

**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 МІКРОКЛІМАТОМ В ІНКУБАТОРІ ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
SCHNEIDER ELECTRIC»**

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

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

(підпис)

Грищенко В.О.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Виговський В.А.
(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) (ПБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Виговському Владиславу Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: «РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ В ІНКУБАТОРІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ SCHNEIDER ELECTRIC»,

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. Технічна документація та каталоги обладнання Schneider Electric.

3.4. Наукова література з автоматизації технологічних процесів та систем керування мікрокліматом інкубаторів.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Аналіз технологічного процесу інкубації яєць та існуючих систем керування інкубаторами.

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі інкубатора як об'єкта регулювання.

4.3. Синтез ПД-регулятора та обґрунтування параметрів його налаштування.

4.4. Розробка алгоритму та системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора.

4.5 Розробка функціональної схеми автоматизації та електротехнічної частини системи.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування системи автоматичного керування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування мікрокліматом інкубатора.

5.2. Структурно-функціональна схема системи автоматичного регулювання мікроклімату інкубатора.

5.3. Система автоматичного керування інкубатором. Схема електрична принципова.

5.4. Система автоматичного керування інкубатором. Схема електричних з'єднань та підключень.

5.5. Система автоматичного керування інкубатором. Загальний вигляд щита керування.

Дата видачі завдання "25" жовтня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Грищенко В.О.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Виговський В.А.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ В ІНКУБАТОРІ	11
1.1. Технічний опис інкубатора	11
1.2. Технологічний процес інкубації яєць	13
1.3. Інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування	15
1.4. Опис існуючих систем керування інкубаторами.....	17
1.5. Розробка функціональної схеми інкубатора.....	18
Висновки до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ІНКУБАТОРА ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ.....	23
2.1. Модель інкубатора як об'єкта керування	23
2.2. Перехідні характеристики об'єкта	28
2.3. Передаточні функції об'єкта	31
Висновки до розділу 2	35
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ІНКУБАТОРА	36
3.1. Вибір технічних засобів автоматизації	36
3.2. Передаточні функції технічних засобів автоматизації	44
3.3. Розробка структурно-функціональної схеми САК	45
3.4. Розімкнена та замкнена система автоматичного керування	47
3.5. Теорема Котельникова	49
3.6. Вибір алгоритму регулювання	50
3.7. Синтез ПІД-регулятора	53
3.8. Перевірка системи на якість та стійкість	55
Висновки до розділу 3	57

РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	58
4.1. Реалізація алгоритму на ПЛК	58
4.2. Розробка електричної принципової схеми	62
4.3. Розробка схеми електричних з'єднань та підключень	65
4.4. Розробка загального виду щита керування	67
4.5. Комплектування щита керування	68
4.5.1. Вибір автоматичних вимикачів	68
4.5.2. Вибір електромагнітних пускачів та проміжних реле	70
4.5.3. Вибір проводів та кабелів	73
Висновки до розділу 4	74
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ В ІНКУБАТОРІ	75
5.1. Визначення капітальних вкладень	75
5.2. Розрахунок річних експлуатаційних витрат	78
5.3. Визначення економічної ефективності системи	79
Висновки до розділу 5	80
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84
ДОДАТКИ	87

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота Виговського Владислава Андрійовича «Розроблення системи автоматичного керування мікрокліматом в інкубаторі із використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric» складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У роботі проведено аналіз технологічного процесу інкубації яєць та особливостей функціонування сучасних інкубаторів. Досліджено вплив параметрів мікроклімату на ефективність інкубації та якість виведення молодняка птиці. Виконано аналіз існуючих систем автоматичного керування інкубаторами та обґрунтовано доцільність використання програмованих логічних контролерів Schneider Electric для автоматизації процесу.

Бакалаврська кваліфікаційна робота розміщена на 84 сторінках машинописного тексту, містить 10 таблиць, 28 рисунків та 1 додаток.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та завдання роботи, об'єкт і предмет дослідження, а також практичне значення розроблюваної системи автоматичного керування.

У першому розділі виконано аналіз системи керування мікрокліматом в інкубаторі, наведено технічний опис інкубатора, розглянуто технологічний процес інкубації яєць, проведено інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування, досліджено існуючі системи керування інкубаторами та розроблено функціональну схему автоматизації технологічного процесу.

У другому розділі побудовано та досліджено математичну модель інкубатора як об'єкта регулювання. Отримано перехідні характеристики та передаточні функції каналів температури і вологості, виконано аналіз динамічних властивостей об'єкта та підготовлено математичну основу для синтезу системи автоматичного керування.

У третьому розділі обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, розроблено структурно-функціональну схему системи автоматичного

керування, досліджено передаточні функції технічних засобів, виконано аналіз розімкненої та замкненої систем керування, обґрунтовано вибір алгоритму регулювання, проведено синтез ПД-регулятора та перевірку системи на якість і стійкість.

У четвертому розділі виконано реалізацію алгоритму керування на програмованому логічному контролері Schneider Electric Modicon M241, розроблено електричну принципову схему, схему електричних з'єднань та підключень, загальний вигляд щита керування, а також проведено вибір автоматичних вимикачів, електромагнітних пускачів, проміжних реле, проводів і кабелів для побудови системи автоматизації.

У п'ятому розділі проведено техніко-економічне обґрунтування розробленої системи автоматичного керування мікрокліматом в інкубаторі. Виконано розрахунок капітальних вкладень та річних експлуатаційних витрат, визначено показники економічної ефективності та оцінено доцільність впровадження розробленої системи в практичну експлуатацію.

У висновках узагальнено результати проведених досліджень, підтверджено ефективність використання програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241 для автоматичного керування мікрокліматом інкубатора та наведено рекомендації щодо практичного впровадження розробленої системи.

Ключові слова: інкубатор, мікроклімат, автоматичне керування, автоматизація, Schneider Electric, програмований логічний контролер, температура, вологість, PLC, MODICON M241.

ВСТУП

Інкубація яєць – складний процес, який вимагає спеціальних знань. Від умов інкубації залежить, яким чином відбувається процес ембріонального розвитку птиці. Для одержання позитивних результатів інкубації необхідне виконання деяких умов: наявність сучасних інкубаторів, основних та допоміжних приміщень, біологічно повноцінних яєць, добре обізнаного, знаючого свою справу персоналу, суворе дотримання послідовності технологічного процесу.

Штучна інкубація має важливе значення в розвитку птахівництва. З переходом його на промислову основу інкубація стала однією із ланок технологічного процесу виробництва яєць і м'яса птиці і має свої переваги:

- проводиться протягом усього року і не залежить від наявності квочок;
- цілорічна інкубація усуває сезонність відтворення птиці та виробництва продукції птахівництва;
- дозволяє отримувати для вирощування в потрібній кількості великі партії одновікового молодняку;
- велике значення для м'ясного птахівництва, від м'ясних видів птиці майже всі яйця використовуються для інкубації з метою одержання великої кількості м'ясного молодняку; за допомогою квочок зробити це неможливо;
- витрати праці на штучну інкубацію та собівартість добового молодняку значно менші порівняно з виведенням молодняку під квочками;
- полегшує проведення племінної роботи (індивідуальне виведення молодняку підвищує ефективність добору та підбору птиці).

На даний час в Україні для інкубації яєць сільськогосподарської птиці використовують інкубатори «Рас Реформ» (Нідерланди), «Петерсайм» (Бельгія), «Чік Мастер» (США), «Вікторія» (Італія), «Інка» (Україна) та ін. Інкубатори типу «Універсал-55» ще досить поширені в господарствах, не зважаючи на те, що їх

випуск припинено. Вказані інкубатори призначені для інкубації яєць птиці усіх видів [25].

Порушення температурного режиму або рівня вологості навіть на незначний проміжок часу може негативно вплинути на розвиток ембріонів, знизити відсоток виводу та призвести до економічних втрат. Саме тому актуальним завданням є створення сучасних систем автоматичного керування мікрокліматом інкубаторів із використанням надійних програмно-технічних засобів автоматизації.

На сьогоднішній день для автоматизації технологічних процесів широко використовуються програмовані логічні контролери, датчики та системи диспетчеризації провідних світових виробників. Одним із лідерів у сфері промислової автоматизації є компанія Schneider Electric, обладнання якої характеризується високою надійністю, гнучкістю налаштування та широкими можливостями інтеграції.

Використання технічних засобів Schneider Electric дозволяє реалізувати ефективну систему автоматичного керування інкубатором, яка забезпечує автоматичне підтримання заданих параметрів мікроклімату, контроль стану обладнання, підвищення енергоефективності та зменшення впливу людського фактору на технологічний процес.

Об'єктом дослідження є процес керування мікрокліматом в інкубаторі для інкубації яєць сільськогосподарської птиці.

Предметом дослідження є система автоматичного керування температурою та вологістю повітря в інкубаторі із використанням програмованого логічного контролера та технічних засобів Schneider Electric.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка системи автоматичного керування мікрокліматом в інкубаторі із використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric, що забезпечує автоматичне підтримання заданих параметрів температури та вологості повітря відповідно до вимог технологічного процесу інкубації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- провести аналіз технологічного процесу інкубації яєць та особливостей функціонування сучасних інкубаторів;
- виконати інформаційний аналіз інкубатора як об'єкта автоматичного керування;
- побудувати та дослідити математичну модель інкубатора за каналами температури та вологості;
- виконати синтез регулятора та обґрунтувати параметри його налаштування;
- розробити алгоритм автоматичного керування мікрокліматом інкубатора;
- здійснити вибір програмованого логічного контролера, датчиків, виконавчих механізмів та інших технічних засобів автоматизації;
- розробити функціональну схему автоматизації, електричну принципову схему, схему електричних з'єднань та загальний вигляд щита керування;
- виконати техніко-економічне обґрунтування розробленої системи.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241, яка забезпечує стабільне підтримання температури та вологості, підвищення ефективності процесу інкубації, зменшення впливу людського фактора та може бути використана під час модернізації існуючих або створення нових інкубаційних установок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ В ІНКУБАТОРІ

1.1. Технічний опис інкубатора

Побутовий інкубатор складається з корпусу, виконаного, як правило, із щільного пінополіуретану (пінопласту), системи підтримки внутрішньої температури та вологості, а також механізму, що забезпечує періодичну зміну положення інкубованих яєць [14].

Система підтримки внутрішньої температури складається з датчика (термометра), нагрівального елемента та терморегулятора. Найбільш поширеним типом нагрівача є ламповий, де як нагрівальний елемент застосовується побутова лампа розжарювання, проте, останнім часом, як нагрівальний елемент інкубаторів застосовується тепловий шнур, перевагами якого є невеликі фізичні розміри та низька теплова інертність. Пристрої підтримки необхідної температури (терморегулятор), що застосовуються в конструкції інкубаторів, також бувають кількох типів: електронні (цифрові) і електромеханічні.

Ще однією необхідною умовою правильного виведення курчат птаха є періодична зміна положення яєць при інкубації. У побутових інкубаторах часто для цих цілей застосовуються спеціальні механізми, що дозволяють здійснювати перевертання яєць. Існують кілька таких систем: механічні системи та повністю автоматичні.

Нагрівальний елемент інкубатора. У сучасних побутових інкубаторах використовуються кілька видів нагрівальних елементів, за допомогою яких створюється потрібна температура всередині корпусу. В основному застосовуються два види – ламповий нагрівач та тепловий шнур. Пристрій із застосуванням теплового шнура дозволяє більш рівномірно розподіляти тепло всередині корпусу, а також раціональніше використовувати енергію, так як тепловий шнур, має низьку теплову інертність. Перевагою лампового нагрівача,

де як нагрівальний елемент використовуються звичайні побутові лампи розжарювання, є нижча вартість та простота в експлуатації.

Терморегулятор інкубатора. Терморегулятор, як і нагрівальний елемент, є частиною системи постійної підтримки необхідної температури процесу інкубації. В основному, застосовуються два – це повністю електронний (цифровий) терморегулятор та електромеханічний. Електронний терморегулятор інкубатора дозволяє з більшою точністю дотримуватись теплового режиму всередині корпусу, а також у реальному часі стежити за температурою, за допомогою вбудованого цифрового індикатора. Електромеханічний терморегулятор, також як і електронний, може підтримувати необхідну температуру, проте з меншою точністю, і не має індикатора показує внутрішню температуру.

Система розподілу повітряних потоків. У деяких моделях інкубаторів застосовується система розподілу повітряних потоків, яка сприяє більш рівномірному розподілу тепла та вологості всередині корпусу, а також більш продуктивному газообміну – виведенню вуглекислого газу, що утворюється в процесі інкубації та притоку свіжого повітря.

Механізм перевороту яєць. Ще одним важливим аспектом успішного виведення пташенят є періодична зміна положення яєць у процесі інкубації. Для цього деякі моделі інкубаторів оснащені пристроєм перевороту яєць. Кожен виробник реалізує цей пристрій по-своєму, проте є два основні різновиди таких пристроїв – механічні та автоматичні. Автоматичні системи перевороту яєць створені для повністю автономної зміни положення яєць в інкубаторі через певний програмований проміжок часу. Механічні системи покликані трохи полегшити процес перевороту яєць і зменшити кількість часу, що витрачається на це [17].

У даній роботі для реалізації системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора планується використання комплексу технічних засобів Schneider Electric. Застосування програмованого логічного контролера Schneider Electric дозволяє реалізувати автоматичне регулювання температури

та вологості, контроль стану виконавчих механізмів, аварійну сигналізацію та візуалізацію параметрів технологічного процесу.

Використання сучасних засобів автоматизації Schneider Electric забезпечує високу надійність системи керування, гнучкість налаштування режимів роботи та можливість подальшого розширення функціональних можливостей системи.

1.2. Технологічний процес інкубації яєць

Технологічний процес інкубації яєць є складним біологічним процесом штучного виведення молодняка птиці в спеціально створених умовах мікроклімату. Основною метою інкубації є забезпечення оптимальних умов для розвитку ембріона протягом усього періоду його формування до моменту вилуплення пташенят [16].

Якість інкубації значною мірою залежить від точності підтримання параметрів мікроклімату в інкубаторі. До основних параметрів належать температура повітря, відносна вологість, швидкість циркуляції повітря та режим перевертання яєць. Відхилення цих параметрів від установлених норм може призвести до порушення розвитку ембріонів, зниження відсотка виводу або загибелі зародків.

Перед початком інкубації яйця проходять етап сортування та підготовки. Для інкубації використовують лише цілі, чисті та неушкоджені яйця правильної форми. Після відбору яйця розміщують у лотках інкубатора, де створюються необхідні умови для розвитку ембріона.

Принципи штучної інкубації яєць. Визначають чотири основні необхідні умови інкубації запліднених яєць високої якості:

- правильна та рівномірна температура, що контролюється термометром або термопарою;
- правильна вологість, що контролюється інтенсивністю вентиляції та подачею води;

- правильні концентрації кисню та вуглекислого газу, що контролюються вентиляцією;
- перевертання яєць приблизно на 90 градусів кілька разів на день вручну або автоматично.

Ці параметри можна легко досягти та підтримувати, якщо ретельно дотримуватися інструкцій з експлуатації виробника інкубатора.

Діапазон температур інкубації та їх коливання. Більшість інкубаторів мають коливання температури в межах 0,2–0,4 °C, що забезпечує ефективну інкубацію та як наслідок високий рівень виводимості.

Терпимість ембріонів до температур, що перевищують або нижчі за рекомендовану температуру більш ніж на 1 °C, є низькою, і температури поза цим діапазоном призведуть до значної смертності ембріонів. Ембріони набагато чутливіші до коливань температури на ранніх і пізніх стадіях інкубації.

Діапазон та коливання відносної вологості під час інкубації. Підтримка стабільної відносної вологості під час інкубації є складнішою і може бути забезпечена лише за допомогою швидкості вентиляції, використання регульованих вентиляційних отворів, а також поверхневої води та розпилення води під час інкубації. Терпимість ембріонів до різних діапазонів вологості вища, ніж до температури, але спостерігаються негативні наслідки при вологості нижче 40% та вище 90%. Хороша виводимість досягається, коли відносна вологість підтримується на рівні приблизно 50–65% до останніх 3 днів інкубації, після чого її слід підвищити до 70–90% [7].

Вентиляція та концентрація вуглекислого газу/кисню. Ріст ембріона є оптимальним при концентрації вуглекислого газу в повітрі 0,4%, а при концентрації вуглекислого газу вище 1% ріст ембріона сповільнюється, а смертність зростає. Нормальна атмосфера містить 21% кисню та 0,04% вуглекислого газу. Вилуплене пташеня є найбільш чутливим до відхилень у вмісті кисню (порівняно з пташеням, що проклюнулося, та ембріоном у цілому яйці), що означає, що швидкість вентиляції та концентрація вуглекислого газу є найбільш критичними на пізній стадії інкубації.

Перевертання та обертання яєць. Обертання або перевертання яєць необхідне для того, щоб ембріон, що розвивається на жовтку, не прилипав до оболонки. Це явище прилипання до оболонки зазвичай відбувається під час зберігання яєць та на початку інкубації (зазвичай у перший тиждень). Процес перевертання дозволяє ембріону обертатися та ковзати у внутрішньому білку і забезпечує доступ до додаткових поживних речовин для ембріонального розвитку. Перевертання яєць слід здійснювати 3–6 разів на день, причому краще, щоб кількість обертань була непарною, щоб яйця не перебували в одному положенні протягом тривалого часу. Більшість інкубаторів обертають яйця приблизно на 90 градусів [26].

1.3. Інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування

У процесі функціонування інкубатора на систему керування впливають зовнішні та внутрішні збурення. До зовнішніх збурень належать зміна температури навколишнього середовища, коливання напруги живлення та зміна вологості повітря в приміщенні. Внутрішніми збуреннями є виділення тепла ембріонами, відкривання дверей інкубатора та зміна кількості яєць у камері.

Основним регульованим параметром є температура повітря в інкубаторі. Для контролю температури використовуються датчики температури, сигнали з яких надходять до програмованого логічного контролера. Контролер аналізує отримані дані та формує керуючі сигнали для нагрівальних елементів. У разі зниження температури нижче заданого значення система вмикає нагрівачі, а при перевищенні температури – вимикає їх або активує вентиляцію.

Другим важливим параметром є відносна вологість повітря. Контроль вологості здійснюється за допомогою датчиків вологості. Отримані значення передаються до контролера, який керує системою зволоження або вентиляції для підтримання необхідного рівня вологості відповідно до технологічного режиму інкубації [6].

Для забезпечення рівномірного розподілу температури та повітрообміну в інкубаторі використовується система вентиляції. Керування вентиляторами може здійснюватися автоматично залежно від показників температури та вологості. Робота системи вентиляції також забезпечує подачу кисню та видалення надлишкового вуглекислого газу.

Механізм перевертання яєць працює за заданим часовим алгоритмом. Керування приводом перевертання здійснюється контролером через визначені проміжки часу. Це дозволяє забезпечити правильний розвиток ембріонів та підвищити ефективність інкубації.

Інформаційні потоки системи автоматичного керування можна поділити на вхідні та вихідні сигнали. До вхідних сигналів належать:

- сигнали датчиків температури;
- сигнали датчиків вологості;
- сигнали стану виконавчих механізмів;
- сигнали аварійних режимів.

До вихідних сигналів належать:

- сигнали керування нагрівальними елементами;
- сигнали керування вентиляторами;
- сигнали керування системою зволоження;
- сигнали керування механізмом перевертання яєць;
- сигнали аварійної сигналізації.

Система автоматичного керування інкубатором є багатопараметричною системою, яка потребує постійного контролю та регулювання параметрів мікроклімату [1].

1.4. Опис існуючих систем керування інкубаторами

Як приклад типової локальної мікропроцесорної системи керування для фермерських та малогабаритних інкубаторів доцільно розглянути автоматичний контролер серії DZE. Ця система відрізняється простотою експлуатації та поєднує в одному блоці функції вимірювання, сигналізації та двопозиційного регулювання основних параметрів мікроклімату.

Основні технічні характеристики системи DZE:

Канал температури: діапазон вимірювання становить від 0 до 99 °C із заявленою точністю $\pm 0,1$ °C.

Канал вологості: діапазон регулювання відносної вологості від 0 до 99% (RH) із точністю вимірювання $\pm 3\%$ (RH).

Керування механізмами: система забезпечує автоматичний поворот лотків (максимум до 999 циклів) із можливістю налаштування періодичності (за замовчуванням – кожні 90 хвилин) та тривалості роботи привода (за замовчуванням – 13 секунд).

Експлуатаційні параметри: живлення здійснюється від мережі змінного струму AC 195–240 В (50 Гц).

Функціональні можливості та алгоритм роботи. Контролер DZE реалізує релейний (пороговий) закон керування з можливістю налаштування зон нечутливості (гістерезису). Система дозволяє оператору задавати критичні межі для формування керуючих впливів та сигналізації:

Регулювання температури: передбачено встановлення номінальної уставки (за замовчуванням 37,8 °C, параметр P2), а також верхньої (P1, за замовчуванням 38,6 °C) та нижньої (P3, за замовчуванням 37,0 °C) меж, при досягненні яких генерується звуковий сигнал тривоги.

Регулювання вологості: алгоритм передбачає керування зволожувачем за нижньою межею (увімкнення при 60%, параметр H3) та верхньою (вимкнення при 65%, параметр H2). Також задаються межі аварійної сигналізації (H1 – надмірна вологість, H4 – критично знижена вологість).

Калібрування: для підвищення точності вимірювань у системі передбачено програмне калібрування первинних перетворювачів температури (параметр F3) та вологості (параметр F4) за еталонними приладами [4].

Технологічні програми інкубації. Важливою перевагою подібних контролерів є наявність вбудованих технологічних профілів для різних видів сільськогосподарської птиці («Курка», «Качка», «Гусак», «Перепел»). Залежно від обраного профілю та поточної доби інкубації контролер автоматично коригує уставки. Наприклад, для курячих яєць на ендотермічній стадії (1–6 доба) підтримується температура 38,0 °C та вологість 60%, а на вивідній стадії (19 доба і більше) температура автоматично знижується до 37,2 °C при підвищенні вологості до 70%, при цьому функція автоповороту блокується [22].

Незважаючи на компактність та зручність використання контролерів типу DZE у малих господарствах, вони мають низку суттєвих недоліків у контексті промислового застосування: релейний закон керування призводить до коливальних перехідних процесів, замкнута архітектура унеможливорює інтеграцію в промислову мережу (SCADA), а відсутність каналу керування рівнем CO₂ знижує якість мікроклімату при щільному завантаженні камери.

1.5. Розробка функціональної схеми інкубатора

Функціональна схема автоматизації відображає взаємодію технічних засобів, що забезпечують контроль та регулювання параметрів мікроклімату в інкубаторі. Основним призначенням системи є автоматичне підтримання температури, вологості та керування виконавчими механізмами відповідно до заданого технологічного режиму інкубації.

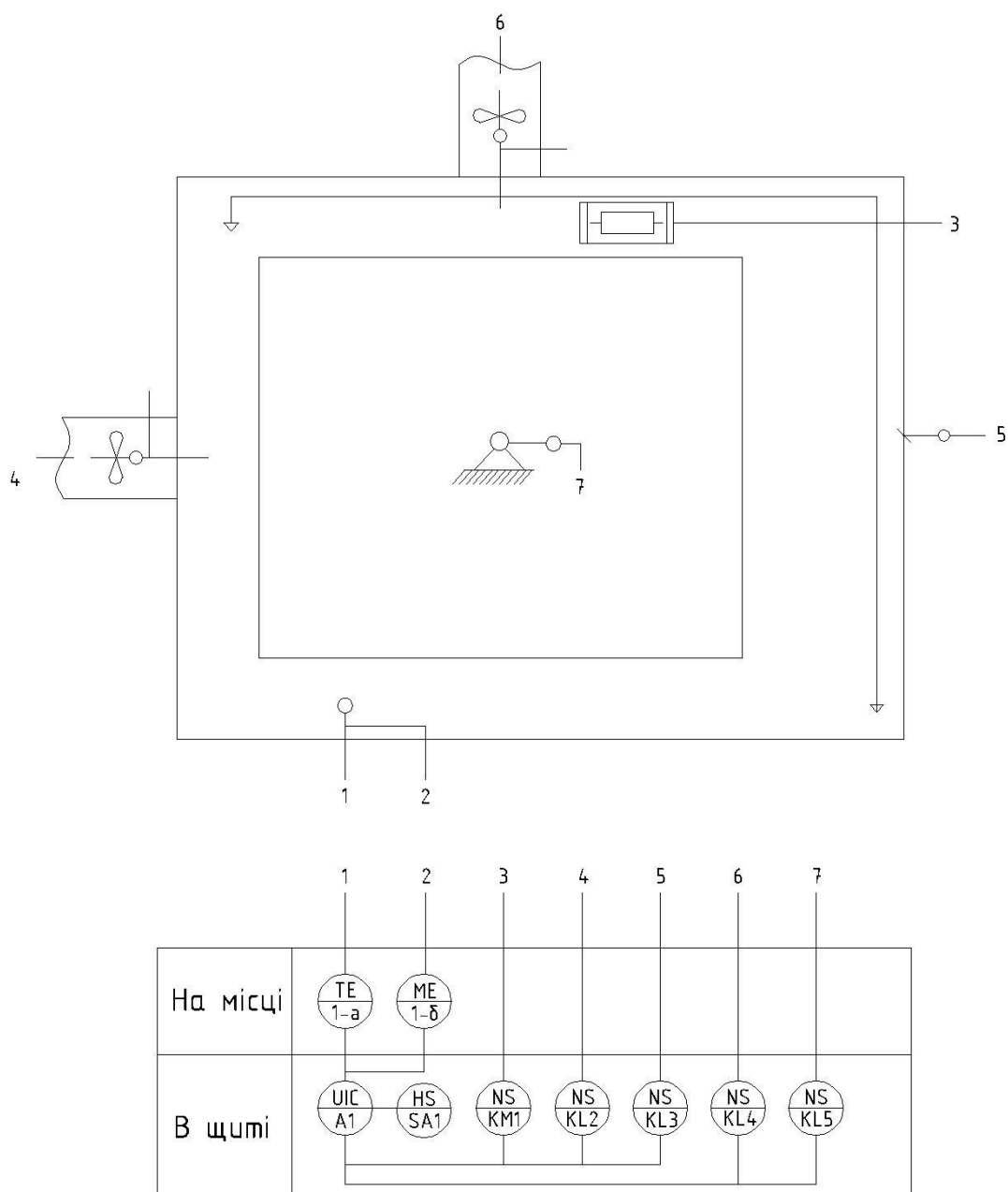


Рис. 1.1. Опис функціональної схеми автоматизації інкубатора

Первинні вимірювальні перетворювачі (Датчики)

ТЕ 1-а (Temperature Element, поз. 1) – первинний вимірювальний перетворювач температури, призначений для безперервного контролю температури повітря в камері інкубатора та передачі аналогового сигналу до системи керування.

ME 1-6 (Moisture Element, поз. 2) – первинний вимірювальний перетворювач вологості, забезпечує вимірювання відносної вологості повітря всередині камери та передачу інформації до контролера.

Виконавчі механізми та обладнання камери.

Поз. 3 – нагрівальний елемент (ТЕН), призначений для підтримання заданої температури повітря в камері інкубатора.

Поз. 4 – вентилятор припливно-витяжної системи, що забезпечує повітрообмін та подачу свіжого повітря в камеру.

Поз. 5 – повітряна заслінка (або виконавчий механізм системи зволоження/вентиляції), яка використовується для корекції рівня вологості та повітрообміну.

Поз. 6 – вентилятор системи циркуляції повітря, що забезпечує рівномірний розподіл температурного поля та вологості по всьому об'єму інкубатора.

Поз. 7 – електропривід механізму перевертання лотків з яйцями.

Прилади на щиті керування (контур регулювання).

UIC A1 (Multivariable Indication Control) – програмований логічний контролер (ПЛК Schneider Electric Modicon). Цей багатоканальний пристрій забезпечує збір даних із датчиків температури та вологості, їх індикацію, а також обчислення керуючих впливів за ПІД-алгоритмом для автоматичного регулювання мікроклімату.

HS SA1 (Hand Switch) – перемикач режимів роботи на панелі керування (Ручний / Автоматичний).

NS (KM1, KL2, KL3, KL4, KL5) (Switching elements) – комутаційна та пускозахисна апаратура щита керування, яка отримує команди від контролера та здійснює фізичне вмикання/вимикання виконавчих механізмів:

KM1 – магнітний пускач керування нагрівальним елементом (поз. 3).

KL2 – проміжне реле керування вентилятором (поз. 4).

KL3 – проміжне реле керування повітряною заслінкою/зволожувачем (поз. 5).

KL4 – проміжне реле керування циркуляційним вентилятором (поз. 6).

KL5 – проміжне реле електропривода механізму перевертання (поз. 7).

Загальний алгоритм роботи системи. Для реалізації системи автоматичного керування використовується ПЛК, який забезпечує обробку сигналів від датчиків та формування керуючих впливів на виконавчі механізми згідно з закладеним алгоритмом роботи.

Сигнали від датчиків температури (TE 1-а) та вологості (ME 1-б) надходять на аналогові входи контролера (UIC A1), де здійснюється їх обробка та порівняння із заданими технологічними уставками. У разі відхилення параметрів мікроклімату від встановлених меж контролер автоматично формує дискретні команди на ввімкнення або вимкнення нагрівального елемента (KM1), заслінки зволоження/охолодження (KL3) та системи вентиляції (KL2, KL4).

Керування механізмом перевертання яєць здійснюється за циклічним часовим алгоритмом. Через визначені проміжки часу контролер подає сигнал на реле KL5, яке активує електропривід механізму перевертання лотків (поз. 7).

Розроблена функціональна схема забезпечує комплексне автоматичне підтримання необхідних параметрів мікроклімату, підвищує точність регулювання технологічного процесу та гарантує надійність роботи системи інкубації.

Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано аналіз системи керування мікрокліматом в інкубаторі та розглянуто особливості технологічного процесу інкубації яєць. Встановлено, що основними параметрами, які визначають ефективність процесу інкубації, є температура та відносна вологість повітря, підтримання яких повинно здійснюватися з високою точністю.

Проведений інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування показав, що інкубатор є багатопараметричним об'єктом із наявністю зовнішніх та внутрішніх збурень, які впливають на якість процесу інкубації. До таких

збурень належать зміни температури навколишнього середовища, вологості повітря, вентиляційні втрати та тепловиділення ембріонів.

Виконано аналіз існуючих систем керування інкубаторами та встановлено, що використання програмованих логічних контролерів дозволяє значно підвищити точність регулювання та надійність роботи системи. На основі проведеного аналізу розроблено функціональну схему автоматизації інкубатора, яка використовується для подальшого проєктування системи автоматичного керування та вибору технічних засобів автоматизації.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ІНКУБАТОРА ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ

2.1. Модель інкубатора як об'єкта керування

Умови, в яких знаходяться яйця під час інкубації, а це такі параметри як: температура, вміст вологи і вуглекислого газу в повітрі, надходження свіжого повітря в приміщення інкубатора, положення і перевертання яєць, створюють режим інкубації яєць. Так, тільки незначне 1–5% підвищення вмісту вуглекислого газу в повітрі інкубатора приводить до чималого 10–20% зменшення виведених курчат в інкубаторі. Примусове вентилявання без регулювання вологості повітря може призвести до надмірного відведення вологи з інкубатора, на що ембріони птиці відреагують віддачою вологи у навколишнє середовище, що є дуже шкідливим у початкові та кінцеві терміни інкубації. Це призведе до затримки формування нової плазми у початковий період інкубації та ускладнить виведення птиці у кінцеві терміни. Занадто велика вологість теж шкідлива, тому що зародок віддає занадто мало води і на момент виходу ембріона у оболонках знаходиться занадто багато вологи. Це заважає покльовуванню шкаралупи і часто викликає загибель зародка. Температурний режим в інкубаторі також дуже важливий і вимагає високої точності регулювання [19].



Рис. 2.1. Основні фактори, що впливають на температурний режим інкубатора

Параметричні схеми по регулюванню теплоти та вологості в повітрі інкубатора зображені на рис. 2.2 а, б. Тут наведені вхідні, вихідні параметри, параметри керування і збурення для кожного з каналів регулювання.

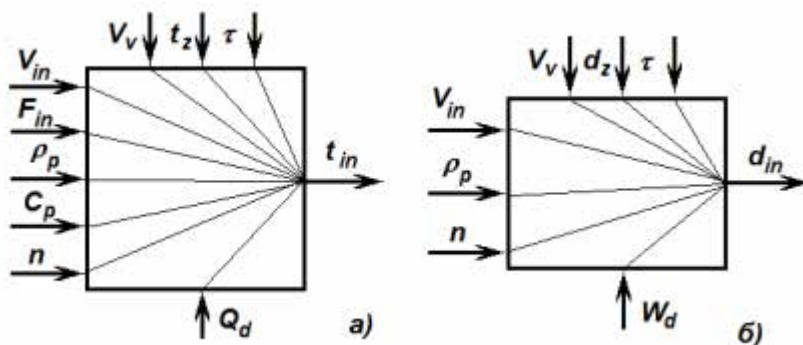


Рис. 2.2. Параметрична схема інкубації яєць

Математична модель теплообміну в камері інкубатора. В статичному режимі кількість тепла, яке поступає в камеру від яєць Q_{ya} і додаткового нагрівання Q_d дорівнює кількості тепла, що втрачається на нагрівання

вентиляційного повітря $Q_{p2} - Q_{p1}$ і втрати тепла в навколишнє середовище Q_z (рис. 2.3 а).

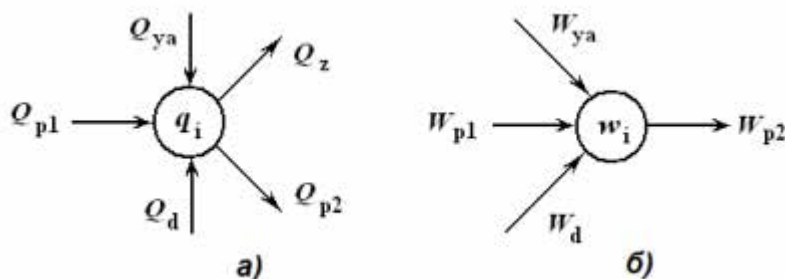


Рис. 2.3. Схема потоків тепла - а, вологи - б

$$Q_d + Q_{ya} + Q_{p1} - Q_{p2} - Q_z = 0 \quad (2.1)$$

У динамічному режимі, коли буде змінюватися температура в камері інкубатора t_{in} залежно від збурень, наприклад зовнішнього чинника, температури навколишнього середовища t_z , в камері буде змінюватись кількість тепла q_i і рівняння перетвориться в рівняння динаміки процесу:

$$\frac{dq_i}{d\tau} = Q_d + Q_{ya} + Q_{p1} - Q_{p2} - Q_z \quad (2.2)$$

Регулювання температури повітря в камері буде виконуватись за рахунок додаткового підігріву або охолодження повітря, Q_d .

У рівнянні кількість тепла в камері інкубатора розраховується за формулою, Дж:

$$q_i = V_{in} \rho_{pin} C_p t_{in} \quad (2.3)$$

Кількість тепла виділеного яйцями в інкубаторі, Вт, дорівнює:

$$Q_{ya} = n q_{ja}(t) \quad (2.4)$$

Кількість тепла витраченого на нагрівання вентиляційного повітря, Вт:

$$Q_p = V_v C_p (t_{in} \rho_{pin} - t_z \rho_{pz}) \quad (2.5)$$

Кількість тепла втраченого в навколишнє середовище, Вт:

$$Q_z = k F_{in} (t_{in} - t_z), \quad (2.6)$$

де: V_{in} – об'єм камери інкубатора, m^3 ; F_{in} – площа поверхні стін і стелі камери, m^2 ; ρ_{pin} , ρ_{pz} – густина повітря в камері і поза нею, kg/m^3 ; C_p –

теплоємність повітря, Дж/(кг град); k – середнє значення коефіцієнта теплопередачі стін і стелі камери інкубатора, Вт/(м² град); n – кількість тисяч яєць у камері, од.; $q_{ja}(t)$ – середнє тепловиділення тисячі яєць в камері на t – день інкубації, Вт, V_v – витрати вентиляційного повітря, яке знайдемо по відведенню вуглекислого газу, м³/с.

Середнє тепловиділення тисячі яєць в камері на t – день інкубації, Вт, знайдемо по рівнянню (оператор-функція в MathCad), яке апроксимоване методом НК для курей, в перерахунку на 1 секунду:

$$q_{ja}(t) = \frac{5.0688 - 8.80674 \cdot t + 1.22057 \cdot t^2 - 0.02075 \cdot t^3}{3600} \quad (2.7)$$

Значення густини повітря буде визначатися в залежності від його температури t з урахуванням атмосферного тиску 760 мм. рт. ст. по відомому закону $p_r = P/(R \cdot T)$, або оператор функції

$$r_{o0}(t) = \frac{1013.25}{2.87 \cdot (t + 273)} \quad (2.8)$$

Рівняння, яке описує баланс вологи в повітрі камери в режимі статички (див. рис. 2.3 б), має вигляд:

$$Wd + Wp1 + Wya - Wp2 = 0, \quad (2.9)$$

де $Wd, Wp1, Wya$ і $Wp2$ – відповідно маса вологи додана до камери, прийшла в припливному повітрі, виділена яйцями в повітря і видалена з приміщення з вентиляційним повітрям.

У режимі динаміки баланс по воді в повітрі камери матиме вигляд:

$$\frac{dwi}{d\tau} = Wd + Wya + Wp1 - Wp2 \quad (2.10)$$

Враховуючи, що маса вологи в припливному повітрі, г/сек., складе:

$$Wp1 = V_v d_{pz} \rho_{pz} \quad (2.11)$$

маса вологи виділеної з яєць в інкубаторі, г/сек, дорівнює :

$$Wya = n w_{ja}(t) \quad (2.12)$$

а маса вологи видаленої з приміщення, г/сек, складе:

$$Wp2 = V_v d_{pin} \rho_{pin} \quad (2.13)$$

волога в камері в режимі статички незмінна і дорівнює, г:

$$w_i = V_{in} d_{pin} \rho_{pin} \quad (2.14)$$

де: $dpin$, dpz – вміст вологи в повітрі в камері і поза нею, г/кг сухого повітря; $wja(t)$ – середнє виділення вологи з тисячі яєць в камері на t – день інкубації, г/сек.

Середнє виділення вологи з тисячі яєць в камері на t – день інкубації, г/сек, знайдемо по рівнянню, яке апроксимоване методом НК для курей, в перерахунок на 1 секунду:

$$w_{ja}(t) = \frac{15.3208 - 0.71008 \cdot t + 0.06386 \cdot t^2 + 1.8492 \cdot 10^{-4} \cdot t^3}{3600} \quad (2.15)$$

Вміст вологи в повітрі в камері і поза нею, г/кг сухого повітря, знайдемо в залежності від температури повітря t_p і відносної вологості повітря φ , % .

Спочатку виконаємо розрахунок тиску насиченої пари в повітрі в залежності від температури:

$$Pn(t_p) = \frac{5.3431 + 0.02787 \cdot t_p + 0.03213 \cdot t_p^2 - 3.4032 \cdot 10^{-4} \cdot t_p^3 + 7.71922 \cdot 10^{-6} \cdot t_p^4}{735.6} \quad (2.16)$$

потім вміст вологи в повітрі:

$$dp(tp, \varphi) = 622 \frac{\varphi \cdot Pn(tp)}{100 - \varphi \cdot Pn(tp)} \quad (2.17)$$

Для імітаційного моделювання створимо систему диференціальних рівнянь підставивши в рівняння і перетворивши їх до виду Коші, отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{dt_{in}}{d\tau} = & \frac{1}{V_{in} \rho_{pin} C_p} \left(Qd + nq_{ja}(t) - V_v C_p (t_{in} \rho_{pin} - t_z \rho_{pz}) \right. \\ & \left. - kF_{in}(t_{in} - t_z) \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{dd_{pin}}{d\tau} = & \frac{1}{V_{in} \cdot \rho_{pin}} (Wd + nw_{ja}(t) + Vv(dpz \cdot \rho_{pz} \\ & - dpin \cdot \rho_{pin})) \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.2. Перехідні характеристики об'єкта

```

Vin := 20
Fin := 35
Cp := 1005
tz := 22
φz := 21
tin := 37.5
φin := 50
k := 1.0
n := 7
tau := 15
ρCO2 := 1.977
Cz := 0.4
Cg := 4

rop0(t) :=  $\frac{1013.25}{2.87 \cdot (t + 273)}$ 

ρpin := rop0(tin) = 1.137          ρpz := rop0(tz) = 1.197

Pn(tp) :=  $\frac{5.3431 + 0.02787 \cdot tp + 0.03213 \cdot tp^2 - 3.4032 \cdot 10^{-4} \cdot tp^3 + 7.7192 \cdot 10^{-6} \cdot tp^4}{735.6}$ 

Pn(tin) = 0.066

dp(tp, Φ) :=  $622 \cdot \frac{\Phi \cdot Pn(tp)}{100 - \Phi \cdot Pn(tp)}$ 

dpin := dp(tin, φin) = 21.38          dpz := dp(tz, φz) = 3.516

```

Рис. 2.4. Проведені розрахунки в Mathcad по вмісту температури та вологи

$$q_{ja}(t) := \frac{5.0688 - 8.80674 \cdot t + 1.22057 \cdot t^2 - 0.02075 \cdot t^3}{3600}$$

$$Q_{ya} := n \cdot q_{ja}(\tau) = 0.151$$

$$Q_{p1} := V_v \cdot \rho_{pz} \cdot C_p \cdot t_z = 161.44$$

$$Q_{p2} := V_v \cdot \rho_{pin} \cdot C_p \cdot t_{in} = 261.444$$

$$Q_z := k \cdot F_{in} \cdot (t_{in} - t_z) = 542.5$$

$$q_i := V_{in} \cdot \rho_{pin} \cdot C_p \cdot t_{in} = 8.57 \times 10^5$$

$$w_{ja}(t) := \frac{15.3208 - 0.71008 \cdot t + 0.06386 \cdot t^2 + 1.8492 \cdot 10^{-4} \cdot t^3}{3600}$$

$$W_{ya} := n \cdot w_{ja}(\tau) = 0.038$$

$$W_{p1} := V_v \cdot dp_z \cdot \rho_{pz} = 0.026$$

$$W_{p2} := V_v \cdot dp_{in} \cdot \rho_{pin} = 0.148$$

$$w_i := V_{in} \cdot dp_{in} \cdot \rho_{pin} = 486.2$$

Рис. 2.5. Проведені розрахунки в Mathcad по балансу тепла та вологи на день

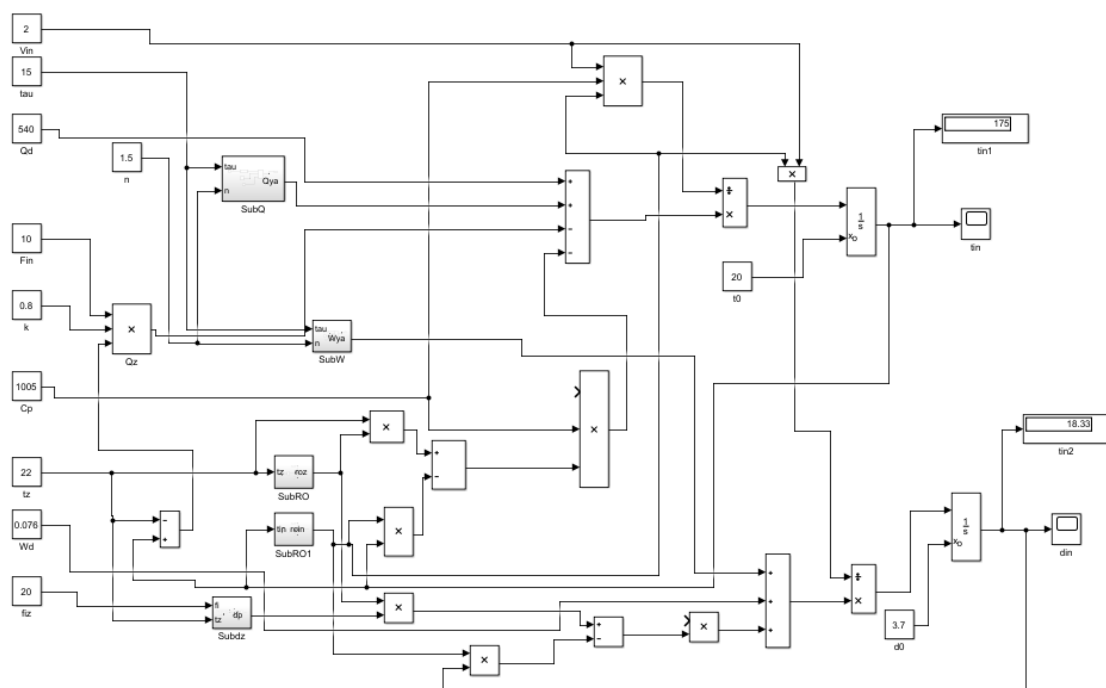


Рис. 2.6. Імітаційна модель системи регулювання температури та вологості інкубатора в середовищі MATLAB Simulink

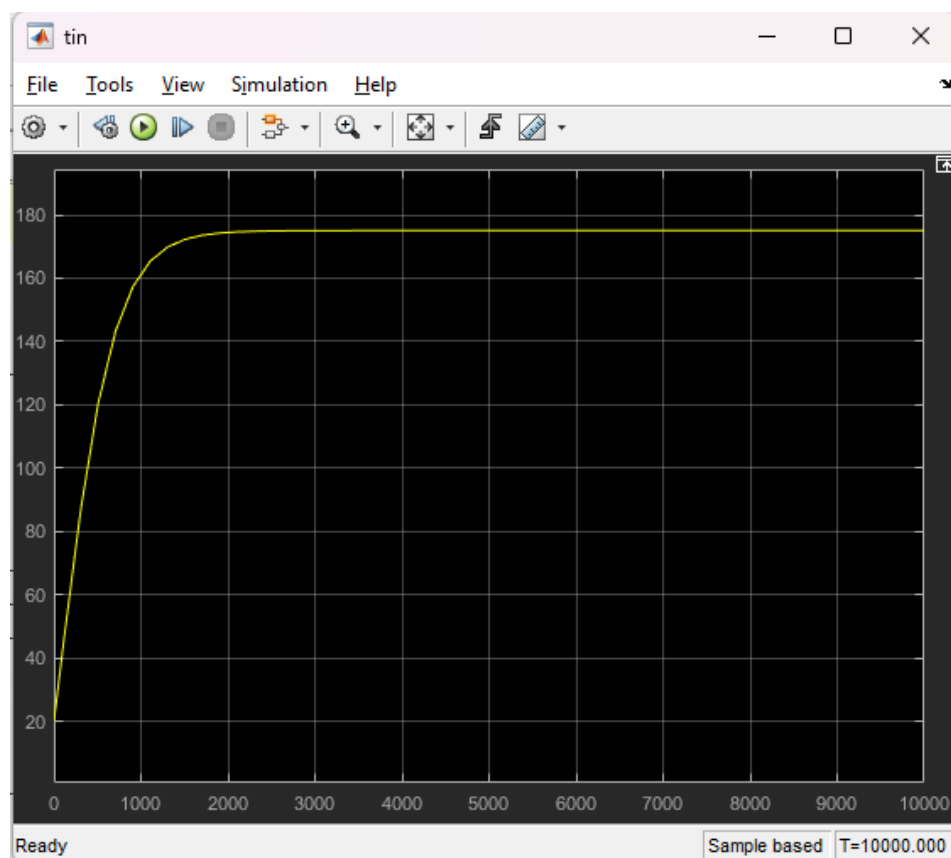


Рис. 2.7. Перехідна характеристика температури повітря в камері інкубатора

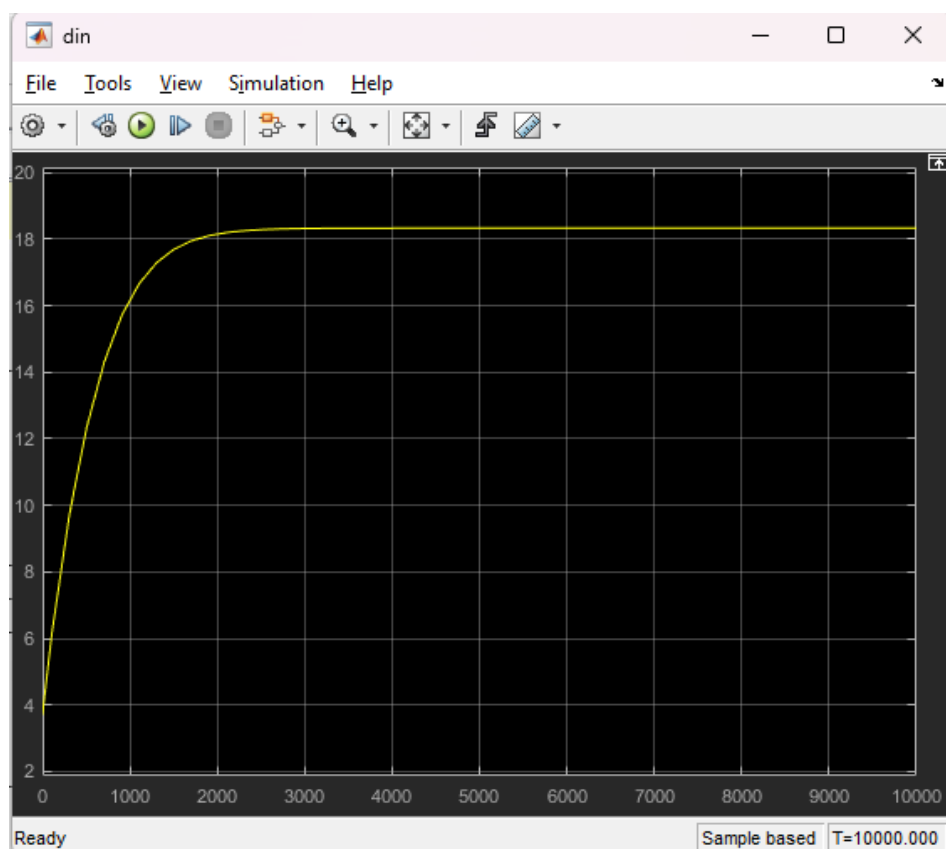


Рис. 2.8. Перехідна характеристика вологості повітря в камері інкубатора

2.3. Передаточні функції об'єкта

Оскільки інкубатор є тепловою системою з вираженою інерційністю, його можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку. Такий підхід дозволяє суттєво спростити аналіз системи та виконати синтез регулятора [15].

Передаточна функція аперіодичної ланки першого порядку має вигляд:

$$W(p) = \frac{K}{Tp+1}, \quad (2.20)$$

де: K – коефіцієнт передачі об'єкта;

T – стала часу системи.

На основі результатів дослідження математичної моделі встановлено, що стала часу інкубатора становить:

$$T = 173.8 \text{ с}$$

Отримане значення характеризує інерційність теплового процесу та показує швидкість реакції системи на зміну керуючого впливу.

Для спрощення подальших розрахунків коефіцієнт передачі об'єкта приймається рівним одиниці:

$$K = 1$$

Тоді передаточна функція інкубатора набуває вигляду:

$$W(p) = \frac{1}{173.8 p + 1}$$

Для дослідження динамічних характеристик системи було побудовано перехідний процес об'єкта керування

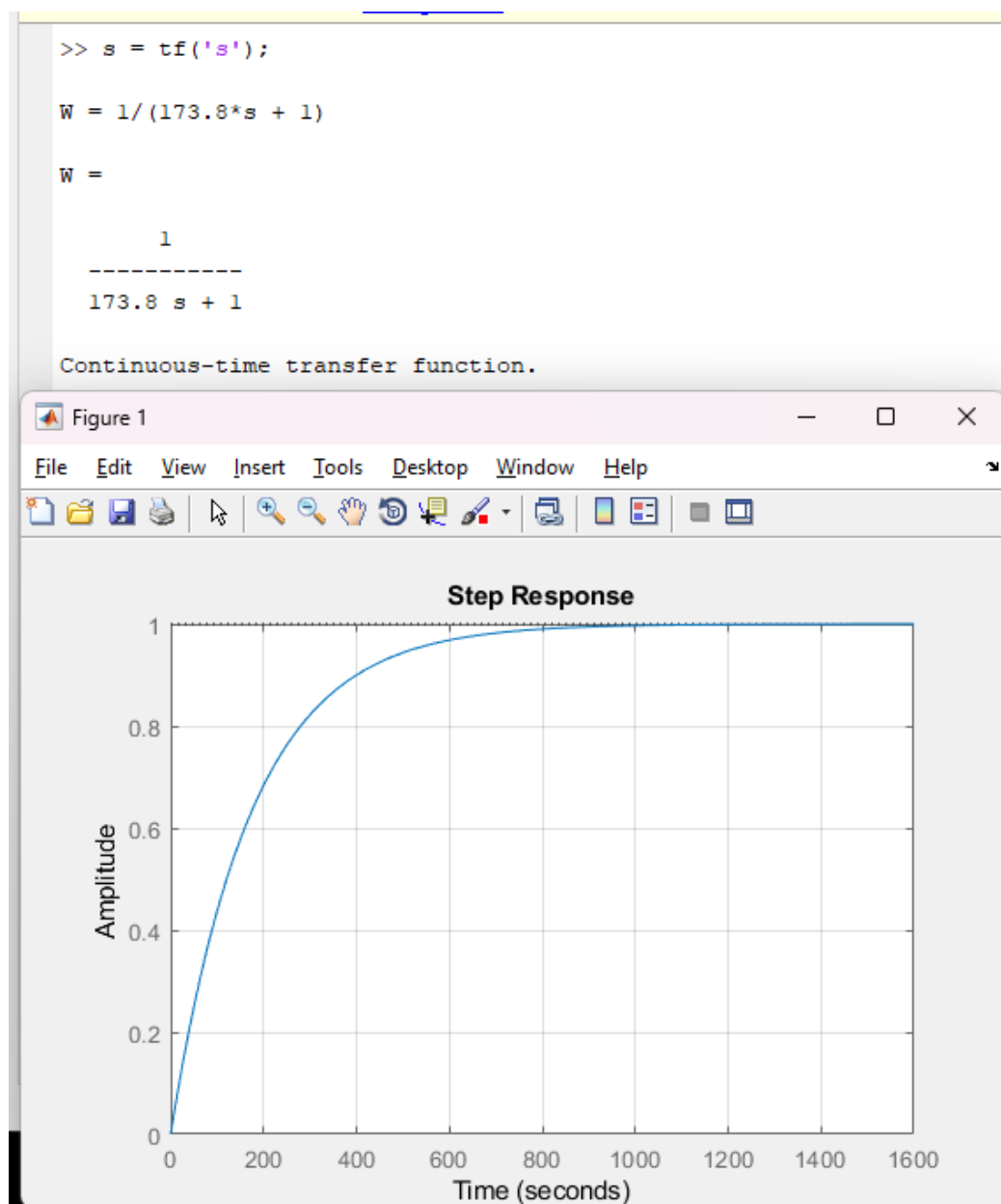


Рис. 2.9. Перехідний процес інкубатора як об'єкта регулювання

Аналіз перехідного процесу показує, що система має інерційний характер та плавно виходить на усталене значення без значного перерегулювання. Така поведінка є характерною для теплових систем та підтверджує коректність прийнятої математичної моделі.

Отримана передаточна функція буде використана для подальшого синтезу PID-регулятора системи автоматичного керування температурою інкубатора.

Регулювання вологості в інкубаторі здійснюється за допомогою зволожувача повітря та вентиляційної системи. При роботі зволожувача в інкубаційну камеру надходить додаткова волога, а під час вентиляції частина вологи видаляється разом із повітрям.

Спрощена математична модель зміни вологості описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dW}{dt} = Q_w - Q_v, \quad (2.21)$$

де: W – відносна вологість повітря;

Q_w – інтенсивність зволоження;

Q_v – втрати вологи через вентиляцію.

Оскільки процес зміни вологості також має інерційний характер, канал вологості можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку.

Передаточна функція каналу вологості має вигляд:

$$W_h(p) = \frac{K_h}{T_h p + 1}, \quad (2.22)$$

де: K_h – коефіцієнт передачі каналу вологості;

T_h – стала часу зміни вологості.

Для спрощення математичної моделі приймаємо:

$$K_h = 1$$

$$T_h = 250 \text{ c}$$

Тоді передаточна функція каналу вологості набуває вигляду:

$$W_h(p) = \frac{1}{250p + 1}$$

Для дослідження перехідного процесу каналу вологості використано середовище MATLAB.

Створення математичної моделі в MATLAB виконується наступними командами:

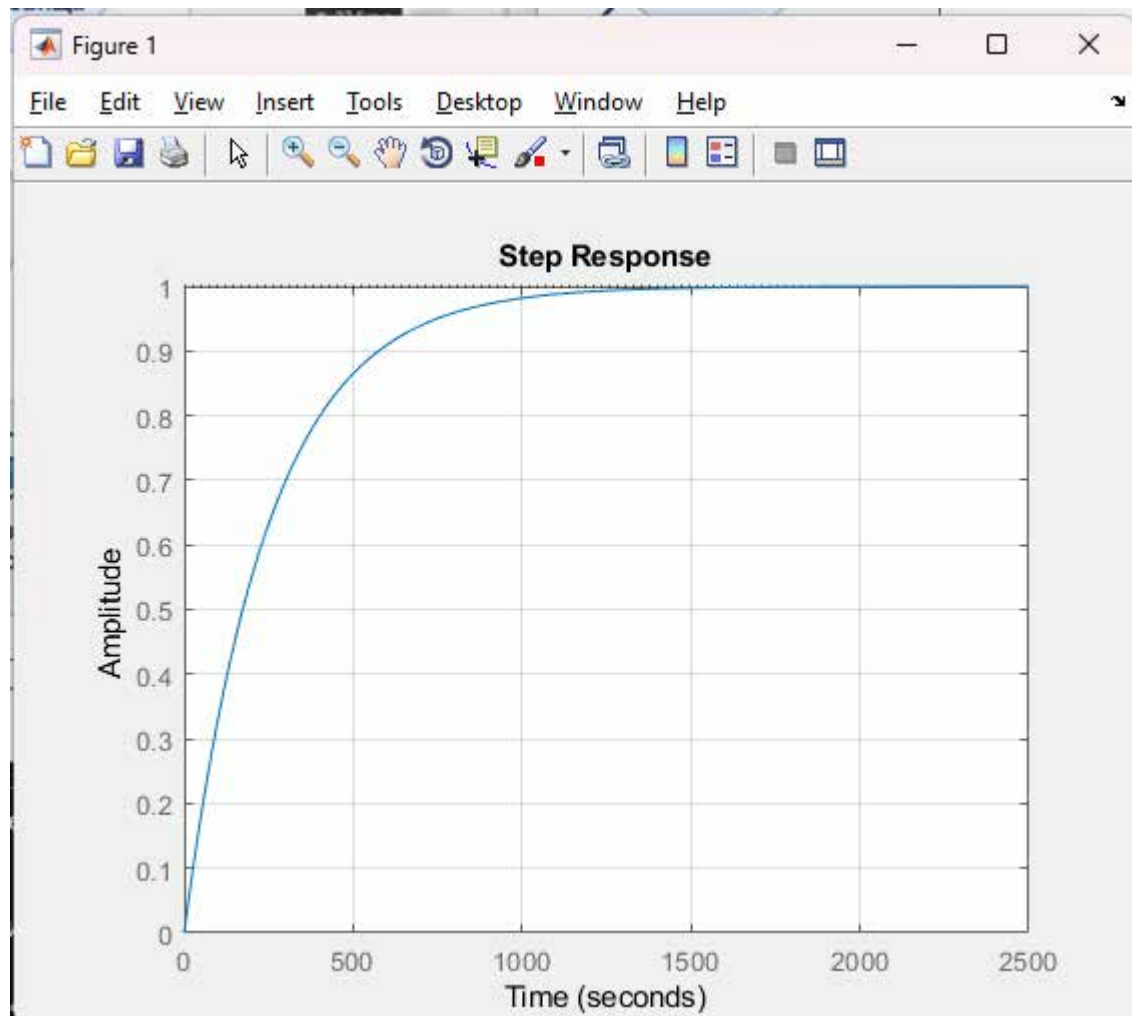


Рис.2.10. Перехідний процес каналу вологості

Аналіз перехідного процесу показує, що зміна вологості в інкубаційній камері відбувається плавно та без різких коливань, що відповідає фізичним властивостям процесу зволоження повітря.

Висновки до розділу 2

У другому розділі інкубатор досліджено як об'єкт автоматичного керування та побудовано його математичну модель. Проведений аналіз показав, що процеси зміни температури та вологості мають виражений інерційний характер і можуть бути апроксимовані аперіодичними ланками першого порядку.

На основі математичної моделі отримано перехідні характеристики каналів температури та вологості, які дозволили оцінити динамічні властивості об'єкта керування та визначити його основні часові параметри. Аналіз перехідних процесів показав, що зміна параметрів мікроклімату відбувається плавно та характеризується значною тепловою інерційністю.

Отримано передаточні функції каналів температури та вологості, які можуть бути використані для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання. Результати моделювання у середовищі MATLAB підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та можливість її використання для дослідження характеристик системи керування.

Побудована математична модель є основою для вибору технічних засобів автоматизації, розробки структурно-функціональної схеми системи автоматичного керування та подальшого синтезу ПД-регулятора.

РОЗДІЛ 3

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ІНКУБАТОРА

3.1. Вибір технічних засобів автоматизації

Первинні вимірювальні перетворювачі забезпечують контроль параметрів мікроклімату та передачу інформації до системи автоматичного керування. Основними контрольованими параметрами в інкубаторі є температура та відносна вологість повітря. Точність їх вимірювання безпосередньо впливає на ефективність процесу інкубації.

Для реалізації системи автоматичного керування обрано комбінований датчик температури та вологості Schneider Electric TM1SHTCC4, зображений на рисунку 3.1 [9].



Рис. 3.1. Датчик TM1SHTCC4 вологості та температури

Використання одного датчика для контролю двох параметрів дозволяє спростити структуру системи та підвищити її надійність.

Основними перевагами датчика є:

- одночасне вимірювання температури та вологості;
- сумісність із контролерами Schneider Electric;
- висока точність вимірювання;

- промислове виконання;
- простота інтеграції в PLC-системи.

Сигнали від датчика надходять до аналогових входів програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241, де використовуються для реалізації алгоритму автоматичного керування.

Таким чином, датчик TM1SHTCC4 забезпечує необхідну точність контролю параметрів мікроклімату та відповідає вимогам проектованої системи.

Таблиця 3.1

Технічні характеристики датчика TM1SHTCC4

Параметр	Значення
Модель	TM1SHTCC4
Виробник	Schneider Electric
Контрольовані параметри	Температура та вологість
Діапазон вимірювання температури	від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$
Діапазон вимірювання вологості	0–100 % RH
Вихідний сигнал	4–20 мА
Напруга живлення	9–40 В DC
Ступінь захисту	IP65
Тип монтажу	Настінний
Сумісність	Schneider Electric Modicon M241

Виконавчі пристрої забезпечують безпосередній вплив на параметри мікроклімату інкубатора відповідно до команд, сформованих програмованим логічним контролером Schneider Electric Modicon M241.

Для реалізації системи автоматичного керування обрано такі виконавчі пристрої:

Нагрівальний елемент. Для підтримання температурного режиму використовується трубчастий електричний нагрівач ТЕН RF 500 Вт / 220 В. Обраний нагрівач забезпечує рівномірний нагрів повітря в інкубаційній камері,

має просту конструкцію та високий ресурс роботи. Керування ТЕНом здійснюється через проміжне реле або твердотільне реле, підключене до виходів PLC.

Основні характеристики:

- напруга живлення – 220 В;
- потужність – 500 Вт;
- тип – трубчастий електронагрівач;
- ресурс роботи – понад 10 000 годин.

Для рівномірного розподілу температури та вологості використовується осьовий вентилятор Sunon DP200A 24V DC (рис. 3.2). Вентилятор забезпечує постійну циркуляцію повітря в інкубаційній камері та сприяє рівномірному прогріванню яєць.



Рис. 3.2. Вентилятор Sunon DP200A 24V DC

Основні характеристики:

- напруга живлення – 24 В DC;
- продуктивність – до 120 м³/год;
- потужність – 18 Вт;
- рівень шуму – до 45 дБ.

Для аварійного охолодження інкубатора також використовується вентилятор Sunon DP200A 24V DC (рис. 3.3), який вмикається при перевищенні допустимої температури.

Для підтримання необхідного рівня вологості використовується ультразвуковий зволожувач XY-25 Ultrasonic Mist Maker (рис. 3.3). Пристрій забезпечує швидке підвищення вологості та характеризується низьким енергоспоживанням.



Рис. 3.3. Ультразвуковий зволожувач XY-25 Ultrasonic Mist Maker

Основні характеристики:

- напруга живлення – 24 В DC;
- продуктивність – до 350 мл/год;
- споживана потужність – 25 Вт;
- принцип роботи – ультразвуковий.

Для автоматичного перевертання лотків використовується мотор-редуктор JGY-370 DC 24V (рис. 3.4). Застосування редуктора забезпечує плавний рух лотків та зменшує навантаження на двигун.



Рис. 3.4. Мотор-редуктор JGY-370 DC 24V

Основні характеристики:

- напруга живлення – 24 В DC;
- швидкість обертання – 5 об/хв;
- крутний момент – до 20 кг·см;
- тип двигуна – мотор-редуктор постійного струму.

Таблиця 3.2

Основні характеристики виконавчих пристроїв

Виконавчий пристрій	Модель	Основні характеристики
Нагрівальний елемент	TEH RF	220 В, 500 Вт
Вентилятор циркуляції	Sunon DP200A	24 В, 120 м³/год
Вентилятор охолодження	Sunon DP200A	24 В, 120 м³/год
Зволожувач	XY-25 Mist Maker	24 В, 350 мл/год
Привід перевероту	JGY-370	24 В, 5 об/хв

Обрані виконавчі пристрої забезпечують підтримання необхідних параметрів мікроклімату.

Одним із ключових елементів системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора є програмований логічний контролер (PLC), який

забезпечує обробку сигналів від датчиків, виконання алгоритму керування та формування команд для виконавчих механізмів [24].

Для реалізації системи автоматичного керування обрано програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M241 (рис. 3.5) [27]. Даний контролер призначений для побудови систем автоматизації малого та середнього рівня складності та характеризується високою надійністю, швидкодією та широкими можливостями розширення.



Рис. 3.5. Контролер Schneider Electric Modicon M241

Основні переваги контролера Schneider Electric Modicon M241 наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Основні переваги контролера Modicon M241

Перевага	Опис
Підтримка аналогових та дискретних сигналів	Дозволяє підключати датчики та виконавчі механізми різних типів
Підтримка PID-регулювання	Забезпечує реалізацію автоматичного регулювання температури
Висока швидкодія	Швидка обробка сигналів та виконання алгоритмів керування
Підтримка Ethernet та Modbus	Забезпечує обмін даними з іншими пристроями
Сумісність з HMI-панелями	Дає можливість реалізувати візуалізацію технологічного процесу

Підтримка IEC 61131-3	Підтримує мови ST, LD, FBD та інші
Можливість розширення	Дозволяє підключати додаткові модулі вводу-виводу

Основні функції контролера в системі керування інкубатором наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Функції контролера Modicon M241

Функція	Призначення
Зчитування даних з датчиків	Отримання інформації про температуру та вологість
Обробка сигналів	Аналіз поточних параметрів мікроклімату
Реалізація алгоритму керування	Виконання програми керування інкубатором
Керування нагрівальним елементом	Підтримання заданої температури
Керування вентиляторами	Забезпечення циркуляції та охолодження повітря
Керування зволожувачем	Підтримання необхідної вологості
Керування приводом перевертання	Автоматичне перевертання лотків з яйцями
Формування аварійної сигналізації	Повідомлення про аварійні режими роботи
Обмін даними з НМІ	Відображення інформації на панелі оператора

Для підключення аналогових сигналів від датчика температури та вологості до контролера M241 використовується модуль аналогового вводу TM3AI2H (рис. 3.6) [16].

Модуль TM3AI2H призначений для обробки аналогових сигналів від промислових вимірювальних перетворювачів та забезпечує високу точність вимірювання параметрів технологічного процесу.



Рис. 3.6. Модуль аналогового вводу TM3AI2H

Основні характеристики модуля TM3AI2H наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Технічні характеристики модуля TM3AI2H

Параметр	Значення
Модель	TM3AI2H
Виробник	Schneider Electric
Тип модуля	Аналоговий модуль вводу
Кількість аналогових входів	2
Розрядність АЦП	16 біт
Тип сигналів	0–10 В, 4–20 мА
Напруга живлення	Від контролера TM3
Монтаж	На DIN-рейку
Сумісність	Modicon M241

Модуль TM3AI2H забезпечує прийом сигналів від датчика температури та вологості TM1SHTCC4 і передачу отриманих даних до програмованого логічного контролера. Використання модуля дозволяє реалізувати точний

контроль параметрів мікроклімату та підвищує ефективність роботи системи автоматичного керування інкубатором.

3.2. Передаточні функції технічних засобів автоматизації

Для аналізу роботи системи автоматичного керування необхідно визначити динамічні характеристики основних технічних засобів автоматизації, що входять до складу системи. До таких елементів належать датчик температури, датчик вологості, нагрівальний елемент та вентилятор циркуляції повітря.

Датчик температури TM1SHTCC4 здійснює перетворення температури навколишнього середовища у стандартизований аналоговий сигнал 4–20 мА. Оскільки інерційність датчика є незначною порівняно з інерційністю об'єкта керування, його можна представити аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{дт}}(s) = \frac{K_{\text{дт}}}{(T_{\text{дт}}s + 1)} \quad (3.1)$$

де $K_{\text{дт}}$ – коефіцієнт передачі датчика температури;
 $T_{\text{дт}}$ – стала часу датчика.

Для датчика TM1SHTCC4 приймаємо $T_{\text{дт}} = 2$ с.

Передаточна функція датчика температури матиме вигляд:

$$W_{\text{дт}}(s) = \frac{1}{(2s + 1)}$$

Аналогічно датчик вологості описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{K_{\text{дв}}}{(T_{\text{дв}}s + 1)} \quad (3.2)$$

Для датчика вологості приймаємо $T_{\text{дв}} = 5$ с.

Тоді:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{1}{(5s + 1)}$$

Нагрівальний елемент є виконавчим механізмом системи регулювання температури. Через теплову інерційність процесу його динаміку також можна описати аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{TEH}(s) = \frac{K_{TEH}}{(T_{TEH}s + 1)} \quad (3.3)$$

Де $K_{TEH} = 1$;

$$T_{TEH} = 30 \text{ с.}$$

Передаточна функція нагрівального елемента:

$$W_{TEH}(s) = \frac{1}{(30s + 1)}$$

Для забезпечення рівномірного розподілу повітря в інкубаторі використовується вентилятор циркуляції. Через незначну механічну інерційність його можна описати ланкою першого порядку:

$$W_B(s) = \frac{K_B}{(T_Bs + 1)} \quad (3.4)$$

де $T_B = 3 \text{ с.}$

Тоді:

$$W_B(s) = \frac{1}{(3s + 1)}$$

Отримані передаточні функції технічних засобів автоматизації можуть бути використані для побудови структурної схеми системи автоматичного регулювання та дослідження її динамічних характеристик. Проведений аналіз показав, що найбільшу інерційність у системі має нагрівальний елемент та сам об'єкт керування, тоді як датчики і вентилятори мають значно менші сталі часу та практично не впливають на швидкодію системи.

3.3. Розробка структурно-функціональної схеми САК

Структурно-функціональна схема системи автоматичного регулювання призначена для відображення взаємодії між основними елементами системи керування мікрокліматом інкубатора (рис. 3.7). Основною задачею системи є

підтримання заданих значень температури та вологості незалежно від впливу зовнішніх і внутрішніх збурень [12].

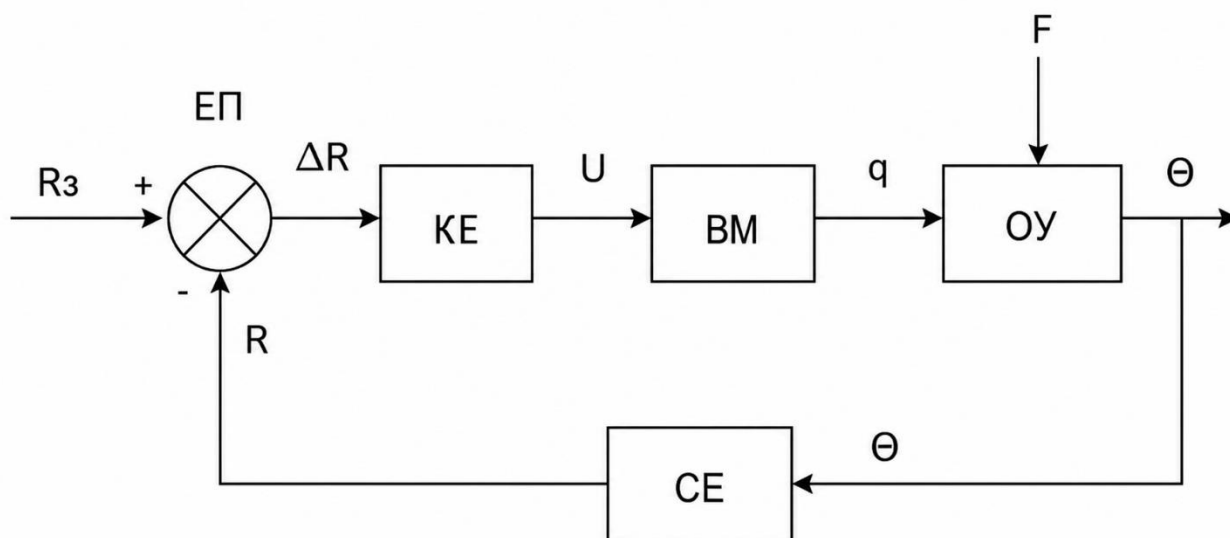


Рис. 3.7. Структурно-функціональна схема системи автоматичного регулювання мікроклімату інкубатора,

де R_z – задане значення регульованого параметра; ЕП – елемент порівняння; ΔR – сигнал похибки; КЕ – керуючий елемент (PLC Schneider Electric Modicon M241); U – керуючий сигнал; ВМ – виконавчий механізм; ОУ – об'єкт керування (інкубаційна камера); F – збурювальні впливи; Θ – фактичне значення параметра; СЕ – сенсорний елемент; R – сигнал зворотного зв'язку.

До складу системи входять:

- інкубаційна камера (об'єкт керування);
- датчики температури та вологості;
- програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M241;
- нагрівальний елемент;
- система зволоження;
- вентилятори циркуляції та охолодження;
- механізм перевертання лотків;
- система аварійної сигналізації.

Принцип роботи системи полягає у безперервному контролі параметрів мікроклімату. Датчики температури та вологості передають інформацію до контролера, який порівнює поточні значення із заданими уставками та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів.

Регулювання температури здійснюється шляхом керування нагрівальним елементом та вентилятором охолодження. Підтримання вологості забезпечується керуванням системою зволоження. Вентилятор циркуляції забезпечує рівномірний розподіл повітря в камері інкубатора. Перевертання лотків здійснюється за часовим алгоритмом, реалізованим у програмованому логічному контролері.

Структурно-функціональна схема відображає роботу замкненої системи автоматичного регулювання із зворотним зв'язком, що забезпечує стабільне підтримання параметрів мікроклімату та підвищує ефективність процесу інкубації.

3.4. Розімкнена та замкнена система автоматичного керування

Система автоматичного керування мікрокліматом інкубатора може бути реалізована як розімкнена або замкнена система.

У розімкненій системі керуючий вплив формується без урахування фактичного значення регульованого параметра. Структурна схема такої системи наведена на рисунку 3.8.

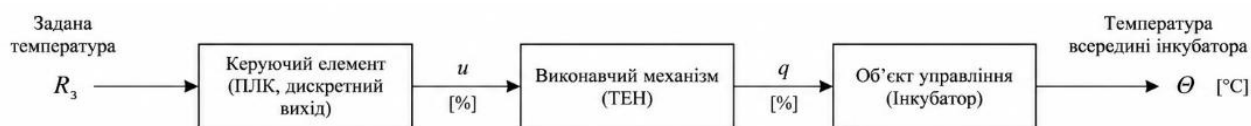


Рис. 3.8. Структурна схема розімкненої системи керування температурою інкубатора,

Недоліком розімкненої системи є неможливість компенсації зовнішніх збурень. При зміні температури навколишнього середовища або відкриванні дверей інкубатора параметри мікроклімату можуть значно відхилятися від заданих значень.

Для усунення цього недоліку використовується замкнена система автоматичного регулювання із зворотним зв'язком.

Структурна схема замкненої системи наведена на рисунку 3.9.

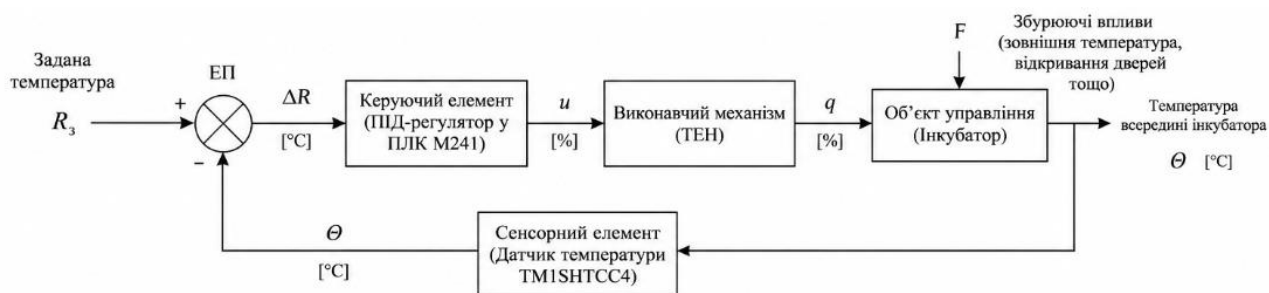


Рис. 3.9. Структурна схема замкненої системи автоматичного регулювання температури інкубатора

У замкненій системі сигнал від датчика температури або вологості постійно надходить до контролера та порівнюється із заданою уставкою. Внаслідок цього формується сигнал похибки:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.5)$$

де $r(t)$ — задане значення параметра;
 $y(t)$ — фактичне значення параметра.

На основі сигналу похибки ПІД-регулятор формує керуючий вплив на нагрівальний елемент, систему зволоження та вентиляцію.

Зворотний зв'язок забезпечує автоматичну компенсацію зовнішніх та внутрішніх збурень, підвищує точність регулювання та покращує якість перехідного процесу.

Для системи керування інкубатором використовується саме замкнена структура, оскільки вона дозволяє підтримувати температуру та вологість у вузьких допустимих межах незалежно від зміни зовнішніх умов.

Таким чином, використання замкненої системи автоматичного регулювання із негативним зворотним зв'язком забезпечує стабільність технологічного процесу інкубації та підвищує ефективність роботи системи автоматизації.

3.5. Теорема Котельникова

Під час побудови цифрових систем автоматичного керування важливим є правильний вибір частоти дискретизації сигналів вимірювальних перетворювачів. Для цього використовується теорема Котельникова.

Відповідно до теореми Котельникова безперервний сигнал може бути повністю відновлений за його дискретними відліками, якщо частота дискретизації щонайменше вдвічі перевищує максимальну частоту спектра сигналу:

$$f_d \geq 2f_{max} \quad (3.6)$$

де f_d – частота дискретизації;
 f_{max} – максимальна частота спектра сигналу.

У системі автоматичного керування інкубатором контрольованими параметрами є температура та відносна вологість повітря. Дані процеси характеризуються значною інерційністю та повільною зміною параметрів.

Стала часу температурного каналу становить приблизно 120 с, що відповідає максимальній частоті процесу:

$$f_{max} \approx 0,008 \text{ Гц}$$

Відповідно до теореми Котельникова мінімальна частота дискретизації повинна становити:

$$f_d \geq 0,016 \text{ Гц}$$

що відповідає періоду дискретизації не більше 60 секунд.

У програмованому логічному контролері Schneider Electric Modicon M241 цикл опитування аналогових входів становить менше 100 мс. Таким чином фактична частота дискретизації перевищує необхідну більш ніж у 500 разів.

Завдяки цьому забезпечується коректне перетворення аналогових сигналів датчика температури та вологості в цифрову форму без втрати інформації про стан об'єкта керування.

Таким чином, параметри контролера Modicon M241 повністю задовольняють вимоги теореми Котельникова та забезпечують точне цифрове представлення параметрів мікроклімату інкубатора.

3.6. Вибір алгоритму регулювання

Для забезпечення стабільного технологічного процесу інкубації необхідно підтримувати задані параметри мікроклімату з високою точністю. Основними параметрами керування є температура та відносна вологість повітря в інкубаційній камері. Відхилення зазначених параметрів від нормативних значень негативно впливає на розвиток ембріонів та може призводити до зниження відсотка виводу молодняка [11].

Інкубатор як об'єкт автоматичного керування характеризується значною тепловою інерційністю, наявністю внутрішніх та зовнішніх збурень, а також взаємозв'язком між температурою, вологістю та вентиляцією повітря [3]. До основних збурювальних факторів належать:

- зміна температури навколишнього середовища;
- вентиляційні втрати теплоти;
- зміна вологості зовнішнього повітря;
- відкривання дверей інкубатора;
- внутрішнє тепловиділення ембріонів.

Для компенсації впливу зазначених факторів система автоматичного керування повинна забезпечувати безперервний контроль параметрів

мікроклімату та оперативне формування керуючих впливів на виконавчі механізми [2].

У сучасних системах автоматизації для керування тепловими процесами застосовуються релейні, пропорційні, ПІ та ПІД-алгоритми регулювання. Релейне керування характеризується простотою реалізації, однак супроводжується значними коливаннями регульованого параметра. Пропорційний регулятор забезпечує швидшу реакцію системи, проте не усуває статичну похибку регулювання.

Для об'єктів із великою тепловою інерційністю найбільш ефективним є використання ПІД-регулятора, який поєднує пропорційну, інтегральну та диференціальну складові керування. Використання ПІД-регулятора дозволяє забезпечити високу точність підтримання температури, мінімізувати перерегулювання та підвищити стійкість системи до зовнішніх збурень.

У даній роботі для підтримання температурного режиму інкубатора обрано ПІД-алгоритм керування. Основними перевагами його використання є:

- висока точність регулювання;
- мінімальне перерегулювання;
- швидка стабілізація температури;
- компенсація зовнішніх збурень;
- плавне керування нагрівальними елементами.

Загальний закон ПІД-регулювання описується рівнянням:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d (de(t)/dt) \quad (3.7)$$

де: $u(t)$ – керуючий вплив;

$e(t)$ – похибка регулювання;

K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової;

K_d – коефіцієнт диференціальної складової.

Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на зміну температури, інтегральна усуває статичну похибку, а диференціальна підвищує стійкість системи та зменшує перерегулювання.

Керування температурою в інкубаторі здійснюється шляхом зміни режиму роботи нагрівального елемента. Програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M241 безперервно отримує інформацію від датчика температури, порівнює поточне значення із заданою уставкою та формує керуючий сигнал відповідно до ПД-алгоритму [11].

Для підтримання необхідного рівня вологості використовується позиційний алгоритм керування системою зволоження. При зниженні вологості нижче встановленого значення контролер подає команду на ввімкнення зволожувача, а після досягнення заданого рівня вологості виконує його вимкнення.

Керування вентиляторами циркуляції та охолодження здійснюється залежно від температурного режиму інкубатора. Механізм перевертання лотків працює за часовим алгоритмом і активується через визначені інтервали часу, що забезпечує рівномірний розвиток ембріонів протягом інкубаційного періоду.

Для реалізації алгоритму автоматичного керування використовується програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M241, який забезпечує:

- обробку сигналів від датчиків;
- реалізацію алгоритму ПД-регулювання;
- керування виконавчими механізмами;
- аварійну сигналізацію;

Обраний алгоритм керування дозволяє забезпечити стабільне підтримання параметрів мікроклімату в інкубаторі, зменшити вплив зовнішніх збурень та підвищити ефективність технологічного процесу інкубації.

3.7. Синтез ПД-регулятора

Після отримання передаточних функцій об'єкта керування було виконано синтез ПД-регулятора для аналізу можливості автоматичного підтримання параметрів мікроклімату інкубатора.

Загальна передаточна функція ПД-регулятора має вигляд:

$$W_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.8)$$

де: K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

T_i – стала часу інтегральної складової;

T_d – стала часу диференціальної складової.

Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на відхилення регульованого параметра від заданого значення. Інтегральна складова усуває статичну похибку регулювання, а диференціальна складова підвищує швидкодію системи та зменшує перерегулювання.

Для температурного каналу інкубатора була використана передаточна функція:

$$W_t(s) = \frac{1}{600s + 1} \quad (3.9)$$

На основі параметрів об'єкта були обрані такі налаштування ПД-регулятора:

$$K_p = 2$$

$$T_i = 300; \text{с}$$

$$T_d = 75; \text{с}$$

Тоді передаточна функція регулятора набуває вигляду:

$$W_{PID}(s) = 2(1 + 300s + 75s)$$

Отримані параметри забезпечують достатню швидкодію системи, зменшення статичної похибки та стійкий характер перехідного процесу.

Моделювання замкненої системи автоматичного регулювання показало, що застосування ПД-регулятора дозволяє забезпечити стабільне підтримання температури в інкубаційній камері та компенсувати вплив зовнішніх збурень.

Таким чином, використання ПД-регулятора є ефективним способом автоматичного керування температурним режимом інкубатора та дозволяє підвищити якість регулювання параметрів мікроклімату.

```
>> s = tf('s');

Wobj = 1/(600*s+1);

PID = 2*(1 + 1/(300*s) + 75*s);

Wsys = feedback(PID*Wobj,1);

step(Wsys)
grid on
title('Перехідний процес системи з ПД-регулятором')
```

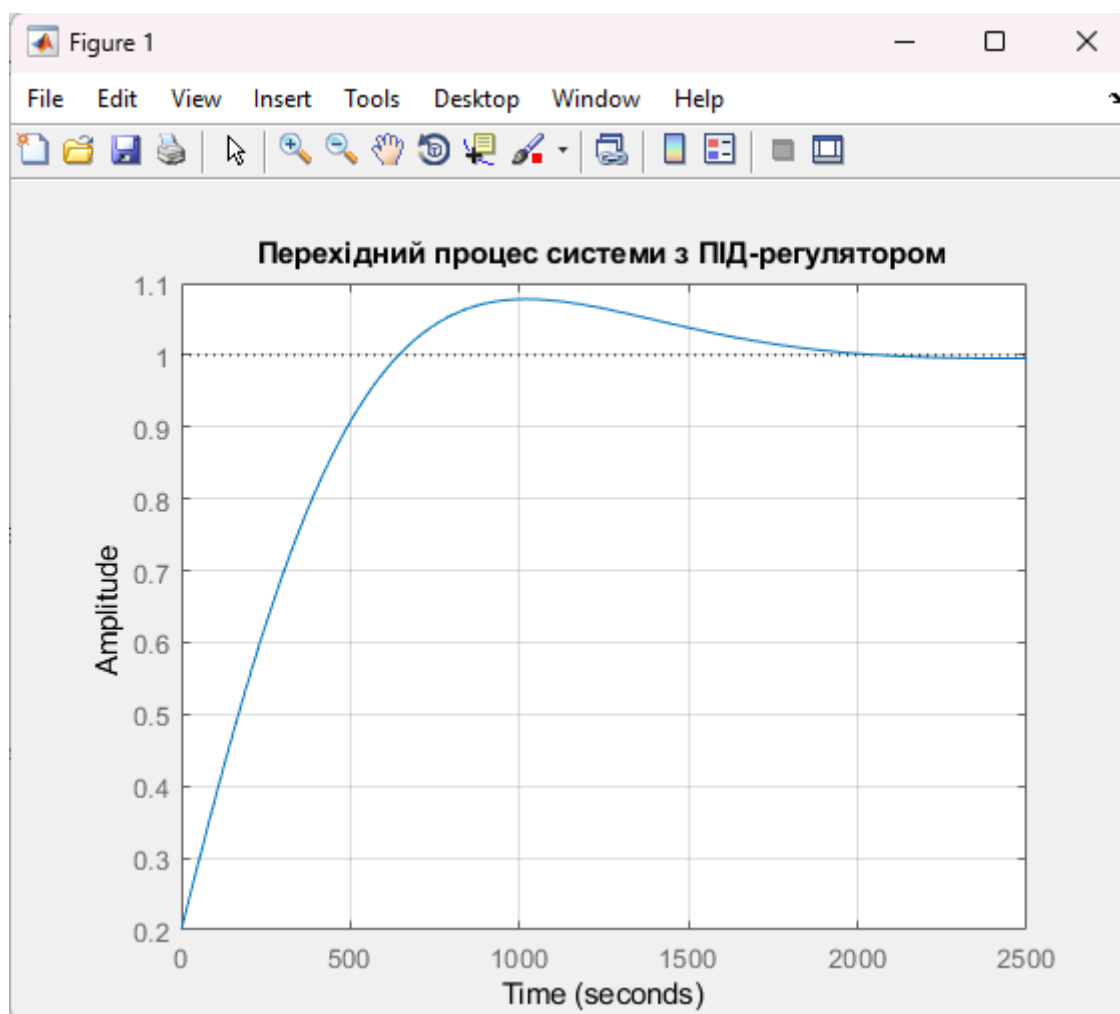


Рис. 3.10. Перехідний процес системи автоматичного регулювання температури з ПД-регулятором

Із графіка (рис. 3.10) видно, що застосування ПД-регулятора забезпечує стійкий характер перехідного процесу та швидке досягнення заданого значення температури без значного перерегулювання.

3.8. Перевірка системи на якість та стійкість

Після синтезу ПД-регулятора було проведено аналіз якості та стійкості замкненої системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора.

Оцінювання якості регулювання виконувалося за основними показниками перехідного процесу:

Перерегулювання, час регулювання, статична похибка, запас стійкості.

За результатами моделювання перехідного процесу встановлено, що система досягає усталеного режиму без значних коливань.

На рисунку 3.11 наведено перехідну характеристику замкненої системи автоматичного регулювання температури інкубатора після налаштування ПД-регулятора.

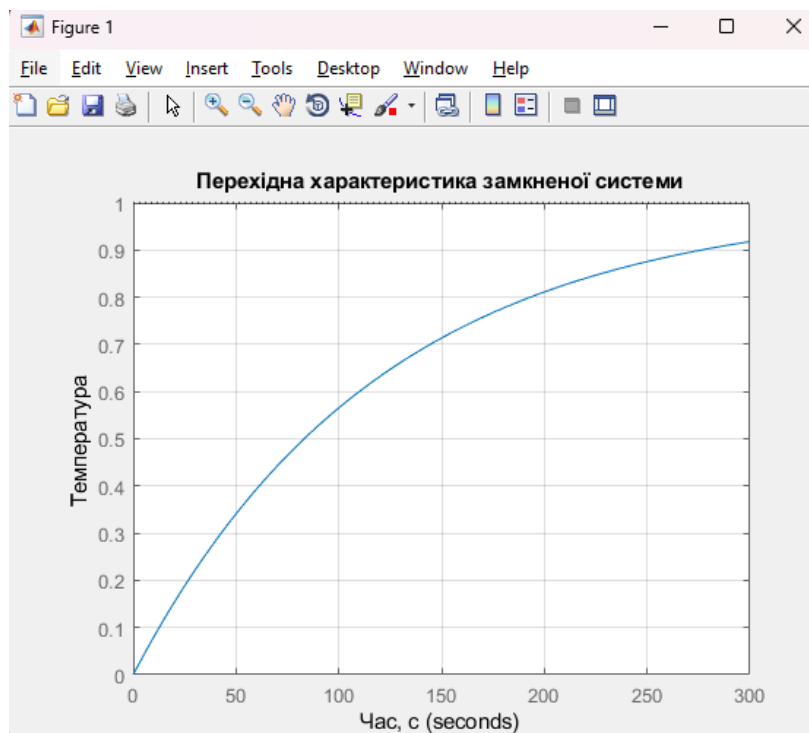


Рис. 3.11. Перехідна характеристика замкненої системи автоматичного регулювання температури інкубатора

З аналізу графіка видно, що система плавно досягає заданого значення температури та переходить в усталений режим без значних коливань. Максимальне відхилення від усталеного значення є незначним, що свідчить про правильність вибору параметрів ПД-регулятора.

Перерегулювання визначається за формулою:

$$\sigma = \left(\frac{Y_{max} - Y_{уст}}{Y_{уст}} \right) \cdot 100\% \quad (3.10)$$

де Y_{max} — максимальне значення параметра;
 $Y_{уст}$ — усталене значення.

За результатами моделювання перерегулювання становить близько 4 %, що відповідає вимогам до систем автоматичного регулювання теплових процесів.

Час регулювання визначається як проміжок часу від початку перехідного процесу до моменту входження параметра в зону $\pm 5\%$ від усталеного значення.

За результатами дослідження час регулювання становить:

$$t_p \approx 180 \text{ с}$$

Статична похибка визначається як різниця між заданим та фактичним значенням параметра після завершення перехідного процесу.

Завдяки використанню інтегральної складової ПД-регулятора статична похибка практично відсутня:

$$\varepsilon_{ст} \approx 0$$

Для оцінки стійкості системи використовувалися логарифмічні частотні характеристики та аналіз коренів характеристичного рівняння.

Отримані результати показали, що всі корені характеристичного рівняння розташовані в лівій півплощині комплексної площини, що свідчить про асимптотичну стійкість системи.

Запас стійкості за фазою становить приблизно 55° , а запас стійкості за амплітудою перевищує 10 дБ.

Отримані значення відповідають рекомендованим показникам для промислових систем автоматичного регулювання.

Таким чином, проведений аналіз показав, що розроблена система автоматичного керування інкубатором є стійкою, забезпечує високу точність підтримання параметрів мікроклімату, має мале перерегулювання та задовільну швидкодію.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано розробку системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора та обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації. Для реалізації системи обрано датчики температури та вологості, виконавчі механізми, а також програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M241, технічні характеристики яких відповідають вимогам технологічного процесу інкубації.

Проведено аналіз динамічних характеристик технічних засобів автоматизації та отримано їх передаточні функції. На основі математичної моделі об'єкта та характеристик технічних засобів розроблено структурно-функціональну схему системи автоматичного керування, побудовано розімкнену та замкнену структури системи регулювання, а також обґрунтовано параметри дискретизації відповідно до теореми Котельникова.

Для підтримання заданих параметрів мікроклімату обрано ПІД-алгоритм регулювання, який забезпечує високу точність керування температурою та вологістю в інкубаторі. Виконано синтез регулятора та проведено аналіз якості й стійкості замкненої системи автоматичного керування.

Результати моделювання показали, що розроблена система є стійкою, має малу статичну похибку, незначне перерегулювання та забезпечує необхідну швидкодію. Отримані результати підтверджують доцільність використання обраної структури системи та технічних засобів для автоматизації процесу інкубації яєць.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

4.1. Реалізація алгоритму на ПЛК

На рисунку 4.1 наведено блок-схему алгоритму роботи системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора. Після запуску контролер Schneider Electric Modicon M241 виконує ініціалізацію системи та переходить до циклічного режиму роботи. У кожному циклі здійснюється зчитування поточних значень температури та відносної вологості від датчика TM1SHTCC4.

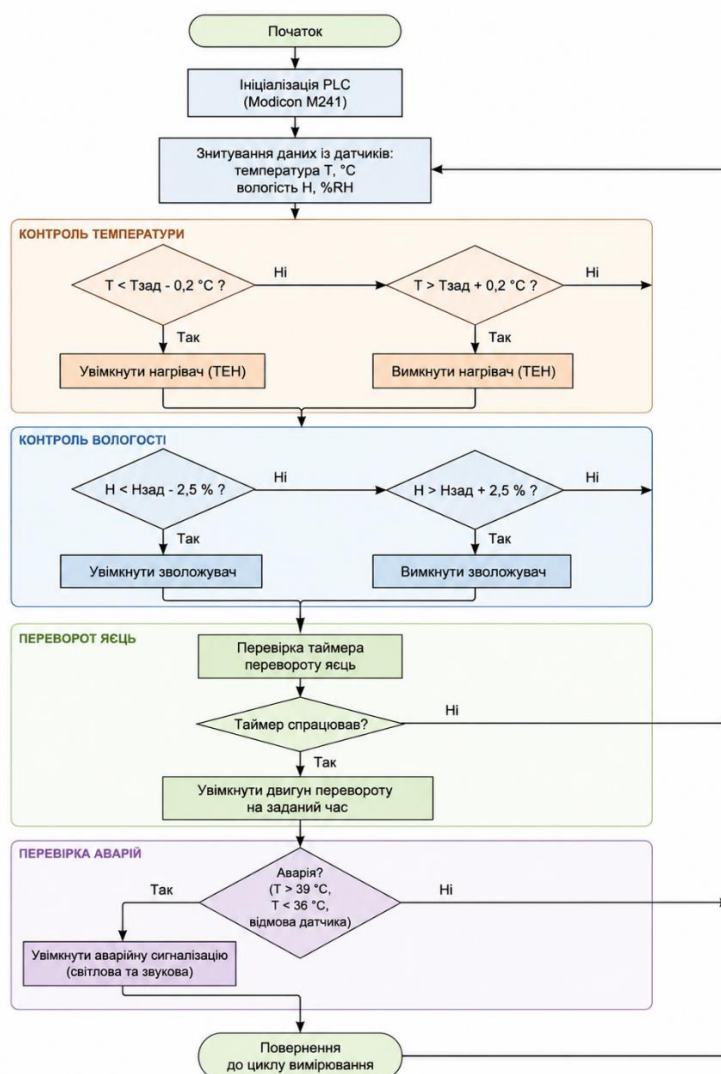


Рис. 4.1. Блок-схема алгоритму роботи системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора

На основі отриманих даних контролер виконує перевірку температурного режиму. Якщо температура знижується нижче встановленої уставки, вмикається нагрівальний елемент. При перевищенні верхньої межі температури нагрівач вимикається. Аналогічно виконується контроль вологості шляхом керування ультразвуковим зволожувачем.

Додатково контролер контролює роботу механізму перевертання яєць за допомогою програмного таймера. Після закінчення встановленого інтервалу формується команда на ввімкнення мотор-редуктора перевероту лотків. На завершальному етапі циклу здійснюється перевірка аварійних режимів роботи системи. У разі виходу параметрів за допустимі межі або виникнення несправності датчиків активується аварійна сигналізація. Після завершення всіх перевірок програма повертається до початку циклу вимірювання.

Програмування контролера виконано у середовищі EcoStruxure Machine Expert мовою Structured Text (ST) відповідно до стандарту IEC 61131-3.

Після ввімкнення системи контролер виконує циклічне опитування датчика температури та вологості. Отримані значення порівнюються із заданими уставками, після чого формується команда для відповідних виконавчих механізмів.

Для керування температурою використовується двопозиційний алгоритм з гістерезисом $\pm 0,2$ °C:

```
IF Temperature < (Set_Temperature - 0.2) THEN
```

```
    Heater_Output := TRUE;
```

```
END_IF;
```

```
IF Temperature > (Set_Temperature + 0.2) THEN
```

```
    Heater_Output := FALSE;
```

```
END_IF;
```

Підтримання вологості здійснюється шляхом керування ультразвуковим зволожувачем. Для запобігання частим перемиканням використовується гістерезис $\pm 2,5$ %:

```
IF Humidity < (Set_Humidity - 2.5) THEN
```

```

    Humidifier_Output := TRUE;
END_IF;
IF Humidity > (Set_Humidity + 2.5) THEN
    Humidifier_Output := FALSE;
END_IF;

```

Автоматичне перевертання лотків реалізовано за допомогою програмних таймерів, які через задані проміжки часу активують мотор-редуктор механізму перевероту яєць:

```

Turning_Interval_Timer(
    IN := System_Enable AND NOT TurnPulse,
    PT := T#5S
);
IF Turning_Interval_Timer.Q THEN
    TurnPulse := TRUE;
END_IF;

```

Крім того, у програмі реалізовано керування вентиляторами циркуляції та охолодження, аварійну сигналізацію та масштабування аналогових сигналів для подальшої обробки контролером.

Для контролю роботи системи розроблено екран візуалізації технологічного процесу. На екрані відображаються поточні значення температури та вологості, уставки регулювання, стан виконавчих механізмів та повідомлення про аварійні режими роботи. Оператор має можливість змінювати уставки температури та вологості та контролювати роботу обладнання в режимі реального часу.

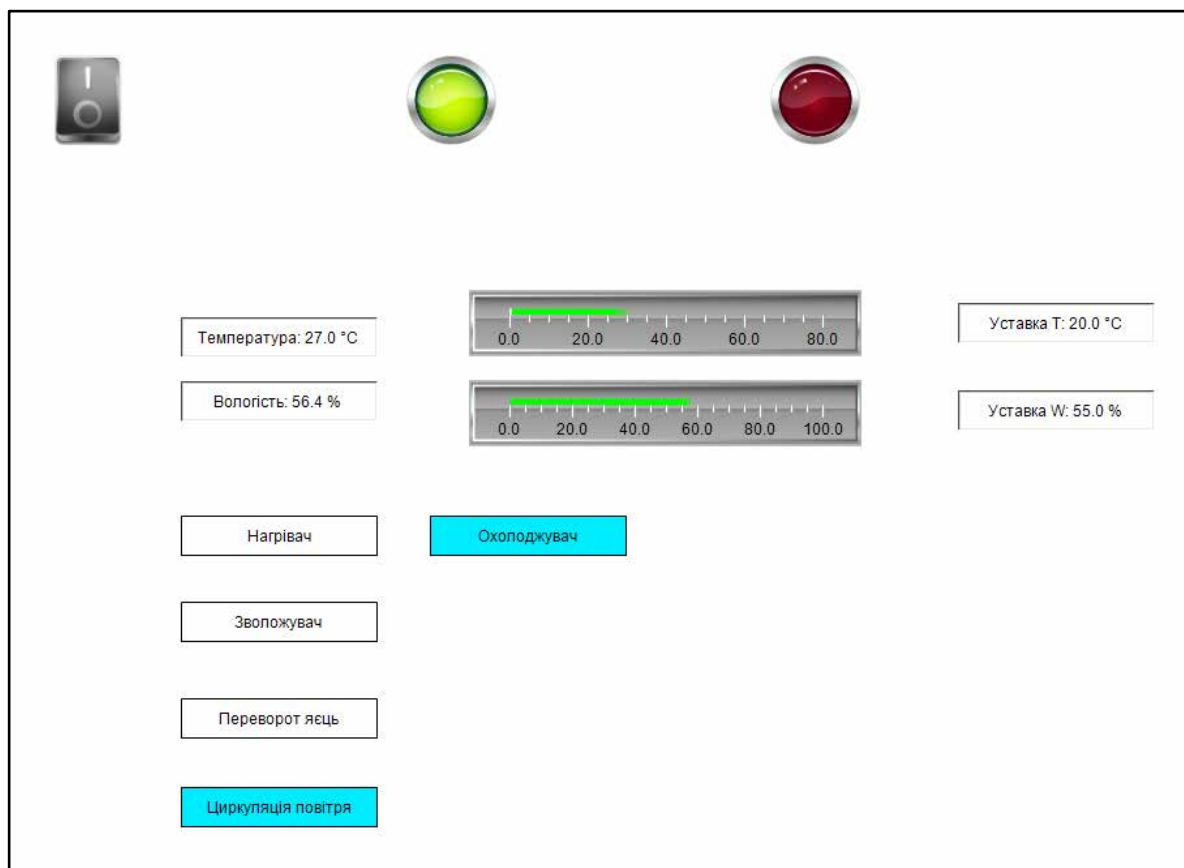


Рис. 4.2. Головний екран візуалізації системи керування інкубатором у штатному режимі роботи

Реалізований алгоритм керування забезпечує стабільне підтримання параметрів мікроклімату та підвищує ефективність процесу інкубації [15].

На екрані відображаються поточні значення температури та вологості, встановлені уставки, а також стан виконавчих механізмів. У даному режимі активований вентилятор циркуляції повітря та система охолодження.

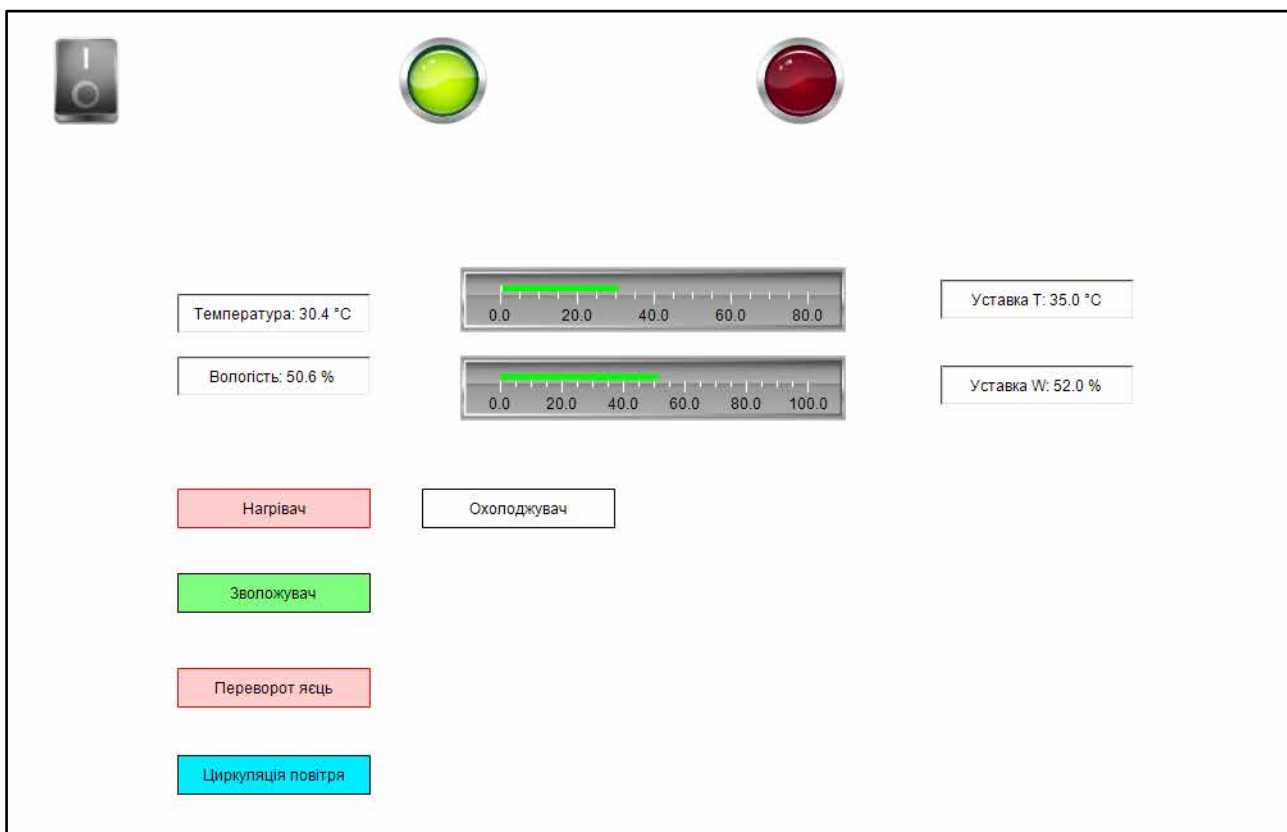


Рис. 4.3. Головний екран візуалізації системи керування інкубатором у режимі регулювання вологості

На екрані відображено роботу системи зволоження повітря. Оператор може контролювати поточні параметри мікроклімату, стан виконавчих механізмів та значення заданих уставок.

4.2. Розробка електричної принципової схеми

Електрична принципова схема системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора (рис. 4.4) розроблена відповідно до вимог діючих стандартів та відображає склад обладнання і електричні зв'язки між окремими елементами системи.

На схемі передбачено живлення системи від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В. Для захисту обладнання використовуються автоматичні вимикачі QF1, QF2 та QF3.

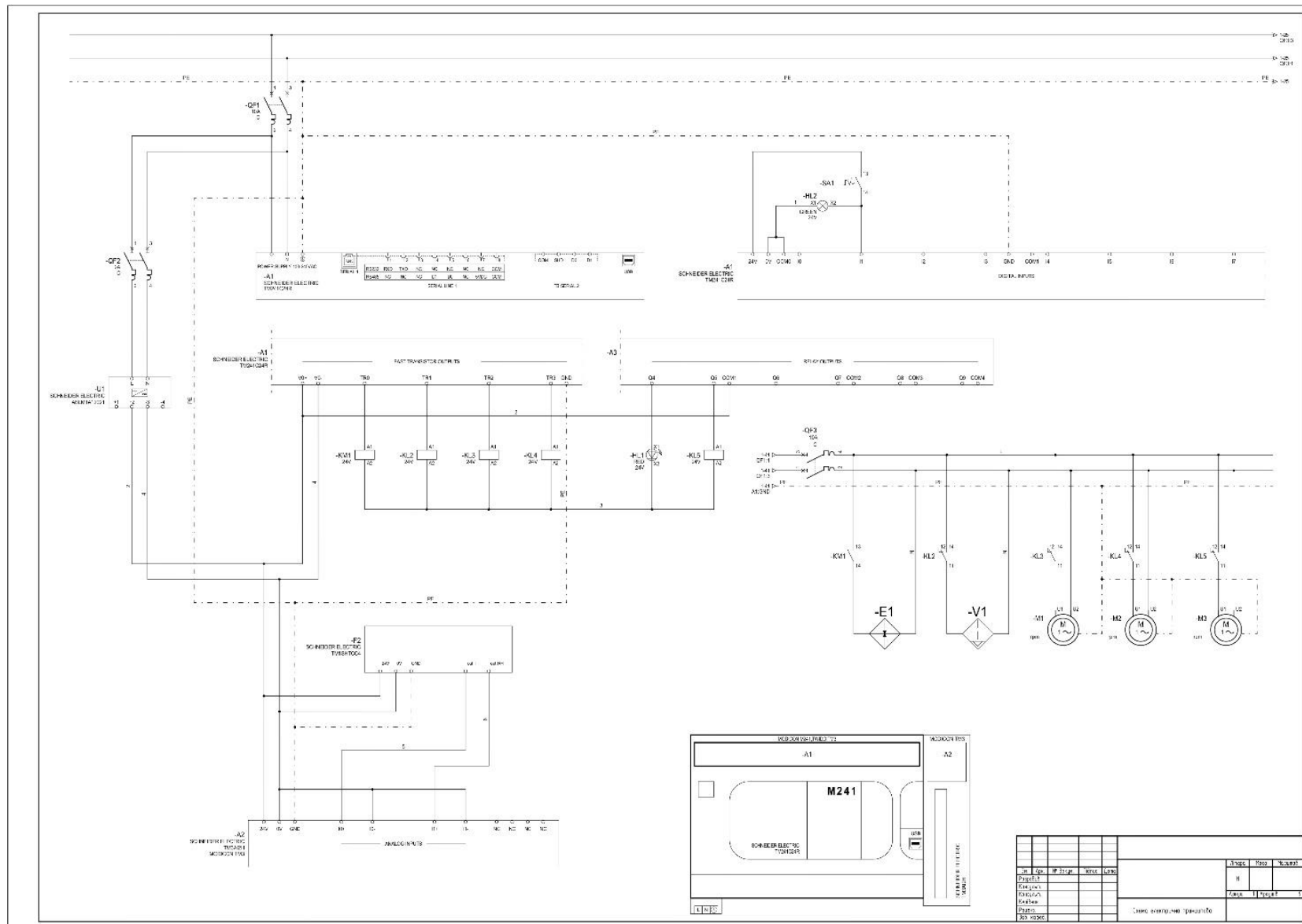


Рис. 4.4. Схема електрична принципова ікубатора

Автоматичний вимикач QF1 виконує функцію ввідного захисту шафи керування, QF2 захищає коло живлення автоматики, а QF3 призначений для захисту виконавчих механізмів.

Живлення контролера та допоміжного обладнання здійснюється від блока живлення Schneider Electric Phaseo ABLM1A12021, який перетворює напругу 220 В AC у напругу 24 В DC. Напруга 24 В використовується для живлення PLC Modicon M241, модуля аналогового вводу TM3AI2H, датчика температури та вологості TM1SHTCC4, проміжних реле та елементів індикації.

Контроль температури та вологості здійснюється датчиком TM1SHTCC4, сигнали з якого надходять на аналогові входи модуля TM3AI2H. Після обробки отриманої інформації контролер Modicon M241 формує сигнали керування виконавчими механізмами відповідно до реалізованого алгоритму автоматичного регулювання.

Для комутації силового кола нагрівального елемента E1 використовується контактор KM1. Керування іншими виконавчими механізмами здійснюється через проміжні реле KL2–KL5. Реле KL2 забезпечує керування системою зволоження V1, реле KL3 – вентилятором циркуляції повітря M1, реле KL4 – вентилятором охолодження M2, а реле KL5 – приводом механізму перевертання яєць M3.

Для індикації режимів роботи системи використовуються сигнальні лампи HL1 та HL2. Перемикач SA1 призначений для ввімкнення та вимкнення системи керування.

Розроблена принципова схема забезпечує автоматичне підтримання температури та вологості в інкубаційній камері, керування виконавчими механізмами, аварійну сигналізацію та безпечну експлуатацію системи автоматичного керування інкубатором.

4.3. Розробка схеми електричних з'єднань та підключень

Схема електричних з'єднань та підключень (рис. 4.5) розроблена для визначення внутрішніх електричних зв'язків між елементами шафи керування, а також порядку підключення зовнішнього обладнання системи автоматичного керування інкубатором [18].

На схемі показано підключення апаратів захисту, комутаційного обладнання, елементів індикації та виконавчих механізмів. До складу схеми входять автоматичні вимикачі QF1–QF3, контактор KM1, проміжні реле KL2–KL5, сигнальні лампи HL1 та HL2, перемикач SA1, а також клемні з'єднання для підключення зовнішніх пристроїв.

Автоматичний вимикач QF1 використовується як ввідний апарат захисту шафи керування. Автоматичний вимикач QF2 забезпечує захист кола автоматики, а автоматичний вимикач QF3 призначений для захисту виконавчих механізмів.

Для комутації силового кола нагрівального елемента використовується контактор KM1. Керування системою зволоження, вентиляторами та приводом механізму перевертання яєць здійснюється через проміжні реле KL2–KL5.

Світлова індикація роботи системи реалізована за допомогою ламп HL1 та HL2. Зелена лампа сигналізує про робочий режим системи, а червона використовується для індикації аварійних станів або відключення обладнання. Перемикач SA1 призначений для ввімкнення та вимкнення системи керування.

Розроблена схема забезпечує зручність монтажу, технічного обслуговування та подальшої експлуатації системи автоматичного керування інкубатором.

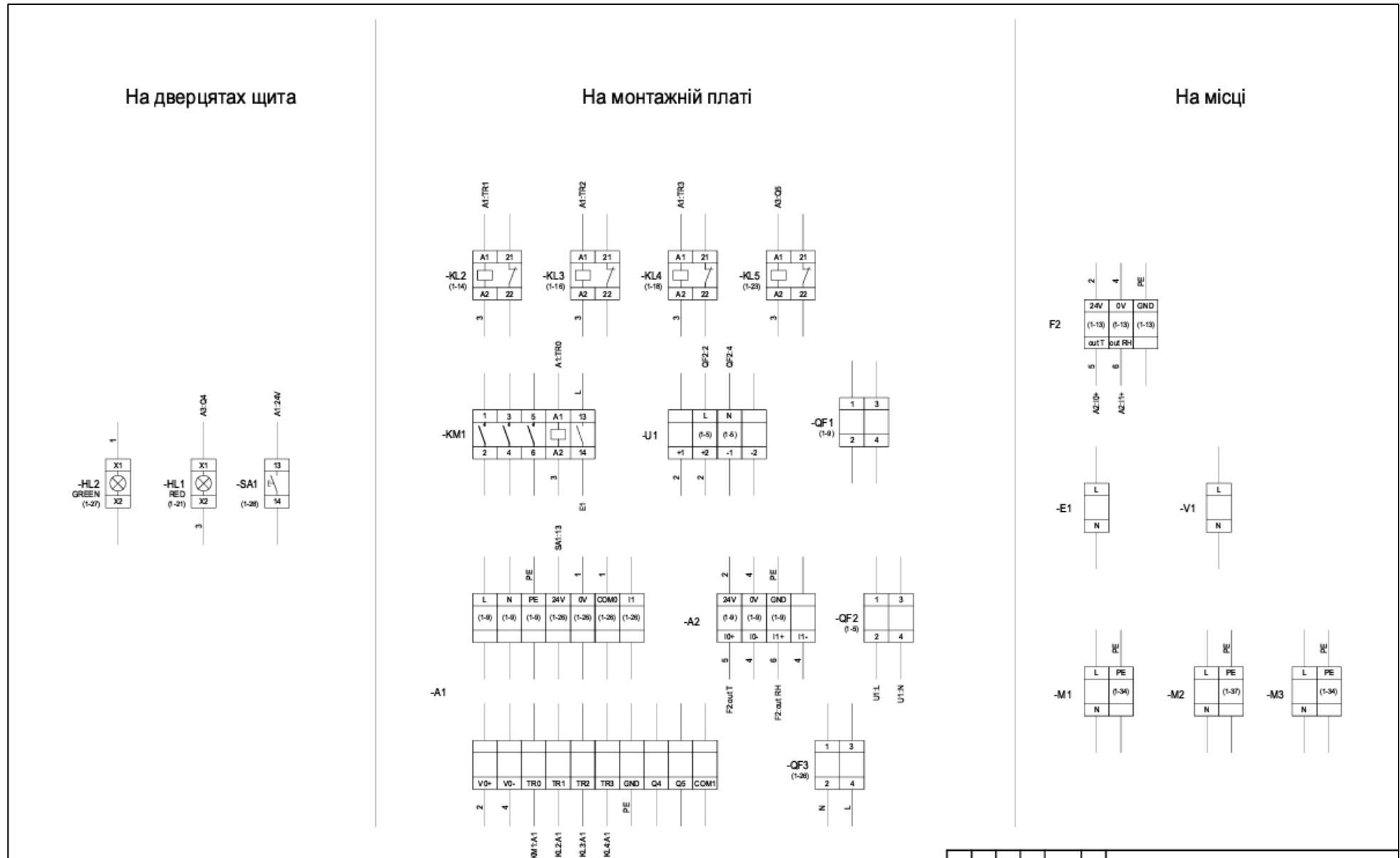


Рис. 4.5 Схема електричних з'єднань та підключень системи автоматичного керування інкубатором

4.4. Розробка загального виду щита керування

Загальний вигляд щита керування (рис. 4.6.) розроблено з урахуванням вимог до зручності монтажу, технічного обслуговування та безпечної експлуатації системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора.

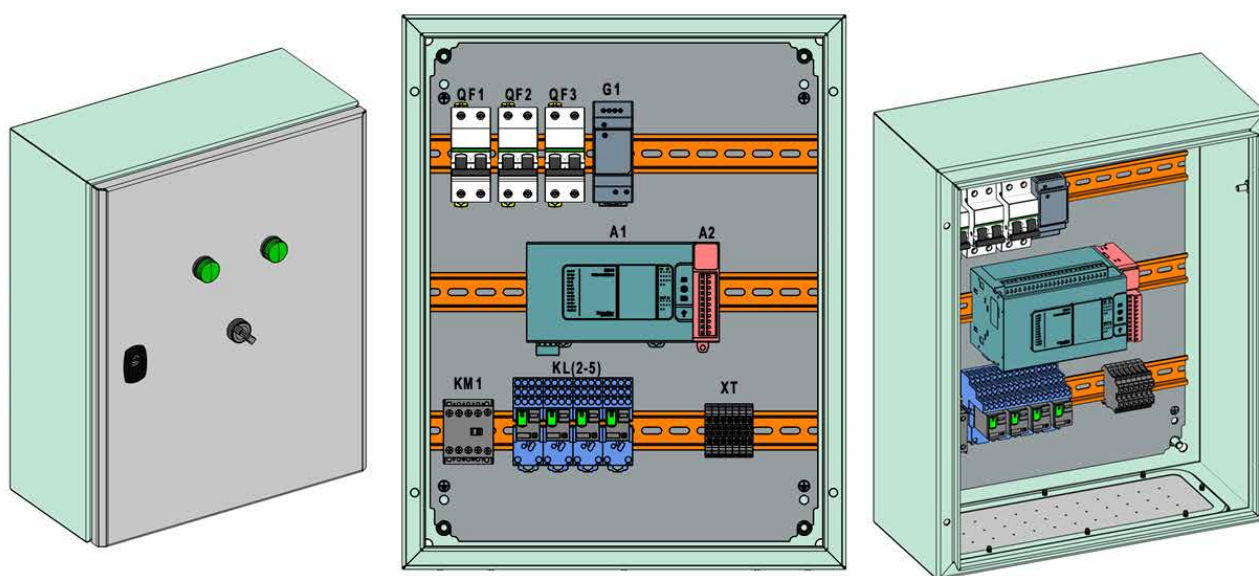


Рис. 4.6. Загального вид щита керування

Щит керування призначений для розміщення апаратів захисту, контролера, модулів вводу-виводу, комутаційної апаратури та клемних з'єднань, необхідних для роботи системи автоматизації. Монтаж обладнання виконано на DIN-рейках, що забезпечує простоту встановлення та подальшого обслуговування елементів системи.

У верхній частині щита розташовані автоматичні вимикачі QF1, QF2 та QF3, які забезпечують захист електричних кіл від коротких замикань та перевантажень. Поряд з автоматичними вимикачами встановлено блок живлення G1 Schneider Electric Phaseo, який забезпечує формування напруги 24 В постійного струму для живлення системи автоматики.

У центральній частині щита розташований програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M241 (A1) та модуль аналогового вводу ТМ3АІ2Н (А2). Контролер виконує обробку сигналів від датчиків та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів відповідно до закладеного алгоритму роботи.

У нижній частині щита встановлено контактор КМ1 для керування нагрівальним елементом та проміжні реле КЛ2–КЛ5, які використовуються для керування системою зволоження, вентиляторами та приводом механізму перевертання яєць. Також передбачено клемний блок ХТ для підключення зовнішніх пристроїв та кабельних ліній.

На дверях щита розташовані елементи індикації та керування, а саме зелена сигнальна лампа, що інформує про робочий режим системи, червона сигнальна лампа для індикації аварійного стану та перемикач SA1 для ввімкнення і вимкнення системи керування.

Розроблена компоновка забезпечує раціональне використання внутрішнього простору шафи, зручний доступ до обладнання під час експлуатації та технічного обслуговування, а також відповідає вимогам електробезпеки та промислової автоматизації [13].

4.5. Комплектування щита керування

4.5.1. Вибір автоматичних вимикачів. Для захисту електричних кіл системи автоматичного керування інкубатором від коротких замикань та перевантажень використовуються автоматичні вимикачі Schneider Electric серії Acti9 iC60N (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Автоматичний вимикач Schneider Electric серії Acti9 iC60N

У проєктованій системі передбачено встановлення трьох автоматичних вимикачів:

- QF1 – ввідний автоматичний вимикач шафи керування;
- QF2 – автоматичний вимикач кола автоматики;
- QF3 – автоматичний вимикач кола виконавчих механізмів.

Ввідний автоматичний вимикач QF1 призначений для загального захисту шафи керування та забезпечує відключення всієї системи у випадку виникнення аварійного режиму. З урахуванням сумарної потужності споживачів та необхідного запасу по струму обрано автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N C10 з номінальним струмом 10 А.

Автоматичний вимикач QF2 використовується для захисту кола автоматики, до складу якого входять блок живлення 24 В DC Schneider Electric Phaseo, програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M241, модуль аналогового вводу TM3AI2H та датчик температури і вологості TM1SHTCC4. Для даного кола обрано автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N C2 з номінальним струмом 2 А.

Автоматичний вимикач QF3 призначений для захисту виконавчих механізмів системи керування, а саме нагрівального елемента, системи зволоження, вентилятора циркуляції повітря, вентилятора охолодження та мотор-редуктора механізму перевертання яєць. З урахуванням сумарного навантаження виконавчих пристроїв обрано автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N C10 з номінальним струмом 10 А.

Основні характеристики автоматичних вимикачів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Технічні характеристики автоматичних вимикачів

Позначення	Модель	Призначення	Номінальний струм
QF1	Schneider Electric Acti9 iC60N C10	Ввідний автоматичний вимикач шафи керування	10 А
QF2	Schneider Electric Acti9 iC60N C2	Захист кола автоматики та блока живлення	2 А
QF3	Schneider Electric Acti9 iC60N C10	Захист кола виконавчих механізмів	10 А

Використання автоматичних вимикачів серії Acti9 і C60N забезпечує надійний захист обладнання від аварійних режимів роботи, підвищує електробезпеку системи та гарантує безпечну експлуатацію системи автоматичного керування інкубатором.

4.5.2. Вибір електромагнітних пускачів та проміжних реле. Для комутації силових кіл виконавчих механізмів та розвантаження вихідних кіл програмованого логічного контролера використовуються електромагнітні контактори та проміжні реле.

Найбільшим споживачем електроенергії в системі є нагрівальний елемент потужністю 500 Вт. Для його комутації обрано контактор Schneider Electric

TeSys D LC1K0910B7 з котушкою керування 24 В постійного струму (рис. 4.8). Контактор забезпечує надійну комутацію навантаження та має достатній запас по струму для роботи нагрівального елемента.



Рис. 4.8. Контактор Schneider Electric TeSys D LC1K0910B7 з котушкою керування 24 В постійного струму

Основні характеристики контактора наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Технічні характеристики контактора

Параметр	Значення
Модель	LC1D09BD
Серія	TeSys D
Напруга котушки	24 В DC
Номінальний струм	9 А
Кількість головних контактів	3 NO
Виробник	Schneider Electric

Для комутації допоміжних кіл та передачі команд від PLC до виконавчих механізмів використовується проміжне реле Schneider Electric RXM2AB2BD (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Проміжне реле Schneider Electric RXM2AB2BD

Проміжні реле застосовуються для керування вентиляторами, системою зволоження, аварійною сигналізацією та приводом механізму перевертання лотків. Використання реле дозволяє підвищити надійність роботи системи та забезпечити гальванічне розділення між контролером і виконавчими механізмами.

Основні характеристики проміжного реле наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Технічні характеристики проміжного реле

Параметр	Значення
Модель	RXM2AB2BD
Серія	Zelio Relay
Напруга котушки	24 В DC
Кількість контактів	2 перекидних
Номінальний струм контактів	12 А
Виробник	Schneider Electric

Застосування контактора LC1D09BD та проміжних реле RXM2AB2BD забезпечує надійну роботу системи автоматичного керування та захист вихідних кіл програмованого логічного контролера від перевантаження.

4.5.3. Вибір проводів та кабелів. Для забезпечення надійної роботи системи автоматичного керування інкубатором необхідно правильно вибрати кабельну продукцію для силових кіл та кіл керування.

Для підключення шафи керування до мережі живлення 220 В використовується кабель ВВГнг-LS $3 \times 1,5 \text{ мм}^2$. Даний кабель забезпечує передачу електроенергії до шафи керування та відповідає вимогам пожежної безпеки.

Для підключення виконавчих механізмів (нагрівального елемента, вентиляторів, зволожувача та мотор-редуктора) використовується провід ПВ-3 $1,5 \text{ мм}^2$. Обраний переріз забезпечує необхідну струмову навантажувальну здатність та механічну міцність провідників [8].

Для підключення датчика температури та вологості TM1SHTCC4, а також інших кіл керування використовується кабель КВВГнг $4 \times 0,75 \text{ мм}^2$. Кабель забезпечує надійну передачу сигналів між датчиками, контролером та допоміжним обладнанням.

Основні характеристики кабельної продукції наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Вибір кабелів та проводів

Найменування	Марка	Призначення
Кабель живлення шафи	ВВГнг-LS $3 \times 1,5 \text{ мм}^2$	Підключення шафи до мережі 220 В
Провід виконавчих механізмів	ПВ-3 $1,5 \text{ мм}^2$	Підключення ТЕНа, вентиляторів, зволожувача та мотор-редуктора
Кабель кіл керування	КВВГнг $4 \times 0,75 \text{ мм}^2$	Підключення датчиків та кіл автоматики

Обрана кабельна продукція забезпечує надійну передачу електричної енергії та сигналів керування, відповідає вимогам електробезпеки та умовам експлуатації системи автоматичного керування інкубатором.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано практичну реалізацію розробленої системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241. Розроблено алгоритм керування технологічним процесом та виконано його програмну реалізацію мовою Structured Text у середовищі EcoStruxure Machine Expert.

Для реалізації системи автоматизації розроблено електричну принципову схему, схему електричних з'єднань та підключень, а також загальний вигляд щита керування. Проведено вибір апаратури захисту, комутаційних пристроїв, проміжних реле, проводів і кабелів відповідно до вимог надійності, електробезпеки та умов експлуатації обладнання.

Для побудови системи обрано автоматичні вимикачі Schneider Electric серії Acti9 iC60N, контактори TeSys D та проміжні реле Zelio Relay, які забезпечують надійну роботу виконавчих механізмів та захист електрообладнання від аварійних режимів роботи.

Розроблені технічні рішення забезпечують автоматичний контроль та підтримання параметрів мікроклімату інкубатора, зручність монтажу й обслуговування системи, а також створюють необхідні умови для її надійної та безпечної експлуатації.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ В ІНКУБАТОРІ

5.1. Визначення капітальних вкладень

Для реалізації системи автоматичного керування мікрокліматом в інкубаторі необхідно придбати технічні засоби автоматизації, виконавчі механізми, апаратуру захисту та допоміжне обладнання. Перелік обладнання та його вартість наведено в таблиці 5.1.

Загальна вартість обладнання становить $K_3 = 2171,73 \text{ €}$

Для проведення подальших економічних розрахунків приймаємо курс євро $1 \text{ €} = 48 \text{ грн}$

Тоді вартість обладнання в національній валюті становить:

$$K_3 = 2171,73 \cdot 48 = 104242,94 \text{ грн}$$

Капітальні вкладення включають витрати на придбання обладнання, транспортування, монтаж, електромонтажні роботи та інші витрати [21].

Загальні капітальні вкладення визначаються за формулою:

$$K = K_3 + K_{\text{тт}} + K_{\text{м}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{і}} \quad (5.1)$$

де: K_3 – вартість обладнання;

$K_{\text{тт}}$ – транспортні витрати;

$K_{\text{м}}$ – витрати на монтаж;

$K_{\text{пр}}$ – витрати на електромонтажні роботи;

$K_{\text{і}}$ – інші витрати.

Транспортні витрати приймаються у розмірі 11% від вартості обладнання:

$$K_{\text{тт}} = 0,11 \cdot K_3$$

$$K_{\text{тт}} = 0,11 \cdot 104242,94 = 11466,72 \text{ грн}$$

Витрати на монтаж становлять 17% від вартості обладнання:

$$K_{\text{м}} = 0,17 \cdot K_3$$

$$K_{\text{м}} = 0,17 \cdot 104242,94 = 17721,30 \text{ грн}$$

Таблиця 5.1

Вартість технічних засобів автоматизації

Перелік обладнання з роздрібними цінами					
№	Референс	Найменування	Ціна за од. в Євро без ПДВ	Кіл-ть	Сума в Євро без ПДВ
Інкубаторр					
1	TM241C24R	ПЛК M241 24 ВХ/ВИХ РЕЛЕ 2RS485	374,31	1	374,31
2	TM3AI2H	МОДУЛЬ TM3 2 АНАЛОГ ВХ 16 БІТ	133,24	1	133,24
3	A9F79210	АВТ. ВИМИКАЧ iC60N 2P 10A C	13,34	2	26,68
4	A9F74202	АВТ. ВИМИКАЧ iC60N 2P 2A C	21,59	1	21,59
5	ABLM1A12021	БЛОК ЖИВЛЕННЯ МОДУЛЬНИЙ 12В 2,1А	43,53	1	43,53
6	LC1K0910BD	КОНТАКТОР TESYS К 3P 9A НВ ~24В ГВИНТ	22,39	1	22,39
7	RXM2AB2BD	РЕЛЕ МІНІАТЮРНЕ,2СО,СВІТЛОДІОД,=24В	5,84	4	23,36
8	RXZE2S114M	РОЗЕТКА ДЛЯ РЕЛЕ ТИПУ RXM4	4,19	4	16,76
9	ZB5AD2	ГОЛОВКА ДЛЯ ПЕРЕМИКАЧА	5,53	1	5,53
10	ZB5AZ101	КОРП.КНОПКИ З КЛЕМ.ЗАТИСК.ПІД ГВИНТ	3,18	1	3,18
11	XB5AVB3	СИГНАЛЬН.ЛАМПА ЗІ СВІТЛОДІОДОМ 24В	7,13	1	7,13

12	XB5AVB4	СИГН.ЛАМПА ЗІ СВІТЛОДІОДОМ 24В	7,13	1	7,13
13	NSYTRV42	LINERGY 2КОНТ ГВИНТОВА КЛЕМА 4ММ СІРА	87,48	3	262,44
14	NSYTRV42BL	LINERGY 2КОНТ ГВИНТОВА КЛЕМА 4ММ СИНЯ	102,48	2	204,96
15	NSYTRV42PE	LINERGY 2КОНТ ГВИНТОВА КЛЕМА ЗАЗЕМЛ 4ММ	290,93	2	581,86
16	NSYS3D5420P	ШАФА S3D B500XШ400XГ200+МОНТАЖН.ПЛАТА	112,17	1	112,17
17	TM1SHTCC4	ДАТЧИК ВОЛОГОСТІ І ТЕМПЕРАТУРИ, 4-20 мА	304,5	1	304,5
18	NSYSDR200BD	МОНТАЖНА РЕЙКА 7,5х35 2М ПЕРФОРОВАНА	5,46	1	5,46
19	E1-500W	ТЕН трубчастий електронагрівач 500 Вт, 220 В	15,51	1	15,51
20	VENTS 125 MA	Вентилятор циркуляції повітря Vents 125 MA	48,48	2	96,96
21	UHM-24V	Ультразвуковий зволожувач повітря 24 В DC	29,09	1	29,09
22	60KTYZ-220V	Мотор-редуктор механізму перевертання яєць 220 В	45,27	1	45,27
Разом, Євро без ПДВ					2171,73

Витрати на електромонтажні матеріали приймаються:

$$K_{\text{пр}} = 3500 \text{ грн}$$

Інші витрати:

$$K_i = 2500 \text{ грн}$$

Тоді загальні капітальні вкладення становлять:

$$K = 104242,94 + 11466,72 + 17721,30 + 3500 + 2500$$

$$K = 139430,96 \text{ грн}$$

5.2. Розрахунок річних експлуатаційних витрат

До складу експлуатаційних витрат входять амортизаційні відрахування, витрати на ремонт та технічне обслуговування обладнання, а також витрати на електроенергію.

Амортизаційні відрахування визначаються за формулою:

$$C_a = 0,142 \cdot K \quad (5.2)$$

$$C_a = 0,142 \cdot 139430,96$$

$$C_a = 19799,20 \text{ грн}$$

Витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування становлять:

$$C_{\text{пр}} = 0,18 \cdot K \quad (5.3)$$

$$C_{\text{пр}} = 0,18 \cdot 139430,96$$

$$C_{\text{пр}} = 25097,57 \text{ грн}$$

Для роботи інкубатора використовуються наступні споживачі електроенергії:

- ТЕН – 500 Вт;
- вентилятор циркуляції – 22 Вт;
- вентилятор охолодження – 22 Вт;
- ультразвуковий зволожувач – 25 Вт;
- мотор-редуктор – 14 Вт.

Сумарна встановлена потужність становить:

$$P = 0,583 \text{ кВт}$$

Річне споживання електроенергії:

$$W = P \cdot t \quad (5.4)$$

де: P – сумарна потужність обладнання;

t – річний фонд часу роботи.

Для безперервної роботи інкубатора:

$$t = 8760 \text{ год}$$

Тоді:

$$W = 0,583 \cdot 8760 = 5107 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість електроенергії при тарифі 4,32 грн/кВт·год становить:

$$C_e = W \cdot T \quad (5.5)$$

$$C_e = 5107 \cdot 4,32$$

$$C_e = 22062,24 \text{ грн}$$

Для технічного обслуговування системи приймаємо річні витрати:

$$C_z = 12000 \text{ грн}$$

Загальні експлуатаційні витрати визначаються:

$$C = C_a + C_{\text{пр}} + C_e + C_z \quad (5.6)$$

$$C = 19799,20 + 25097,57 + 22062,24 + 12000$$

$$C = 78959,01 \text{ грн}$$

5.3. Визначення економічної ефективності системи

Впровадження автоматизованої системи керування мікрокліматом дозволяє підтримувати оптимальні умови інкубації, зменшити вплив людського фактору та підвищити відсоток виводу молодняка.

Завдяки автоматичному регулюванню температури та вологості зменшуються втрати інкубаційного матеріалу, підвищується якість технологічного процесу та скорочуються витрати часу на обслуговування інкубатора.

Річний економічний ефект від впровадження системи приймаємо:

$$E = 60000 \text{ грн}$$

Термін окупності визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E} \quad (5.7)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{139430,96}{60000}$$

$$T_{\text{ок}} = 2,32 \text{ роки}$$

Отриманий результат свідчить про економічну доцільність впровадження автоматизованої системи керування мікрокліматом в інкубаторі.

У результаті проведеного техніко-економічного обґрунтування визначено, що загальна вартість технічних засобів автоматизації становить 104242,94 грн, а загальні капітальні вкладення з урахуванням монтажних та супутніх витрат складають 139430,96 грн.

Річні експлуатаційні витрати становлять 78959,01 грн, а розрахований термін окупності системи дорівнює 2,32 року.

Отримані результати підтверджують економічну ефективність впровадження розробленої системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241 та свідчать про доцільність її практичного використання.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування розробленої системи автоматичного керування мікрокліматом інкубатора. Проведено розрахунок вартості технічних засобів автоматизації, капітальних вкладень та річних експлуатаційних витрат.

Встановлено, що загальна вартість обладнання становить 104242,94 грн, а сумарні капітальні вкладення з урахуванням монтажних та супутніх витрат складають 139430,96 грн. Річні експлуатаційні витрати становлять 78959,01 грн.

Розрахунок показників економічної ефективності показав, що термін окупності системи складає 2,32 року. Отримані результати підтверджують

економічну доцільність впровадження розробленої системи автоматичного керування та свідчать про можливість її практичного використання для підвищення ефективності процесу інкубації.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено систему автоматичного керування мікрокліматом інкубатора на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241.

У процесі виконання роботи проведено аналіз технологічного процесу інкубації яєць, визначено основні параметри мікроклімату та досліджено особливості інкубатора як об'єкта автоматичного керування. Виконано інформаційний аналіз об'єкта керування, розглянуто сучасні системи автоматизації інкубаторів та розроблено функціональну схему автоматизації технологічного процесу.

Побудовано математичну модель інкубатора та отримано перехідні характеристики каналів температури і вологості. На основі проведених досліджень визначено передаточні функції об'єкта керування, що дозволило оцінити його динамічні властивості та підготувати вихідні дані для синтезу системи автоматичного регулювання.

У роботі виконано вибір технічних засобів автоматизації, зокрема програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241, модуля аналогового вводу TM3AI2H, датчика температури та вологості TM1SHTCC4, комутаційної апаратури, виконавчих механізмів та допоміжного обладнання. Для основних елементів системи отримано передаточні функції та досліджено їх динамічні характеристики.

Розроблено структурно-функціональну схему системи автоматичного керування, побудовано розімкнену та замкнену системи регулювання, а також обґрунтовано параметри дискретизації відповідно до теореми Котельникова. Для підтримання параметрів мікроклімату обрано ПД-алгоритм регулювання та виконано синтез регулятора.

Проведено аналіз якості та стійкості системи автоматичного керування. Результати моделювання показали, що система є стійкою, має незначне

перерегулювання, малу статичну похибку та забезпечує необхідну швидкодію для підтримання заданих параметрів температури та вологості в інкубаторі.

Розроблено електричну принципову схему, схему електричних з'єднань та підключень, а також загальний вигляд щита керування. Виконано вибір автоматичних вимикачів, контакторів, проміжних реле, проводів і кабелів, що забезпечують надійну та безпечну роботу системи автоматизації.

Реалізовано алгоритм автоматичного керування мовою Structured Text (ST) у середовищі EcoStruxure Machine Expert та створено систему візуалізації технологічного процесу для контролю параметрів мікроклімату в реальному часі. Розроблена система забезпечує автоматичне керування нагріванням, зволоженням, вентиляцією та механізмом перевертання яєць, а також контроль аварійних режимів роботи.

Проведене техніко-економічне обґрунтування підтвердило доцільність впровадження розробленої системи. Отримані результати свідчать про можливість практичного використання розробленої системи автоматичного керування для забезпечення надійної, безпечної та ефективної роботи інкубатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація виробничих процесів : підручник. / І.В Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. Київ: Видавництво Ліра-К, 2015 .300 с.
2. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: навч. посіб. / О.В. Барало, П.Г. Самойленко, С.Є. Гранат, В.О. Ковальов. Київ: Аграрна освіта, 2010. 557 с.
3. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва / Мартиненко І.І. та ін. Київ: Урожай, 1995. 224 с.
4. Автоматичний інкубатор. Інструкція використання. URL: <https://mlunok.com.ua/uk/blog/stati/avtomatichnij-inkubator-instrukciya-vikoristannya?srsId=AfmBOoqwC1SCeXIRLPh6en5NyPIXn11yDk060XRaACVu9KKD2HTcTHqZ> (дата звернення: 21.01.2026).
5. Бондаренко О.М. Програмовані логічні контролери в системах автоматизації : навчальний посібник. Харків : ХНУРЕ, 2021. 248 с.
6. Валюх О. А., Максимів В. М. Елементи теорії автоматичного керування. Львів, «Афіша», 2002. 122 с.
7. Головка В.М.. Теоретичні основи автоматики (курс лекцій) : навч. посібник. Ніжин: НАУ. 2004. – 104 с.
8. Головка Д.Б.. Автоматика і автоматизація технологічних процесів. Київ: Либідь, 2007. 232 с.
9. Датчик вологості і температури, 4-20 мА. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/TM1SHTCC4/датчик-вологості-і-температури-420-ма/> (дата звернення: 11.02.2026).
10. Дудник В.В. Системи автоматичного керування : навчальний посібник. Львів : Новий Світ-2000, 2018. 368 с.
11. Каркач П.М., Машкін Ю.О. Інкубація яєць з основами ембріології сільськогосподарської птиці»: навч. посіб. для забезпечення очної та заочної форм навчання студентів за спеціальністю 204 «Технологія виробництва та переробки продукції тваринництва» освітніх ступенів бакалавра з дисципліни

«Технологія виробництва продукції птахівництва» та магістра з дисципліни «Інкубація яєць сільськогосподарської птиці». Біла Церква, 2024. 207 с.

12. Корчемний М.О., Клендий П.Б., Потапенко М.В. Теоретичні основи автоматики: навч. посіб. Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2012. 304 с.

13. Кузнецов А. Ю. Проектування систем автоматизованого керування: навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2021. 188 с.

14. Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості : підручник. Київ: Аграрна освіта, 2001. 224с.

15. Литвиненко А. П. Програмне забезпечення для систем моніторингу і керування: навч. посіб. Одеса : ОНУ, 2022. 160 с.

16. Модуль ТМ3 2 аналог ВХ 16 БІТ. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/TM3A12H/модуль-tm3-2-аналог-вх-16-біт/> (дата звернення: 11.02.2026).

17. Основи початку роботи з інкубатором. URL: <https://incubatory.com.ua/swtincu> (дата звернення: 17.03.2026)

18. Пальчевський Б.О. Автоматизація технологічних процесів. Львів: Світ, 2007. 392с.

19. Паромчук М. П. Проектування системи мікроклімату тваринницьких приміщень : навч. посіб. Київ : НУБіП України, 2022. 120 с.

20. Програмований логічний контролер M241 24 ВХ/ВИХ реле 2RS485 1ETH. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/TM241CE24R/програмований-логічний-контролер-m241-24-вх-вих-реле-2rs485-1eth/?selectedNodeId=12692219234> (дата звернення: 23.03.2026).

21. Проць Я.І., Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Ляшук О.Л. Автоматизація виробничих процесів : навч. посіб. для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 344с.

22. Руденко П. С. Сенсорні технології для аграрного сектору: навч. посіб. Київ : НУБіП України, 2021. 132 с.

23. Скаковський Ю.М. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 320 с.

24. Стенцель Й.І., Поркуян О.В. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв. Підручник. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. унту, 2010. 302 с.

25. Технологія виробництва продукції птахівництва. Електронний посібник. URL: https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/twarunnuztvo/texnol_vurobn_prod_ptaxivnuctva/4/4_1.htm (дата звернення: 10.02.2026).

26. Incubation. URL: https://www.poultryhub.org/anatomy-and-physiology/incubation?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 08.04.2026).

27. Modicon M241. Programmable Logic Controller for performance-demanding applications. URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=Catalog+Modicon+M241+Programmable+Logic+Controller+for+performance+demanding+applications_October+2023.pdf&p_Doc_Ref=DIA3ED2140107EN (дата звернення: 13.05.2026).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А**Програма на мові ST для PLC Schneider Electric Modicon M241**

Temperature := TO_REAL(Temperature_AI) * 0.1;

Humidity := TO_REAL(Humidity_AI) * 0.1;

IF NOT System_Enable THEN

Heater_Output := FALSE;

Fan_Output := FALSE;

Humidifier_Output := FALSE;

TurningMotor_Output := FALSE;

CoolingFan_Output := FALSE;

AlarmLamp_Output := TRUE;

ELSE

AlarmLamp_Output := FALSE;

END_IF;

IF System_Enable THEN

IF Temperature < (Set_Temperature - 0.2) THEN

Heater_Output := TRUE;

END_IF;

IF Temperature > (Set_Temperature + 0.2) THEN

Heater_Output := FALSE;

END_IF;

END_IF;

IF System_Enable THEN

IF Humidity < (Set_Humidity - 2.5) THEN

Humidifier_Output := TRUE;

END_IF;

IF Humidity > (Set_Humidity + 2.5) THEN

Humidifier_Output := FALSE;

END_IF;

END_IF;

IF System_Enable THEN

Fan_Output := TRUE;

END_IF;

Turning_Interval_Timer(

IN := System_Enable AND NOT TurnPulse,

PT := T#5S

);

IF Turning_Interval_Timer.Q THEN

TurnPulse := TRUE;

END_IF;

Turning_Run_Timer(

IN := TurnPulse,

PT := T#2S

);

IF TurnPulse THEN

TurningMotor_Output := TRUE;

END_IF;

IF Turning_Run_Timer.Q THEN

TurningMotor_Output := FALSE;

TurnPulse := FALSE;

END_IF;

IF System_Enable THEN

IF Temperature >= (Set_Temperature + 0.5) THEN

CoolingFan_Output := TRUE;

END_IF;

IF Temperature <= Set_Temperature THEN

CoolingFan_Output := FALSE;

END_IF;

END_IF;

IF System_Enable THEN

Sim_Temp_Timer(IN := NOT Sim_Temp_Timer.Q, PT := T#300MS);

IF Sim_Temp_Timer.Q THEN

(* Якщо ТЕН гріє — температура росте (межа 85.0°C) *)

IF Heater_Output AND Temperature_AI < 850 THEN

Temperature_AI := Temperature_AI + 1;

END_IF;

IF CoolingFan_Output AND Temperature_AI > 150 THEN

 Temperature_AI := Temperature_AI - 2;

END_IF;

IF NOT Heater_Output AND NOT CoolingFan_Output AND
Temperature_AI > 200 THEN

 Temperature_AI := Temperature_AI - 1;

END_IF;

END_IF;

Sim_Humidity_Timer(IN := NOT Sim_Humidity_Timer.Q, PT :=
T#400MS);

IF Sim_Humidity_Timer.Q THEN

IF Humidifier_Output AND Humidity_AI < 950 THEN

 Humidity_AI := Humidity_AI + 1;

END_IF;

IF NOT Humidifier_Output AND Humidity_AI > 200 THEN

 Humidity_AI := Humidity_AI - 1;

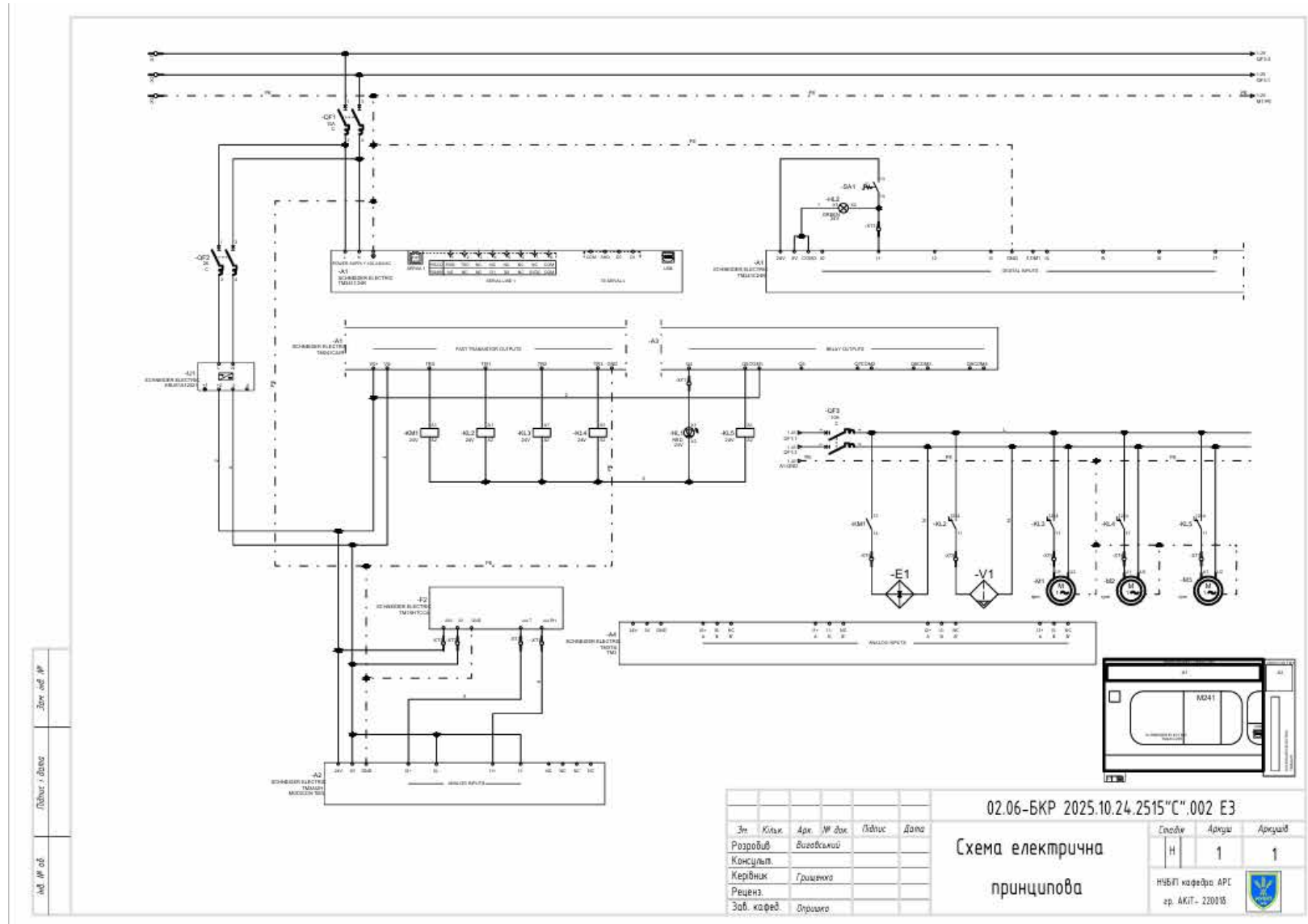
END_IF;

END_IF;

END_IF;

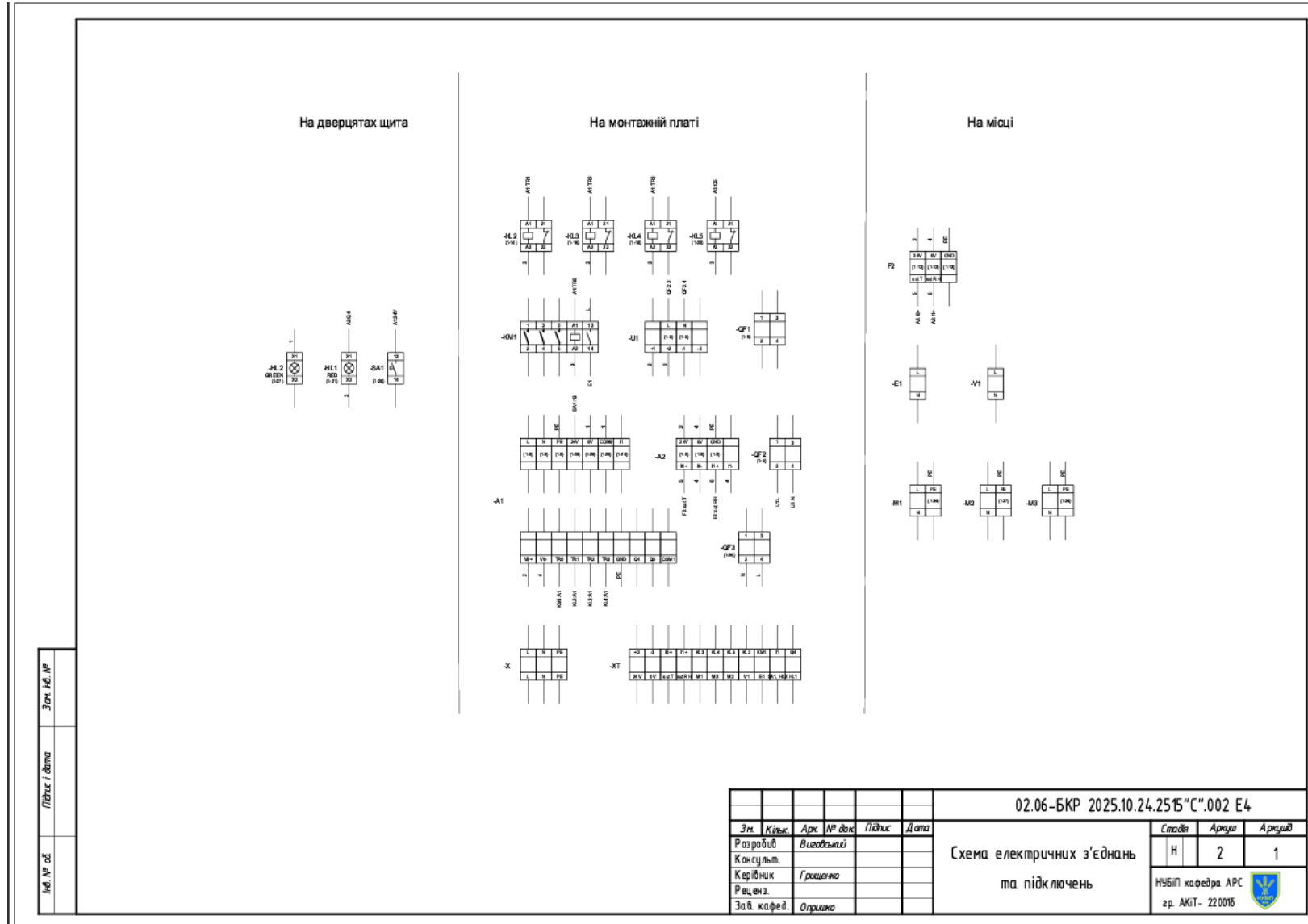
ДОДАТОК Б

Схема електрична принципова



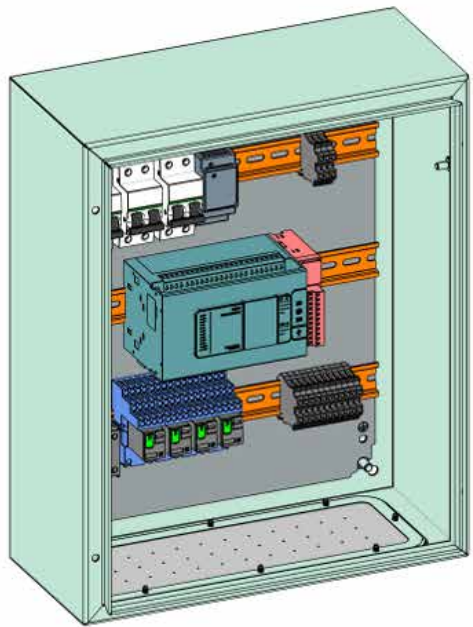
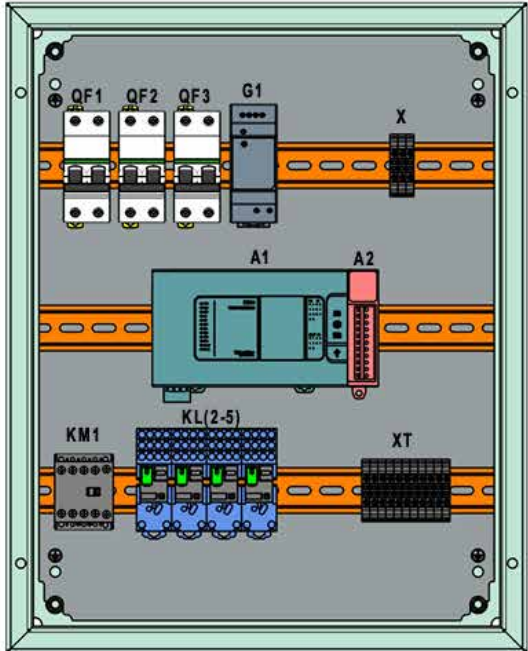
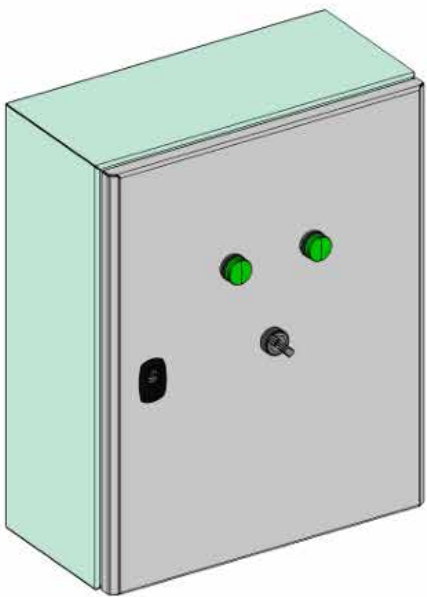
ДОДАТОК В

Схема електричних з'єднань та підключень



ДОДАТОК Г

Загальний вигляд щита керування



№ зм.	№ док.	№ аркуша	№ док.	№ аркуша
1	1	1	1	1

Зм.	Кільк.	Арк. № док.	Підпис	Дата
Розробив	Виготовив			
Консульт.				
Керівник	Грищенко			
Реценз.				
Заб. кафедр.	Опришко			

02.06-БКР 2025.10.24.2515"С".002 ВЗ

Загальний вигляд
щита керування

Статус	Архив	Архив
Н	3	1

НУБП кафедр АРС
гр. АКІТ - 220018



ДОДАТОК Д

Функціональна схема автоматизації

