромагнітні клапани подачі води -8Q7 (Water 1) та -8Q16 (Water 2) підключені до клем терміналу -8X1.

Для захисту кожного зволожувача встановлено плавкий запобіжник: -8F2 (T6,3 AL, 5×20 мм) — для випарника 1 та -8F11 (T6,3 AL) — для випарника 2. Сигнали стану зволожувача (увімкнено/вимкнено лівий та правий клапан, аварія, перемикач клапана) передаються по 7-жильному кабелю (-W15, -W18) до клемної коробки -8X1.

Таблиця 1.8. Технічні характеристики зволожувальної системи

Параметр	Характеристика
Тип зволожувача	Ультразвуковий випарник ТК-07360F (HatchTech)
Кількість зволожувачів	2 незалежні (U-Vaporator 1 та U-Vaporator 2)
Напруга живлення зволожувача	48...55 В DC (від блоку -8V2/-8V11)
Тип клапана подачі води	Електромагнітний нормально-закритий (-8Q7, -8Q16)
Захист кола	Плавкі запобіжники Т6,3АL 5×20 мм (-8F2, -8F11)
Сигнали управління	Потенціально-вільний вихід PFO (0/24 В DC)
Зворотній зв'язок	Дискретні входи ДІ модуля -14K5
Кабель підключення	7-жильний екранований (-W15, -W18)

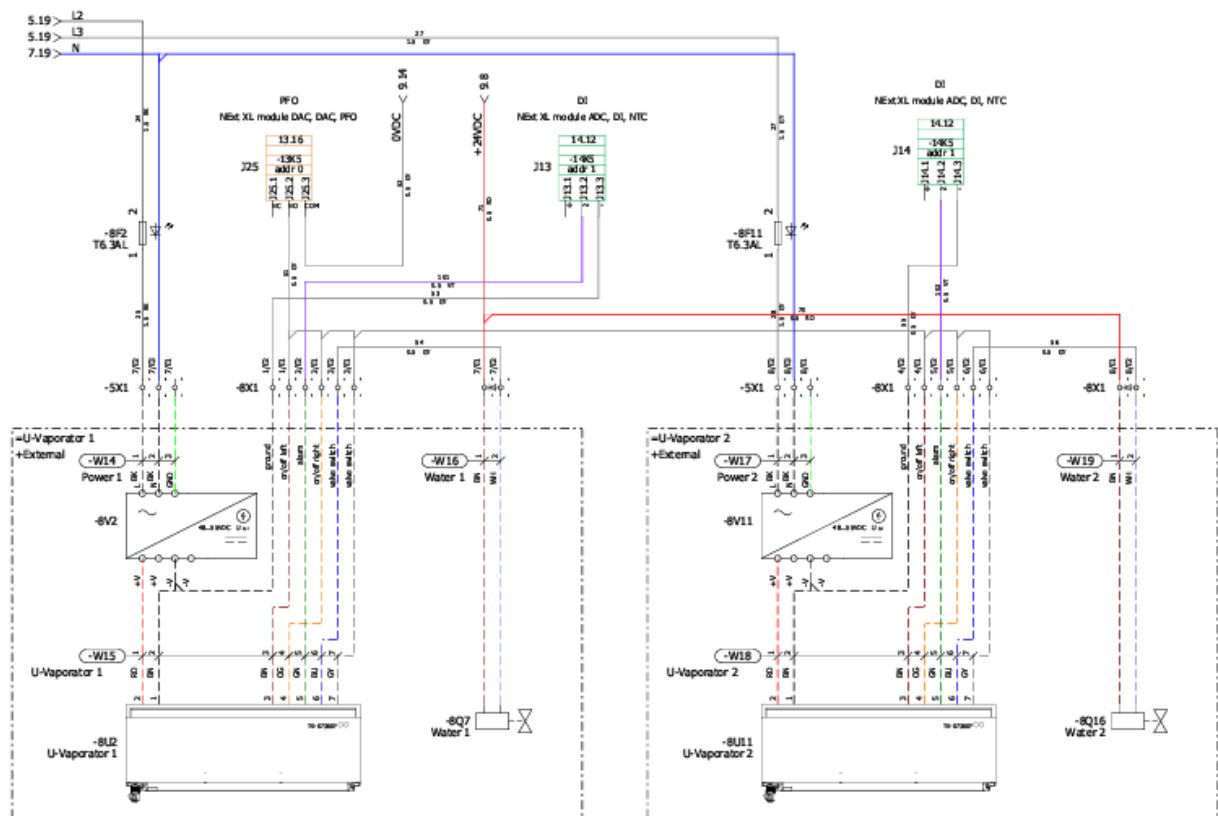


Рис. 4.2. Схема підключення зволожувальної системи

4.3. СХЕМА ДАТЧИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ, ВОЛОГОСТІ ТА CO₂

Вимірювальна підсистема контролера забезпечує моніторинг усіх ключових параметрів мікроклімату інкубаційної камери. Датчики підключаються до модуля -14K5 (NExt XL ADC, DI, NTC, addr 1), який обробляє три типи сигналів: аналогові входи ADC (0-1 В або 0-5 В), дискретні входи DI та сигнали терморезисторів NTC (рис. 2.5.4).

Датчики температури. Система передбачає підключення семи датчиків температури типу NTC 10 кОм (0,25 Вт, 5%) через входи J21-J26 та J28 модуля -14K5. Відповідно до схеми (сторінка 18), датчики -18B3, -18B5, -18B7, -18B9, -18B11, -18B14 вимірюють температуру в шести зонах інкубаційної камери, а датчик -18B16 (Temperature OPC) є датчиком зовнішньої температури або температури повітря для компенсації. Кожен датчик підключається трипровідним екранованим кабелем (GN-YE-Shield) до відповідного входу NTC модуля.

Датчик вологості. Відносна вологість вимірюється за допомогою датчика -17B6 (RENSE Instruments HX-722-I-01, ТК-01200) з вихідним сигналом 0-1 В DC. Датчик підключається до аналогового входу J1 (ADC) модуля -14K5 через кабель -W36 (Humidity sensor cable, 10 м). Точність вимірювання вологості: $\pm 2,0$ % RH.

Датчик CO₂. Концентрація вуглекислого газу вимірюється оптичним інфрачервоним датчиком -17B10 (VAISALA GMP252 1CA0B0N1, ТК-16285) з вихідним сигналом 0-5 В DC. Датчик підключається до аналогового входу J2 (ADC) модуля -14K5 через кабель -W37 (CO₂ sensor cable). Діапазон вимірювання: 0-10000 ppm. Резервна батарея -11B5 (NTC датчик 12 м, PS103J2_12) є датчиком для контролю температури в зоні плати дисплея.

Таблиця 1.9. Перелік датчиків вимірювальної підсистеми

Позначення	Тип / Модель	Вимірювана величина	Вихідний сигнал
-18B3...-18B14	NTC 10кОм, 0,25 Вт	Температура (6 зон)	NTC резистивний
-18B16	NTC 10кОм, 0,25 Вт	Температура OPC	NTC резистивний
-17B6	RENSE HX-722-I-01	Відносна вологість	0-1 В DC
-17B10	VAISALA GMP252	Концентрація CO2	0-5 В DC
-11B5	SENSOR Data PS103J2_12	Температура дисплея	NTC, 12 м кабель
-19B14/-20B14	Індуктивний прокс. датчик	Положення лотків	Дискретний (PNP)

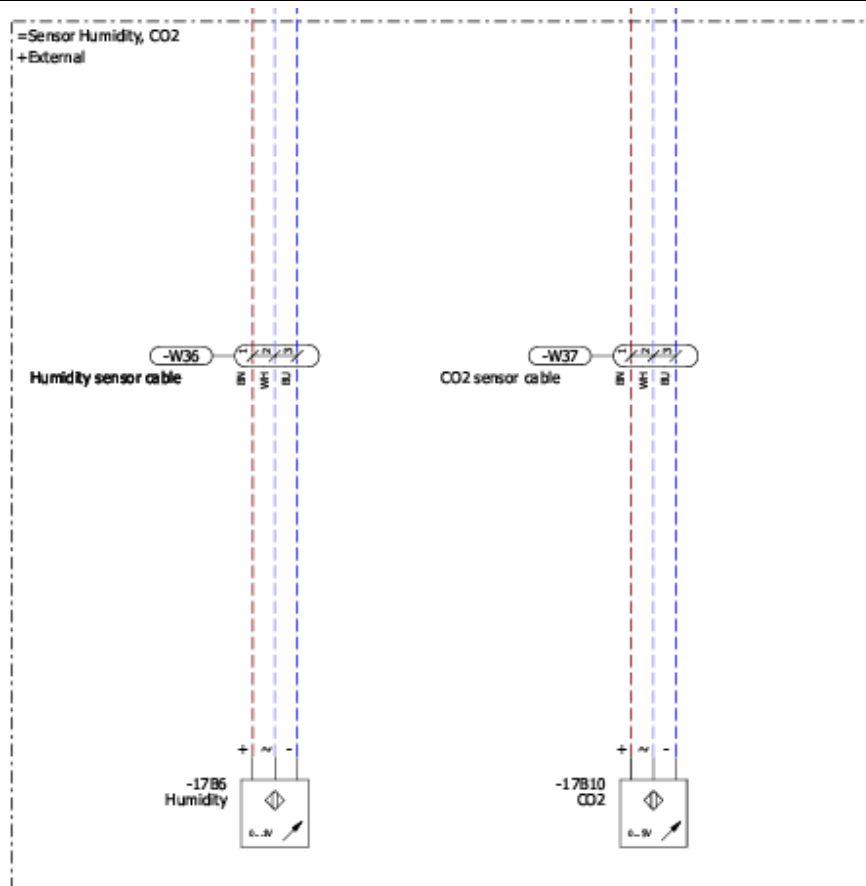


Рис. 4.3. Схема підключення датчиків вологості та CO2

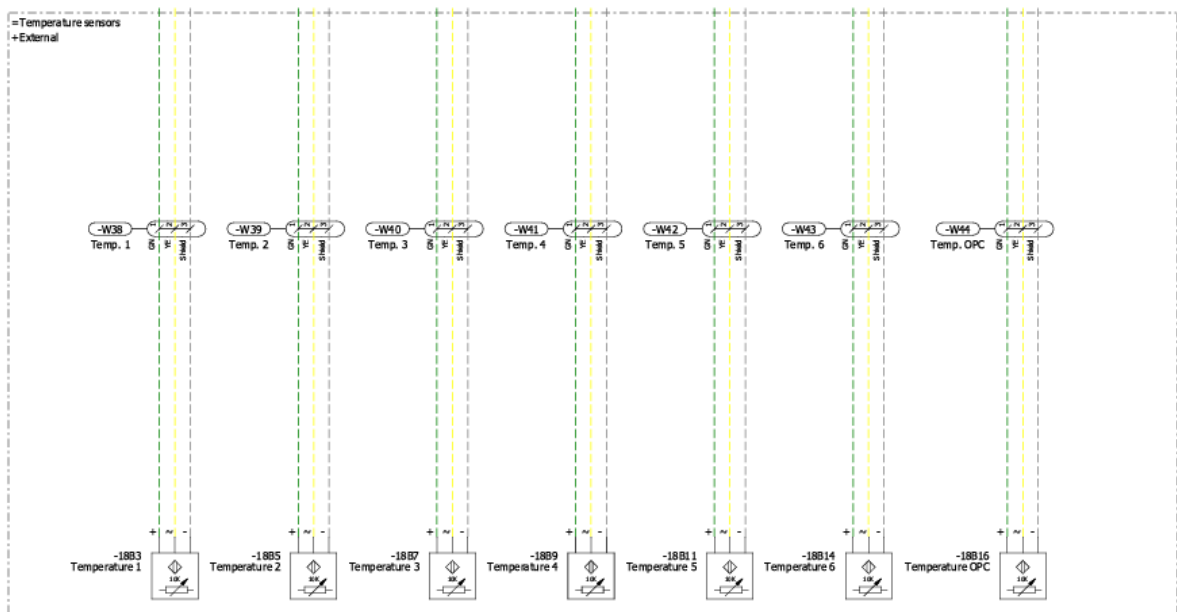


Рис. 4.4. Схема підключення датчиків температури

4.4. СХЕМА КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ ЗАСЛІНОК ТА НАСОСАМИ

Регулювання температурного режиму в інкубаційній камері здійснюється за допомогою приводів заслінок типу Belimo, що керують потоком нагрітого та охолодженого повітря. Схема передбачає підключення 14 приводів Belimo: 6 приводів нагріву (-15Q2, -15Q4, -15Q7, -15Q9, -15Q11, -15Q14), 6 приводів охолодження (-16Q1, -16Q3, -16Q6, -16Q8, -16Q10, -16Q12) та по одному приводу вхідного (-15Q17 Inlet Air) та вихідного (-16Q15 Outlet Air) повітря. Опціонально передбачено привід подачі CO₂ (-16Q18).

Кожен привід Belimo підключається трипровідним екранованим кабелем (BN-WH-Shield): керуючий сигнал 0-10 В DC від виходів DAC модуля -13K5 (addr 0), нульовий провід та екран. Приводи нагріву підключені до виходів J1-J7 модуля DAC (сторінка 15), приводи охолодження та вентиляції — до виходів J11-J18 (сторінка 16).

Насосна система. Система водопостачання зволожувачів включає до шести водяних насосів (-7M6, -7M8, -7M10, -7M11, -7M13, -7M15, позначення Pump 1-6) з однофазним живленням. Усі насоси підключені через розподільну коробку -7EB3 (Enclosure box 160×80×55 мм, ТК-16070С) та клемну рейку -

7X1. Живлення насосів захищено запобіжником -7F4 (T2AL, 2 A). Кабелі підключення насосів (-W8 ... -W13) виконані трипровідними (BN-BU-GNYE).

Система перевертання лотків реалізована на двох платах керування (-19PCB4 та -20PCB4, артикул ТК-10036А). Плата -19PCB4 (нижня) керує лотками Car 1-12 (джампер у відкритому положенні), плата -20PCB4 (верхня) — лотками Car 13-24 (джампер у закритому положенні). Кожна плата підключає до 12 сеттерних візків через 4-контактні роз'єми (Setter trolley). Приводи використовують механізми Ti-motion та Sued, а зворотній зв'язок про завершення повороту забезпечується індуктивними датчиками положення -19B14 та -20B14. Резистори підтяжки 10 кОм (-19R6...-19R10, -20R6...-20R10) забезпечують коректну роботу датчиків.

Таблиця 1.10. Перелік виконавчих механізмів системи автоматизації

Позначення	Кількість	Тип / Призначення	Сигнал керування
-15Q2...-15Q14	6	Belimo, привід нагрівання (Heating 1-6)	0-10 В DC (DAC)
-15Q17	1	Belimo, привід вхідного повітря (Inlet Air)	0-10 В DC (DAC)
-16Q1...-16Q12	6	Belimo, привід охолодження (Cooling 1-6)	0-10 В DC (DAC)
-16Q15	1	Belimo, привід вихідного повітря (Outlet Air)	0-10 В DC (DAC)
-16Q18	1	Belimo, привід CO2 Injection (опц.)	0-10 В DC (DAC)
-6M3, -6M5, -6M7	3	Вентилятор 2,2 кВт (Fans 1-3)	Частотний перетворювач H300
-7M6...-7M15	до 6	Водяний насос (Pumps 1-6)	Дискретне реле (230 В AC)

4.5. Розробка загального вигляду щитка керування

Щит керування системи автоматизації інкубатора-сетера HatchTech є основним постом керування та контролю технологічними параметрами мікроклімату. Відповідно до вимог ГОСТ 36.13–76 «Щити і пульти систем автоматизації технологічних процесів» та технічної документації ES-ТК-13301D, для даного об'єкта обрано шафний щит закритого виконання з одними задніми дверима, призначений для навісного або підлогового монтажу безпосередньо на стіні або технологічному обладнанні.

Конструктивно щит є суцільнозварним корпусом із анодованого алюмінію та оцинкованої сталі з пластиковими елементами декору. Основне кольорове виконання: RAL 7043 (темно-сіра основна частина шафи) та RAL 3005 (темно-бордова лицьова панель оператора). Ступінь захисту корпусу відповідає вимогам виробничих приміщень птахівничих підприємств, де можливі підвищена вологість і запиленість.

Загальні габаритні розміри щита (Ш×В×Г): 232 × 1780 × 216 мм. Маса щита в зборі з комплектуючими становить орієнтовно 35–45 кг.

Щит відноситься до категорії агрегатних (блочних), оскільки на ньому зосереджена вся апаратура керування, контролю та сигналізації одного інкубаційного агрегату-сетера. За місцем розташування щит є місцевим — він монтується безпосередньо на несучій конструкції сетера або на стіні інкубаторного залу поряд з обладнанням.

Склад і розміщення апаратури на фасадній панелі

Лицьова (фасадна) панель щита виконана у темно-бордовому кольорі (RAL 3005) та містить усі органи оперативного керування й індикації, з якими взаємодіє оператор у процесі роботи. Відповідно до креслення планування щита, на фасадній панелі розміщено такі елементи:

- головний вимикач-роз'єднувач -5Q1 (Giovenzana SQ032003R, 32 А) з ручкою блокування (жовто-червона) — монтується у верхній частині фасаду, забезпечує видиме роз'єднання усіх фазних провідників;

-

Рис. 4.6. Загальний вигляд щита керування (вигляд спереду та знизу)

Розміщення апаратури всередині щита

Внутрішня площа щита є монтажною платою (-5B9, Mounting plate controller S, ТК-40857), виготовленою з оцинкованої сталі та закріпленою на задній стінці корпусу. Монтажна плата розрахована на встановлення всього внутрішнього оснащення щита на DIN-рейках (NS 35/7,5 ZN PERF 2000 мм, Phoenix Contact). Кабельні вводи здійснюються знизу корпусу через сальникові введення або кабельні лотки.

Розміщення апаратури в щиті відповідає таким принципам: силова апаратура розташована у лівій частині монтажною плати, апаратура керування та модулі контролера — у правій; плати перевертання розміщені у крайній лівій частині; клемна рейка — уздовж нижнього краю монтажною плати. Відповідно до планування (сторінка 23 схеми ES-ТК-13301D), апаратура розміщується в такій послідовності зліва направо:

- плати перевертання лотків -19PCB4 (нижня, Car 1-12) та -20PCB4 (верхня, Car 13-24) — крайня ліва зона, встановлені вертикально на DIN-рейках;
- монтажна плата (зона живлення та захисту): блок живлення -5V8 (Meanwell NDR-240-24), контактор -9K4 (Lovato 11BG09T4D024), діод захисту -9VD4, контактор -10K2 (Lovato BF38T4D024), реле -10K5 та -10K11, діоди -10VD2, -10VD5, -10VD11;
- запобіжники: -9F11 (T10AL), -10F15 (T4AL), -6F3 (SM1R2500, 20-25A), -9F8 (T4AL), -8F11 (T6,3AL), -8F2 (T6,3AL), -7F4 (T2AL) — у зоні захисту;
- частотний перетворювач -6U3 (Invertek H300, 5,5-7,5 кВт) — центральна-ліва зона, встановлений окремо на монтажній пластині з тепловідводом;

- клемні рейки: -5X1 (15 клем, Phoenix Contact PT 4/PT4BU/PT4-PE), -9X1 (6 клем, PTRVB 4-FI/RD, червоні), -6X1 (8 клем, PTTB 2,5), -9X2 (6 клем, PTRVB 4-FI/GY, сірі), -8X1 (10 клем, PTTB 2,5), -5X2 (4 клеми, заземлення);
- модулі контролера: -12K5 (Main processor module, TK-40378), -13K5 (NExt XL DAC, DAC, PFO, TK-40382), -14K5 (NExt XL ADC, DI, NTC, TK-40383), -12A10 (Black box, RJ45 4X SPLITTER) — права зона.

Таблиця 1.11. Перелік апаратури щита керування ТК-13301D

Позиція	Найменування	Тип / Виробник	К-сть
-5Q1	Головний вимикач-роз'єднувач	SQ032003R, Giovenzana	1
-5Q8	Автоматичний вимикач 1P+N, В, 10А	P1MB1MB10, Lovato	1
-5V8	Блок живлення 24 В DC, 10 А	NDR-240-24, Meanwell	1
-6F3	Автомат захисту двигуна 20-25 А	SM1R2500, Lovato	1
-6U3	Частотний перетворювач 5,5-7,5 кВт	H300, Invertek	1
-7F4/-8F2/-8F11	Запобіжники T2AL / T6,3AL (5×20 мм)	ESKA 522.520/525	2/2/2
-9F8/-9F11/-10F15	Запобіжники T4AL / T10AL / T4AL	ESKA 522.523/527/523	2/2/2
-9K4	Контактор 4-пол., 9А/4,0 кВт, DC 24В	11BG09T4D024, Lovato	1
-9S4	Кнопка аварійної зупинки (гриб)	A01ES-DM, Arpm	1
-9S6	Кнопка «Пуск», антивандальна Ø19	AV091003C2, Arpm	1

Позиція	Найменування	Тип / Виробник	К-сть
-10K2	Контактор 4-пол., 38А/18,5 кВт, DC 24В	BF38T4D024, Lovato	1
-10K5/- 10K11	Реле мінімальне, 24 В DC	REL-MR- 24DC/21-21/MS, Phoenix	2
-11A13	Дисплей оператора (PicoCOM)	TK-15162, HatchTech	1
-11PCB2	LED-панель аварійної сигналізації	TK-30582, HatchTech	1
-12K5	Головний процесорний модуль	TK-40378, HatchTech	1
-13K5	Модуль DAC, DAC, PFO	TK-40382, HatchTech	1
-14K5	Модуль ADC, DI, NTC	TK-40383, HatchTech	1
-19PCB4/- 20PCB4	Плата керування перевертанням	TK-10036A, HatchTech	2
-5X1/- 8X1/-6X1	Клемні рейки PT4/PTTB2,5 (Phoenix)	Phoenix Contact	3 КОМПЛ.
-5X2	Рейка заземлення	52-HK4565, Calpe	1

5 Технічно-економічне обґрунтування

5.1. Аналіз існуючого технологічного процесу

У типових промислових інкубаторах вітчизняного виробництва керування температурно-вологісним режимом здійснюється за релейним (позиційним) законом: біметалевий або електронний термостат вмикає та вимикає трубчасті електронагрівачі (ТЕНи) за уставкою, без врахування швидкості зміни температури. Внаслідок великої теплової інерційності камери та запізнення на передачу тепла від ТЕНу до повітря виникають коливання

температури з амплітудою $\pm 0,3\text{—}0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як технологічно допустиме відхилення для інкубації становить лише $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Окрім того, релейне керування має такі недоліки: — низький відсоток виводимості (60—75 %) через коливання температури, що відхиляються від оптимуму; — підвищене енергоспоживання внаслідок частих циклів «увімкнення—вимкнення» ТЕНу та неможливості плавного регулювання його потужності; — необхідність регулярного візуального контролю оператором стану інкубатора (3—4 рази на добу) та ручної корекції параметрів; — відсутність архівування технологічних даних та можливості діагностики причин зниження виводимості.

Автоматизація на базі програмованого контролера з ПІД-законом керування, твердотілого реле Fotek SSR-40DA з ШІМ-керуванням ТЕНом 1500 Вт та цифрового датчика температури і вологості Sensirion SHT40 усуває перелічені недоліки, забезпечуючи стабільне підтримання температури з відхиленням не більше $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ та підвищення відсотка виводимості до 90—93 %.

З метою оптимізації капітальних витрат та адаптації проєкту під технічні можливості більшості вітчизняних птахівничих підприємств, у даному техніко-економічному обґрунтуванні розглянуто варіант реалізації розроблених алгоритмів та каналів керування на базі промислового контролера ОВЕН ПЛК110-24 та панелі оператора ОВЕН СП310. Дана елементна база є повністю сумісною із розробленою структурою САК інкубатора, забезпечує необхідну кількість каналів вводу-виводу та дозволяє мінімізувати початкові інвестиції без втрати точності регулювання.

5.2. Розрахунок капітальних витрат

До складу капітальних витрат на впровадження автоматичної системи керування мікрокліматом інкубатора входять: вартість контрольно-вимірювальних приладів та засобів автоматизації, виконавчих механізмів, пускозахисної та комутаційної апаратури, кабельної продукції, монтажних і пусконаладжувальних робіт, розробки програмного забезпечення та

навчання обслуговуючого персоналу. Структуру капітальних витрат наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Капітальні витрати на впровадження автоматичної системи керування

№	Найменування	Сума, грн
1	Програмований контролер (ОВЕН ПЛК110-24)	18 500
2	Панель оператора ОВЕН СП310	6 800
3	Датчики температури і вологості Sensirion SHT40 (3 шт)	2 100
4	Датчик CO ₂ NDIR (4-20 мА)	4 500
5	Твердотільні реле Fotek SSR-40DA (3 шт)	960
6	ТЕН трубчастий 1500 Вт з резервом (4 шт)	3 400
7	Вентилятори припливно-витяжні (2 шт)	3 600
8	Електропривод заслінок припливно-витяжної вентиляції	2 200
9	Ультразвуковий зволожувач туману	3 500
10	Електромагнітні клапани форсунок (2 шт)	960
11	Мотор-редуктор перевертання лотків	4 500
12	Біметалевий термостат (аварійний)	380
13	Автоматичні вимикачі ВА-2017 (5 шт)	900
14	Магнітні пускачі Промфактор FC1 (2 шт)	1 178
15	Блок живлення 24 В	1 800
16	Сигнальні лампи, кнопки, проміжні реле	2 500
17	Шафа керування Spacial S3D	4 800

18	Кабельна продукція (ВВГнг, КВВГЕ)	3 500
19	Монтажні роботи	12 387
20	Пусконаладжувальні роботи	6 500
21	Розробка та налаштування програмного забезпечення	8 500
22	Навчання обслуговуючого персоналу	1 500
	Всього капітальних витрат	94 965

Загальна сума капітальних витрат становить $K_{\text{кап}} = 94\,965$ грн. Найбільшу частку становлять засоби автоматизації верхнього рівня (контролер з панеллю оператора) — приблизно 27 % від загальної суми.

5.3. Розрахунок витрат при існуючому (релейному) керуванні

Основними складниками експлуатаційних витрат інкубаторію є вартість електроенергії (на нагрівання ТЕНом, роботу вентиляторів, зволожувача та допоміжного обладнання) та оплата праці оператора-інкубаторника. Інкубатор працює цілодобово протягом всього року з кількома послідовними циклами інкубації (близько 12 циклів на рік).

При релейному (позиційному) керуванні ТЕН в середньому працює на 80 % номінальної потужності внаслідок частих перемикань та необхідності компенсації коливань. Середнє споживання потужності з урахуванням допоміжного обладнання (вентилятори 2×80 Вт, зволожувач 50 Вт, привод лотків 100 Вт, сигналізація та контролер 200 Вт):

$$P_{\text{стар}} = 1500 \cdot 0,80 + 2 \cdot 80 \cdot 0,70 + 50 \cdot 0,60 + 100 \cdot 0,05 + 200 \approx 1547 \text{ Вт} \quad (5.1)$$

Річне споживання електроенергії при цілодобовій роботі (8760 год/рік):

$$E_{\text{стар}} = P_{\text{стар}} \cdot t_{\text{рік}} = 1,547 \cdot 8760 \approx 13\,552 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (5.2)$$

При тарифі для непобутових споживачів $C_{ел} = 8,5$ грн/(кВт·год) з ПДВ річні витрати на електроенергію:

$$B_{ел.стар} = E_{стар} \cdot C_{ел} = 13\,552 \cdot 8,5 \approx 115\,190 \text{ грн} \quad (5.3)$$

Заробітна плата оператора-інкубаторника при існуючій технології (4 год/добу $\times$ 365 діб, погодинна ставка 80 грн/год, ЄСВ 22 %):

$$Z_{оп.стар} = t_{роб} \cdot C_{год} \cdot (1 + K_{ЕСВ}) = 1460 \cdot 80 \cdot 1,22 = 142\,496 \text{ грн} \quad (5.4)$$

Сумарні річні експлуатаційні витрати при релейному керуванні наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Річні витрати при релейному керуванні

№	Стаття витрат	Сума, грн/рік
1	Витрати на електроенергію	115 190
2	Оплата праці оператора (з ЄСВ)	142 496
	Всього	257 686

Сумарні річні витрати при релейному керуванні становлять $B_{стар} = 257\,686$ грн.

Розрахунок витрат при автоматичному керуванні

При впровадженні автоматичної системи керування з ПІД-регулятором та ШІМ-керуванням ТЕНом досягається економія електроенергії за рахунок: точного дозування теплової потужності залежно від фактичного відхилення температури від уставки; уникнення «перетопів» внаслідок інтегральної складової регулятора; зниження середньої потужності ТЕНу до 55—60 %

номінальної завдяки плавному регулюванню. Приймаємо в розрахунках економію електроенергії $\delta_{ек} = 24 \%$ (підтверджено моделюванням у розділі 3).

Середня потужність споживачів при автоматичному керуванні:

$$P_{нов} = 1500 \cdot 0,58 + 2 \cdot 80 \cdot 0,50 + 50 \cdot 0,40 + 100 \cdot 0,05 + 200 \approx 1175 \text{ Вт} \quad (5.5)$$

Річне споживання електроенергії при автоматичному керуванні:

$$E_{нов} = P_{нов} \cdot t_{рік} = 1,175 \cdot 8760 \approx 10\,293 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (5.6)$$

Витрати на електроенергію при автоматичному керуванні:

$$B_{ел.нов} = E_{нов} \cdot C_{ел} = 10\,293 \cdot 8,5 \approx 87\,490 \text{ грн} \quad (5.7)$$

При автоматичному керуванні присутність оператора потрібна лише для періодичного контролю стану обладнання (1 год/добу $\times$ 365 діб):

$$З_{оп.нов} = 365 \cdot 80 \cdot 1,22 = 35\,624 \text{ грн} \quad (5.8)$$

Амортизаційні відрахування на впроваджену автоматичну систему (норма амортизації для електронного обладнання $H_a = 20 \%$):

$$A = K_{кап} \cdot H_a = 94\,965 \cdot 0,20 = 18\,993 \text{ грн} \quad (5.9)$$

Витрати на технічне обслуговування системи (5 % від капітальних витрат):

$$B_{обсл} = K_{кап} \cdot 0,05 = 94\,965 \cdot 0,05 = 4\,748 \text{ грн} \quad (5.10)$$

Сумарні річні витрати при автоматичному керуванні наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Річні витрати при автоматичному керуванні

№	Стаття витрат	Сума, грн/рік
1	Витрати на електроенергію	87 490

2	Оплата праці оператора (з ЄСВ)	35 624
3	Амортизаційні відрахування	18 993
4	Технічне обслуговування системи	4 748
	Всього	146 856

Сумарні річні витрати при автоматичному керуванні становлять $B_{нов} = 146\,856$ грн.

Економічний ефект та показники ефективності

Окрім прямої економії експлуатаційних витрат, автоматизація інкубаційного процесу забезпечує найбільший економічний ефект саме за рахунок суттєвого підвищення відсотка виводимості. Точне підтримання температури в межах $\pm 0,1$ °C (замість $\pm 0,3—0,5$ °C при релейному керуванні) забезпечує виводимість на рівні 92 % проти 75 % при ручному. При продуктивності інкубатора 5000 яєць за цикл та 12 циклах на рік загальна кількість завантажених яєць становить 60 000 шт. Додаткова кількість курчат, отриманих за рахунок підвищення виводимості:

$$\Delta N = N \cdot (\eta_{нов} - \eta_{стар}) = 60\,000 \cdot (0,92 - 0,75) = 10\,200 \text{ курчат}$$

При середній закупівельній ціні добового курчати $C_k = 30$ грн додатковий річний прибуток господарства від підвищення якості процесу:

$$P_{дод} = \Delta N \cdot C_k = 10\,200 \cdot 30 = 306\,000 \text{ грн}$$

Річний економічний ефект від впровадження автоматичної системи керування:

$$E = (B_{стар} - B_{нов}) + P_{дод} = (257\,686 - 146\,856) + 306\,000 = 416\,830 \text{ грн}$$

Термін окупності капітальних вкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{кап}}}{E} = \frac{94\,965}{416\,830} = 0,23 \text{ року} \approx 2,7 \text{ місяця} \quad (5.14)$$

Розрахунковий коефіцієнт економічної ефективності:

$$E_p = \frac{1}{T_{\text{ок}}} = \frac{1}{0,23} = 4,39 \quad (5.15)$$

Отриманий коефіцієнт ефективності $E_p = 4,39$ у багато разів перевищує нормативний $E_n = 0,15$, що підтверджує високу економічну доцільність впровадження автоматичної системи керування мікрокліматом інкубатора. Чистий економічний ефект за 5 років експлуатації:

$$E_5 = E \cdot 5 - K_{\text{кап}} = 416\,830 \cdot 5 - 94\,965 = 1\,989\,184 \text{ грн} \quad (5.16)$$

Підсумкові техніко-економічні показники проєкту наведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Зведені техніко-економічні показники

№	Показник	Значення
1	Капітальні витрати, грн	94 965
2	Річні витрати при релейному керуванні, грн	257 686
3	Річні витрати при автоматичному керуванні, грн	146 856
4	Економія експлуатаційних витрат, грн/рік	110 830
5	Додатковий прибуток від підвищення виводимості, грн/рік	306 000
6	Загальний економічний ефект, грн/рік	416 830
7	Термін окупності, років	0,23 ($\approx 2,7$ міс)
8	Коефіцієнт ефективності	4,39
9	Чистий ефект за 5 років, грн	1 989 184

У результаті техніко-економічного обґрунтування встановлено доцільність впровадження автоматичної системи керування мікрокліматом інкубаційної камери на базі мікропроцесорного контролера з ПІД-регулятором:

— капітальні витрати на впровадження автоматичної системи становлять 94 965 грн, при цьому понад половину суми (55 %) припадає на засоби автоматизації верхнього рівня (контролер, панель оператора, датчики, твердотільне реле);

— річний економічний ефект становить 416 830 грн і формується з трьох складових: економії електроенергії (27 700 грн), скорочення витрат на оплату праці (106 872 грн) та, найголовніше, додаткового прибутку від підвищення відсотка виводимості на 17 % (306 000 грн);

— термін окупності капітальних вкладень становить 0,23 року (приблизно 2,7 місяця), що пояснюється значним приростом виводимості й, відповідно, додаткового виходу продукції після впровадження точного ПІД-керування;

— коефіцієнт економічної ефективності $E_p = 4,39$ у багато разів перевищує нормативний $E_n = 0,15$, що свідчить про високу інвестиційну привабливість проєкту;

— чистий економічний ефект за п'ятирічний термін експлуатації системи становить близько 1,99 млн грн.

Окрім прямих фінансових показників, автоматизація забезпечує низку якісних переваг: безперервний моніторинг та архівування технологічних параметрів, можливість дистанційного керування й аварійної сигналізації, зниження впливу людського фактора на якість процесу інкубації, підвищення стабільності виводимості незалежно від кваліфікації операторів та зменшення ризику втрат через нестабільний температурний режим.

Висновок

У рамках даної дипломної роботи було розроблено систему автоматичного регулювання параметрів мікроклімату в інкубаторі на базі контролера HatchTech Controller Setter 1-3d. Було проведено аналіз керованої системи, визначено основні параметри мікроклімату та обрано технічні засоби для їх моніторингу та регулювання. Для вимірювання температури було обрано датчик Sensirion SHT40, а для керування нагрівальним елементом — твердотільне реле Fotek SSR-40DA, що забезпечує необхідну точність та надійність системи.

Розроблено математичну модель системи автоматичного регулювання температури інкубаційної камери та визначено її передавальні функції. На основі отриманої моделі розраховано параметри ПІД-регулятора, що дало такі значення: $K_p = 2,08$; $K_i = 0,0162$; $K_d = 15,58$.

Моделі аналогових та цифрових систем управління створюються в MATLAB Simulink і використовуються для дослідження динамічних характеристик системи. Результати моделювання показують, що система не має стаціонарних похибок, з перевищенням, що не перевищує 5%, та часом стабілізації приблизно від 180 до 195 секунд, що відповідає вимогам до системи регулювання мікроклімату інкубатора.

Також розроблено схему автоматизації інкубаційної камери, яка дозволяє керувати всіма параметрами температури, вологості, вентиляції та механізмом обертання лотків для яєць. Використання сучасного обладнання для автоматизації дозволяє більш точно контролювати параметри мікроклімату, зменшує вплив людського фактора та підвищує ефективність процесу інкубації.

Список використаних джерел

1. Лисенко В. П., Дудник А. О., Мірошник В. О., Руденський А. А., Заєць Н. А. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра : навч. посіб. для студ. спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ : Компринт, 2023. 303 с. URL: <https://nubip.edu.ua/node/1413> (дата звернення: 04.06.2026).
2. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ : Укрархбудінформ, 2018. 104 с. URL: <https://www.minregion.gov.ua/> (дата звернення: 04.06.2026).
3. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації на схемах. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 15 с.
4. ДСТУ ГОСТ 2.702:2012. Єдина система конструкторської документації. Правила виконання електричних схем (ГОСТ 2.702-2011, IDT). Київ : Мінекономрозвитку України, 2013. 34 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=28511 (дата звернення: 04.06.2026).
5. ГОСТ 2.710-81. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные буквенно-цифровые в электрических схемах. Москва : Издательство стандартов, 1982. 22 с.
6. HatchTech MicroClimer Incubation System. Technical specifications and ventilation design of Setter and Hatcher systems. *HatchTech B.V. official repository*. Veenendaal, Netherlands, 2024. URL: <https://hatchtech.com/en/incubation-solutions/microclimer-setters/> (дата звернення: 04.06.2026).

7. Optidrive H300 HVAC Drives. Variable Frequency Drives for Fan & Pump Control: User Guide & Technical Data. *Invertek Drives Documentation*. Welshpool, UK, 2023. 114 p. URL: <https://www.invertekdrives.com/variable-frequency-drives/optidrive-h300> (дата звернення: 04.06.2026).

8. SHT4x Digital Temperature and Humidity Sensor. Datasheet v2. *Sensirion Smart Sensor Solutions*. Stäfa, Switzerland, 2022. 14 p. URL: <https://sensirion.com/products/catalog/SHT40/> (дата звернення: 04.06.2026).

9. Fotek Solid State Relay SSR-40DA. Specifications and Mounting Instructions. *Fotek Controls Co., Ltd.* Hsinchu, Taiwan, 2021. URL: <https://www.fotek.com.tw/> (дата звернення: 04.06.2026).

10. Моделювання та оптимізація систем автоматичного керування мікрокліматом у ПППІ MATLAB / Simulink : метод. вказівки до лабораторних занять. Київ : НУБіП України, 2022. 58 с. URL: <https://elearn.nubip.edu.ua/> (дата звернення: 04.06.2026).

11. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання під тиском. Державна служба України з питань праці. Київ : Форт, 2018. 84 с. URL: <https://dsp.gov.ua/> (дата звернення: 04.06.2026).