

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет систем управління літальних апаратів

Кафедра систем управління літальних апаратів

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка і дослідження системи управління параметрами
мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток»

ХАІ.301.362.22О.151.00173036 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, групи 362

Галузь знань 15 «Автоматизація та
приладобудування»

Спеціальність

151 “Автоматизація та комп’ютерно-
інтегровані технології

Освітня програма

“Інженерія мобільних додатків”

Отченашенко С.О.

(прізвище та ініціали студента)

Керівник доц. Жукевич А. Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет систем управління літальних апаратів
Кафедра систем управління літальних апаратів (№301)
Рівень вищої освіти магістр
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
(шифр і назва)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва)
Освітня програма «Інженерія мобільних додатків»
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

к.т.н., доц. Костянтин ДЕРГАЧОВ

« » _____ 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Отченашенко Сергію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка і дослідження системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток»

керівник роботи доцент, к.т.н. Жукевич А. Б.,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 17.11. 2022 року № 1602 -уч

2. Строк подання студентом роботи: 09 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, оцінка проблеми управління мікрокліматом в інкубаторі, опис об'єкту автоматичного управління, математичний опис об'єкту автоматичного управління, синтез системи автоматичного управління, конструкторська частина, дослідницька частина, дослідницько-експериментальна частина, економічна частина, заключення, список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 3 плаката формату А1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	доцент Жукевич А. Б.	02.10.2022	02.10.2022
2	доцент Жукевич А. Б.	08.10.2022	08.10.2022
3	доцент Жукевич А. Б.	08.10.2022	08.10.2022
4	доцент Джулгаков В.Г	10.10.2022	10.10.2022
5	к.т.н. доцент Попов О.С.	12.10.2022	12.10.2022

Нормоконтроль _____ доцент, к.т.н. Жукевич А. Б. « ____ » _____ 2022 р.
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання 19.09.2022

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Початок переддипломної практики	12.09.2022	
2.	Формулювання теми роботи. Розробка технічного завдання	19.09.2021	
3.	Математичний опис системи управління. Аналіз і синтез системи управління. Проведення експериментальних досліджень	28.10.2022	Залік з переддипломної практики
4.	Конструкторська частина роботи. Дослідницька частина роботи. Експериментально-практична частина. Економічне обґрунтування розробки. Розробка питань охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях	28.11.2022	
5.	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки і графічного матеріалу	09.12.2022	
6.	Попередній захист роботи. Рецензування роботи	16.12.2022	
7.	Захист роботи	19.12.2022	

Студент _____ Отченашенко С.О.
(підпис) (ім'я, прізвище.)

Керівник роботи _____ Жукевич А. Б.
(підпис) (ім'я, прізвище.)

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра систем управління літальних апаратів (№301)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідуючий кафедрою 301

к.т.н., с.н.с., доцент

_____ Костянтин ДЕРГАЧОВ

«__» _____ 2022 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на дипломне проектування

Отченашенко Сергія Олександровича

1 Тема роботи: _____ «Розробка і дослідження системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток» _____

затверджена наказом по університету від «_17_» листопада 2022 р. №_1602_-уч

2 Строк здачі студентом закінченої роботи «_09_» _____ грудня _____ 2022 р.

3 Область застосування розробки: _____ Промислові інкубатори _____

4 Початкові дані для розроблювальної системи

4.1 Призначення і мета створення системи: Розробка і дослідження системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток _____

4.2 Загальні відомості на промислових підприємствах потрібен моніторинг та управління параметрів інкубатора з їх відображенням оператору _____

5 Технічні вимоги до каналів системи управління

5.1 Питання, що підлягають розробці: розробити функціональну схему всієї системи, розробити математичний опис моделі для окремих функціональних вузлів, розробити структурну схему, аналіз та синтез обраних законів управління, розробити обчислювач на базі мікроконтролера для реалізації законів управління; розробити мобільний додаток для моніторингу та керування показників необхідних параметрів.

5.2 Вимоги до структури й функціонування системи:

5.3 Вимоги до показників якості системи : Температура повітря $t_{вн}$ 35,6 – 39,7 °С,
відносна вологість повітря $\varphi_{вн}$ 40 – 60 %, концентрація вуглекислого газу

K_{co_2} 0,1 %

5.4 Вимоги до конфігурації обчислювальної техніки: обчислювальна техніка серійна, взаємозамінна для скорочення часу ремонту

6 Умови експлуатації системи

6.1 Вимоги до програмної та інформаційної сумісності: ПЗ повинно використовувати стандартні процеси, які легко зрозуміють експлуатаційний персонал

6.2 Вимоги до захисту інформації від несанкціонованого доступу: захист інформації на рівні виходу до мережі інтернет виконується стандартними програмами на роутерах комунікацій

6.3 Вимоги до зовнішніх збурень: вібрація, тряска, можливі перекоси, удари, нахили недопустимі

Характер роботи системи (безперервної, циклічний, одноразового дії): безперервний.

7 Додаткові функції, реалізовані системою (сигналізація про несправності, реєстрація необхідної інформації, самоконтроль самої системи і т.ін.): Дана система не має додаткових функцій

8 Обсяг виконуваних розроблювачем робіт

8.1 Етапи проведення роботи: аналіз технічного завдання, отримання математичної моделі об'єкта управління, розробка функціональної та структурної схем системи

управління, розробка математичної моделі системи управління, аналіз системи управління.

8.2 Обсяг розробки по кожному етапу:

- 1) стан проблеми та постановка задачі проектування (10 с);
- 2) опис функціонування об'єкта автоматичного управління (7 с);
- 3) математичний опис об'єкта системи управління інкубатора (12 с);
- 4) формування пристрою автоматичного керування (18 с);
- 5) експериментальна частина (16 с);

8.3 Вимоги до чисельності й кваліфікації персоналу:

9 Вимоги до захисту інформації й надійності:

10 Порядок контролю й приймання системи:

11 Дослідницька частина: дослідження системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток

12 Експериментально-практична частина: Натурне моделювання роботи системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток

13 Економічна частина

13.1 Розробити (розрахувати, одержати): розрахувати собівартість системи управління

13.2 Умови і вимоги: одичне виробництво, розрахунок проводиться за статтями калькуляції

13.3 Очікуваний результат: повна собівартість виробу грн. з урахуванням усіх витрат

14 Перелік графічних матеріалів із зазначенням форматів: 3 плаката формату А1

Керівник проектування
Жукевич Аркадій Борисович
(П.І.Б.)

« » _____ 2022 р.

Прийняв до виконання
Отченашенко Сергій Олександрович
(П.І.Б. студента)

« » _____ 2022 р.

Погоджено з питань:

проектування
Джулгаков В.Г.
(П.І.Б.)

« » _____ 2022 р.

дослідницької частини
Жукевич А.Б.
(П.І.Б.)

« » _____ 2022 р.

економіки
к.е.н. Попов О.С.
(П.І.Б.)

« » _____ 2022 р.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	8
ВСТУП	9
1 СТАН ПРОБЛЕМИ	11
1.1 Аналіз об'єкта автоматизації, параметрів та процесів, що потребують автоматичного керування	11
1.2 Аналіз методів реалізації рішень з автоматизації для цільового об'єкту	15
1.3 Реалізація системи автоматичного керування та моніторингу мікрокліматичних параметрів інкубатору	22
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	37
2.1 Функціональна і структурна схеми системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі	37
2.2 Математична модель системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі	44
2.3 Вибір методу синтезу та закону керування системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі	49
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	59
3.1 Синтез регулятора системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі	59
3.2 Дослідження системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі	80
3.3 Встановлення доцільних параметрів функціонування системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі за результатами експериментального дослідження та моделювання	93
4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	98
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	116
ВИСНОВОК	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	120

АНОТАЦІЯ

Тема ДП: розробка і дослідження системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток.

Об'єм роботи: 124 с., 75 рис., 21 табл., 47 ф., 88 дж.

Ключові слова: інкубатор, мікроклімат, *Arduino*, *IoT*, *NodeMCU*, нечітка логіка керування, нейромережі.

Мета ДП – розробка і дослідження системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток.

Структура ДП: 5 розділів:

1. Дослідження поточного стану реалізації систем та аналіз засобів автоматичного керування технологічним процесом інкубації пташиних яєць.
2. Розробка математичного апарату, моделі та законів керування проектною системою автоматизації інкубатора пташиних яєць.
3. Експериментальне дослідження функціонування проектного інкубатора пташиних яєць з встановленням доцільного техніко-конструктивного виконання та оптимальних режимів функціонування.
4. Дослідження та повірочний розрахунок головного елемента проектної схеми автоматизації інкубатора пташиних яєць – контролерної плати – *Arduino Uno Rev3*;
5. Встановлення економічної доцільності впровадження проектною системою автоматичного керування технологічним процесом інкубації пташиних яєць.

Основні результати: розроблено системи автоматичного керування технологічним процесом інкубації пташиних яєць, що керується законом нечіткої логіки, базується на засобах екосистеми *Arduino* з використанням *IoT*-датчиків та віддаленого адміністрування за допомогою мобільних платформ під додатковим нейромережним контролем дозрівання ембріонів.

ВСТУП

Тема ДП: розробка і дослідження системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток.

Актуальність. Одним з безпекових аспектів сучасного світу є продовольча безпека. Безпосередньо продовольча безпека забезпечується за рахунок розвитку таких основних галузей як рослинництво, тваринництво та суміжних перероблюючих секторів виробництва продуктів харчування (з урахуванням ступеню переробки початкової сировини). Продовольча галузь України, зокрема є одним з основних рушіїв розвитку економіки, оскільки наша держава є значним експортером продуктів харчування (різного ступеню переробки) та забезпечує світову стабільність в даній царині. Визначені тренди підтверджуються статистичними даними Держстату стосовно харчової продукції, що знаходиться у фокусі дослідження в динаміці п'ятирічного діапазону (2016 / 2021) [1, 2]:

– у визначеному хронометричному горизонті на 8,1 % збільшилось поголів'я птиці (2016 – 204,0 млн гол. / 2021 – 220,5 млн гол.);

– динаміка продукування яєць у досліджуваному періоді показує збільшення на 7,1 % (2016 – 15,100 млрд од. / 2021 – 16,167 млрд од.);

– у досліджуваному хронометричному горизонті експорт м'яса та м'ясних субпродуктів (в т. ч. м'яса птиці) збільшився в 2,1 рази (2016 – 387,8 млн дол. / 2021 – 845,6 млн дол.);

– динаміка експорту похідних продуктів тваринництва та птахівництва (в т. ч. яєць) показує збільшення на 14,5 % (2016 – 330,5 млн дол. / 2021 – 378,5 млн дол.).

Таким чином, статистичні дані засвідчують доцільність проведення досліджень та розробки відповідних техніко-технологічних рішень, щодо розвитку птахівництва: досліджувана галузь демонструє не лише позитивну динаміку у обраному хронометричному горизонті статистичних масивів, а й доводить високий потенціал в розвитку економіки України, зокрема значним

збільшенням частки експорту відповідної продукції. Промислове птахівництво неможливо організувати без засобів і систем з контрольованими мікрокліматичними параметрами, на кшталт інкубаторів [3 – 5]. Досягнути високої якості та продуктивності продукції інкубаторів можливо з інтеграцією систем автоматизованого контролю мікрокліматичних параметрів, що важливо, як у вирощуванні молодого поголів'я птахів, так і в забезпеченні сприятливих умов для продукування яєць [6 – 8] та задовольняє державним інтересам в рамках в рамках загальнонаціональної Стратегії інноваційного розвитку [9].

Мета ДП – розробка і дослідження системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток.

Завдання ДП:

– стан проблеми: аналіз об'єкта автоматизації, параметрів та процесів, що потребують автоматичного керування; аналіз методів реалізації рішень з автоматизації для цільового об'єкту; реалізація системи автоматичного керування та моніторингу мікрокліматичних параметрів інкубатору;

– основна частина: функціональна і структурна схеми системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі; математична модель системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі; вибір методу синтезу та закону керування системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі;

– експериментально-практична частина: синтез регулятора системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі; дослідження системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі; встановлення доцільних параметрів функціонування системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі за результатами експериментального дослідження та моделювання.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз об'єкта автоматизації, параметрів та процесів, що потребують автоматичного керування

Відповідно до результатів дослідження ревалентних наукових праць в актуальному горизонті наукового пошуку [10 – 16], встановимо, що узагальнене медіанне поняття обраного об'єкта автоматизації складає наступні положення: інкубатор – це замкнений об'єм, що потребує чіткого та неухильного дотримання внутрішніх мікрокліматичних параметрів для забезпечення потреб інкубатування біологічних культур.

Для підтримки оптимальних параметрів мікроклімату в технологічному об'ємі інкубатора необхідно забезпечувати безперервний інтенсивний повітрообмін, що суттєво впливає на дотримання нормованої температури повітря.

Температура повітря у процесі інкубації, величина, що характеризує нагрітість повітря; найбільше впливає на результати інкубації. При постійному протягом інкубаційного періоду вплив виведення курчат можна отримати при температурі від 35,5 до 39,7 °С. Результати інкубації вкрай низькі на межах зазначеного інтервалу, що швидко покращуються при наближенні температури до середнього значення. У перші 12 годин розвитку ембріон переносить нагрівання до 48,8 °С протягом півгодини. Надалі подібний перегрів призводить до загибелі інкубованих біологічних культур.

На 2-3 добу тривалі температури вище 39 °С викликають неправильний розвиток амніону і потворності голови, на 4-5 добу – зміщення внутрішніх органів і недорозвинення черевної порожнини. Загалом у першу добу інкубації ембріон виявляє найбільшу чутливість до рівня температури, відповідаючи прискоренням обміну речовин та зростання на помірне перегрів (до 38,3 – 38,5 °С) протягом тривалого часу [10 – 16].

Ембріони добре пристосовані до зниження температури повітряного середовища. Ембріональний розвиток не порушується, якщо дія низької температури нетривала або її зниження невелике.

Зниження температури до 20 °С протягом доби на будь-якій стадії інкубації помітно не зменшує виведення яєць. Короточасні швидкі охолодження яєць при підвищеній температурі в інкубаторі після замикання алантоїсу позитивно впливають на ембріогенез.

Певні температурні умови у яєць створюють в інкубаторі налаштуванням його регулятора температури.

Контрольний термометр інкубатора з точністю до 0,1 °С відтворює програму налаштування регулятора, але не відображає динамічних теплових процесів, що відбуваються в лотковому блоці.

В інкубаторах із конвеєрною (партійною) закладкою його показання відповідають мінімальним температурам у блоці лотків. В інкубаторах одноразової закладки у перші десять діб інкубації показання контрольного термометра близькі до мінімальних та середніх, а у другі десять діб – до мінімальних температур у лотковому блоці.

У промислових інкубаторах біля яєць середньодобова температура може варіювати від 37 до 40 °С. Різниця температури в різних точках об'єму машини не залежить від номіналу налаштування регулятора температури і може досягати 3 °С в інкубаційних машинах перед переведенням яєць на виведення та 2 °С у вивідних інкубаторах перед вибіркою молодняку. Промислові інкубатори диференціюють температуру біля яєць, яка підвищується з віком ембріонів незалежно від налаштування регулятора температури. Зменшення номіналу налаштування викликає короточасне зниження температури всього блоку, але не усуває наявної різниці температур [10 – 16].

Інкубатори повинні автоматично підтримувати температуру повітря в діапазоні 36 – 39 °С, причому незалежно від налаштування ліміт і середньоквадратичне відхилення температур в об'ємі установки лотків

протягом доби не повинні перевищувати 1 і 0,3 °С. З рівнем температури повітря пов'язана тривалість інкубації. У діапазоні 36,6 – 38,5 °С – що вище температура повітря, то коротший термін інкубування. Час інкубування курячих яєць можна скоротити, принаймні на добу, але за рахунок зниження виведення.

Гіпотермія. Недостатній обігрів яєць затримує зростання та розвиток ембріонів на будь-якій стадії. Чим нижче температура і довша її дія, тим сильніше таке відставання. Якщо температура в інкубаторі нижче 35,5 °С, зародки не виживають до кінця інкубації.

Недогрівання яєць у першій половині інкубації надає більш сильний вплив на розвиток ембріонів, ніж у другій її половині. Відставання у зростанні та розвитку ембріональних оболонок простежується на всю контрольну добу при овоскопуванні яєць. Живі ембріони за масою та зовнішніми морфологічними ознаками молодші за свій фактичний вік.

При першому просвічуванні яєць обриси ембріонів добре видно, тому що вони ще не занурені в жовток і лежать біля самої шкаралупи, а судинна мережа жовтка розвинена слабо. При розтині яєць з кров'яними кільцями у більшості ембріонів виявляють анемію та прилипання до підшкаралупних оболонок. При другому просвічуванні яєць у більшості випадків білок не охоплений алантоїсом, ембріони відстають у розвитку, а при перекладі на виведення білок все ще не використаний і просвічується в гострому кінці яйця. Кордон повітряної камери рівна, на ній видно кровонаповнені судини алантоїса, а рухи голови та шиї непомітні.

Багато ембріонів, що загинули при вилупленні (задохліки), з ознаками: відставання в зростанні, часто неправильне положення, пізній наклъ шкаралупи, невикористаний білок, переповнений рідиною з домішкою крові кишечник, часто гіперемія нирок і нерівномірне забарвлення печінки, набряк з геморагіями [10 – 16].

При недогріві яєць у другій половині інкубації виявляють погано підготовлені (відставання у зростанні) висновку ембріони під час перекладу

виведення. При вибірці молодняку залишається багато ембріонів, які не проклюнули шкаралупу. Судини алантоїсу наповнені кров'ю. Жовток найчастіше втягнутий, густий, нерідко зеленого відтінку. Кишечник наповнений жовтковими масами, іноді зеленими через присутність жовчі. Серце збільшене і в'яле. Це зумовлено як розширенням камер, так і потовщенням стінок. Волокна міокарда стовщені, розміри ядер збільшені, судини розширені, спостерігаються крововиливи в епікарді. Такі зміни яскраво виражені у ембріонів на 15-17 добу.

У 19-21-добових ембріонів у серцевому м'язі спостерігаються процеси дегенерації цитоплазми та ядер гіпертрофованих елементів міокарда. У печінці – застійна гіперемія, тобто венозна мережа нерівномірно розширена, капіляри заповнені еритроцитами, жовткові судини розширено. Часто крововиливи по периферії органу та руйнування кров'ю печінкових балок. При гіпотермії частіше і сильніше, ніж у звичайних умовах, спостерігаються слизові набряки підшкірної клітковини, м'язи шиї та голови у багатьох випадках із значними крововиливами.

При гістологічних дослідженнях шийних набряків видно сильна роз'єднаність клітин і волокон, пухка сполучна тканина розпадається деякі безладно розкидані фібрили, лімфатичні судини розширені. У великих судин наявність псевдоеозинофілів, лімфоцитів та малодиференційованих клітин. При вивченні набряків шиї з геморагіями крім описаної картини на препаратах виявляються величезні скупчення еритроцитів у навколишньому м'язі строми, ділянки некрозу в м'язовій тканині.

Рідше при гіпотермії в останню добу інкубації спостерігають слизові набряки пупкового кільця та стінок алантоїсу. Набряки цих органів свідчать про сильний недогрів на 17-18 добу інкубації, коли кровоносна система алантоїсу ще функціонує і набряклість є наслідком застою в ній крові. Серед виведеного при недогріві яєць молодняку багато некондиційних – слабких, з дефектом пуповини, збільшеним животом та набряком пупкового кільця [10 – 16].

Так як при гіпотермії у ембріонів недорозвинена імунна система (тимус, фабрицієва сумка) збереження та зростання виведеного молодняку в перші дні вирощування можуть бути знижені. Найбільш сильний негативний вплив на виведення яєць, якість курчат і результати вирощування в ранній постембріональний період має гіпотермія в період з 6-ї по 11-ту добу інкубації [10 – 16].

1.2 Аналіз методів реалізації рішень з автоматизації для цільового об'єкту

Основною умовою, яка забезпечує розвиток зародка в яйці, є тепло. А критичним чинником, що впливає на виведення повноцінного добового молодняку, є температурний режим, суворо відповідний потребам зародка різних стадіях інкубації.

Традиційно при інкубації регуляція температурного режиму в камері здійснювалася переважно за рахунок примусового нагрівання/охолодження повітря механічними агрегатами (нагрівальними елементами та радіаторами охолодження). Продукти життєдіяльності зародка, наприклад, метаболічне тепло (метаболічна теплота), не розглядалися і не використовувалися, як системний ресурс, а лише як негативний фактор і побічний ефект, який необхідно долати, витрачаючи додаткові ресурси (електроенергію і воду), що підвищувало вартість виробництва. Крім того, таке примусове вирішення проблеми призводило до неминучого виникнення яскраво вираженої температурної зональності в камері і, відповідно, перегріву/переохолодження певної кількості яєць в камері, тобто. погіршення показників виведення яєць [17 – 21].

Що старше зародок, то більше вписувалося для обмінних процесів його життєдіяльності потрібно кисню і більше він виділяє вуглекислого газу та тепла. Всі ці показники знаходяться у прямій залежності. Технологія контролю якості повітря працює на основі розрахунку кількості

метаболічного тепла, що виділяється ембріоном (яйцем). І на підставі змін цього показника система керує повітрообміном в інкубаційній камері. Необхідна якість повітря (кількість кисню в повітрі) підтримується в камері шляхом автоматичного керування повітряними заслінками. Схема процесу повітрообміну зображено на рис. 1 [17 – 21].

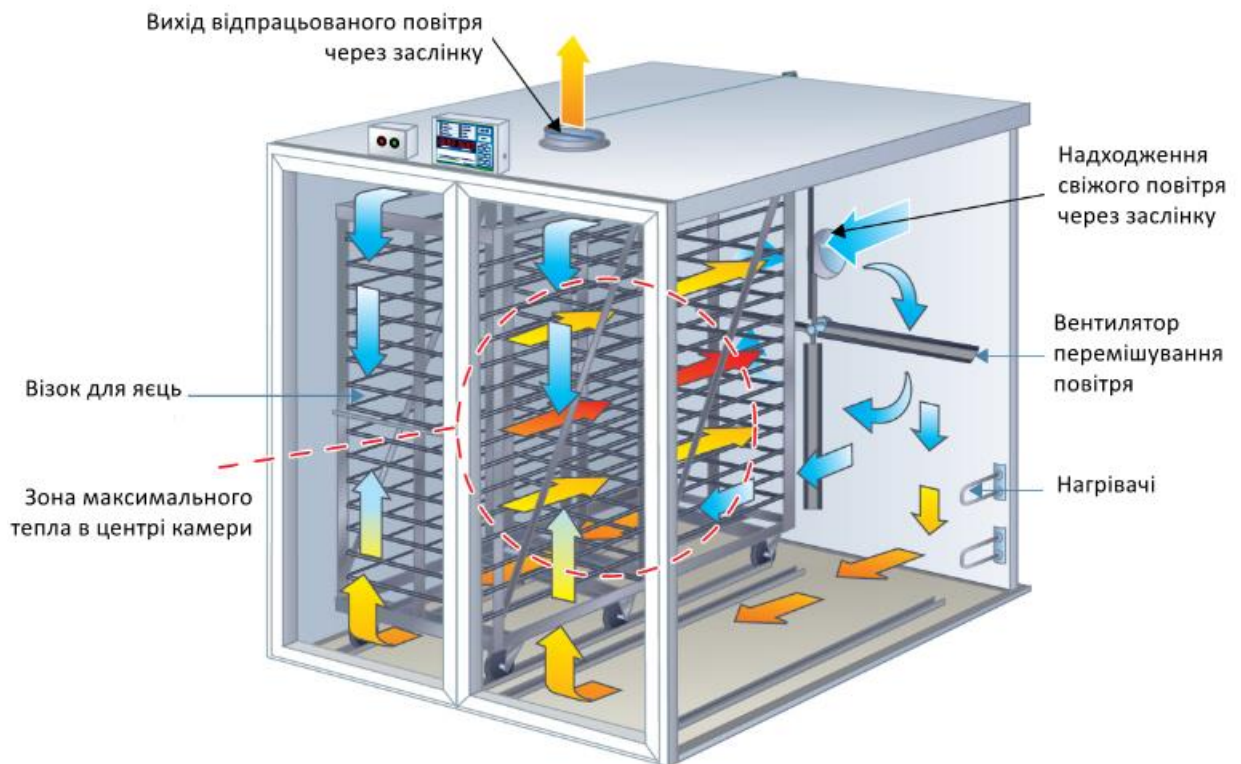


Рис. 1. Схема процесу повітрообміну в інкубаторі

Технологія також враховує якість повітряного середовища поза камерою – у приміщенні інкубаторію. При поганій вентиляції в приміщенні, а значить, недостатньому вмісті кисню в навколишньому повітрі або його підвищеній температурі, система підвищить швидкість повітрообміну в камері, збільшивши кут відкриття повітряної заслінки, тим самим дозволяючи підтримати необхідну ембріону кількість кисню і нівелюючи температурну зональність всередині інкубатора. Оскільки управління повітрообміном здійснюється в тісному зв'язку з управлінням температурним режимом в інкубаторі, що безпосередньо впливає на фізичні параметри

повітряного середовища – щільність повітря і, відповідно, кількість кисню, що міститься в ньому.

Температурний режим підтримується за допомогою технології контролю температури яйця. Вона дозволяє уникнути перегріву яйця при активному виділенні ним тепла у другій фазі інкубації і, особливо, у її фінальній стадії перед виведенням.

Охолодження відбувається за рахунок знімання метаболічного тепла зі шкаралупи, яка є природним теплообмінником (радіатором). Для яйця вона є радіатором охолодження, а для навколишнього повітря – нагрівальним елементом. Знімання тепла відбувається не безпосередньо зі шкаралупи, а з так званої теплової корони – оболонки, що утворюється навколо яйця, нагрітого метаболічним теплом повітря. Це відбувається за рахунок специфіки ендотермічного процесу випаровування води.

За допомогою технології контролю температури яйця система регулює рівень вологості повітряного середовища в камері. Частина води, що подається на вентилятор перемішування, випаровується відразу, а частина розбризкується і утворює дрібно дисперсійну суміш (водний туман), яка рівномірно розподіляється повітряним потоком по всьому об'єму камери. Мікро краплі води з повітря випаровуються в першу чергу там, де йде максимальне тепловиділення. Тобто безпосередньо біля яйця, тим самим рівномірно і своєчасно охолоджуючи всі яйця в камері як по її периметру, так і в центрі між рядами. Специфіка процесу випаровування дозволяє мінімізувати зональність. Так як з яєць, що виділяють більшу кількість тепла і нагрівають навколишнє повітря до вищої температури, знімання тепла відбувається з більшою інтенсивністю [17 – 21].

Використання метаболічного тепла ембріона для охолодження повітря при випаровуванні води дозволяє не тільки відмовитися від постійного використання радіаторів охолодження, але й досягти більшої гомогенності температури в камері, ніж при використанні радіаторів. У роботі системи радіатори використовуються тільки для аварійної роботи, у разі порушень

роботи системи зволоження або контролю температури, а також у разі критичного погіршення якості повітря за межами камери. Таким чином, витрата води суттєво зменшується і становить до 2 – 4 літрів на годину, що дозволяє зменшити витрати на подачу, охолодження та каналізацію води. Схема процесу теплообміну зображено на рис. 2 [17 – 21].

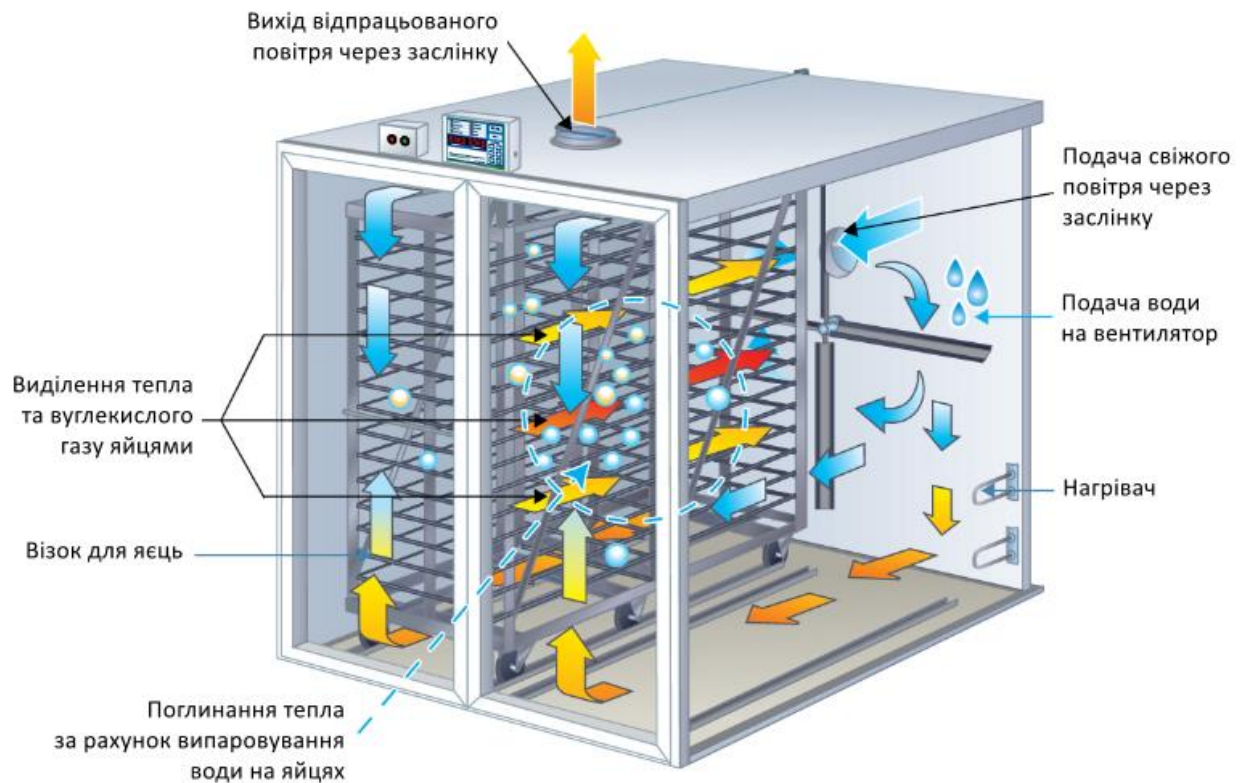


Рис. 2. Схема теплообміну в інкубаторі

Технологія контролю зональності в камері дозволяє уникнути переохолодження яйця в нижній частині камери в холодну пору року, особливо при недостатньо хорошій теплоізоляції камер від підлоги інкубаторію. Вона дозволяє зменшити різницю температур між верхньою та нижньою зонами камери з 1,0 – 1,5 до 0,2 – 0,3 гр. Це досягається за допомогою періодичного короткочасного включення нагрівачів. Тривалість, періодичність та ступінь нагріву регулюються технологією контролю зональності в камері відповідно до основних алгоритмів контролю вологості

та повітрообміну. Схема процесу вирівнювання температур зображено на рис. 3 [17 – 21].

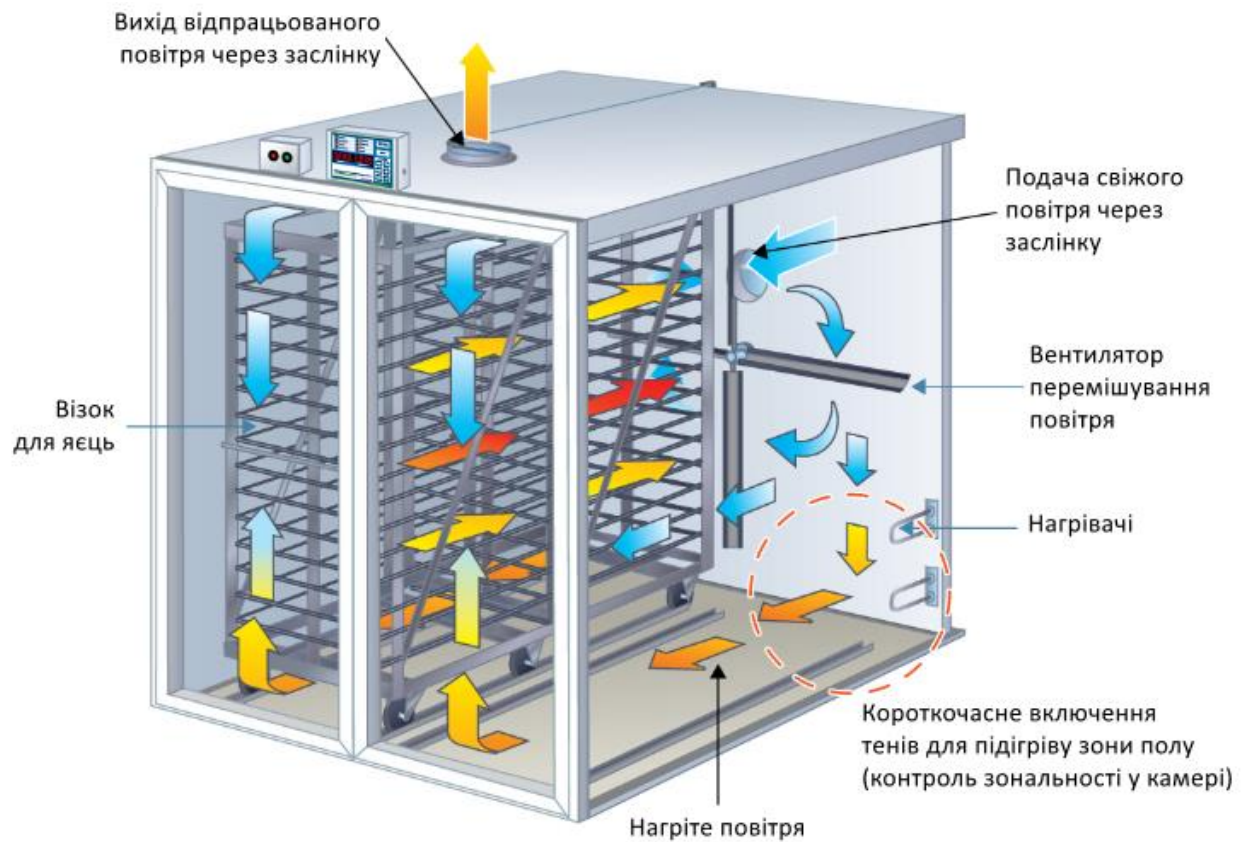


Рис. 3. Контроль зональності в камері інкубатору

За рахунок точного підтримання коректного температурного режиму на всіх стадіях інкубації технологія не лише дозволяє зменшити вікно виведення та збільшити відсоток виведення, а й підвищити якість та життєздатність виведеного молодняку, забезпечуючи сприятливий режим для формування всіх фізіологічних систем ембріона [17 – 21].

Інтелектуальна інкубаційна система здатна самостійно адаптуватися до особливостей інкубації яйця різних порід та видів птиці без кардинального переналаштування системи. Так як основним розрахунковим параметром у роботі системи є метаболічне тепло, то основний алгоритм системи не змінюється, а лише підлаштовується до нових вступних даних, що надходять від датчиків температури та вологості. Таким чином, система буде актуальна

і для новостворених надалі високопродуктивних кросів сільськогосподарських птахів.

Програмне забезпечення інтелектуальної інкубаційної системи дозволяє враховувати множинні вступні змінні, що залежать від змін температури та якості повітря. А також коригувати їх у всіх алгоритмах (контроль температури, контроль вологості та контроль якості повітря) у режимі реального часу. Розроблена система оперативно реагує на зміни умов, визначаючи пріоритетний на даний момент алгоритм управління та погоджуючи з ним роботу інших алгоритмів для ефективного та точного підтримання заданих оператором інкубаторію параметрів за температурним режимом та рівнем вологості, необхідних для конкретної партії яєць того чи іншого виду чи кросу птиці [17 – 21].

Покажемо це на кількох прикладах конкретних ситуацій у процесі інкубації.

Приклад 1. На етапі запуску камери з яйцем у режимі розігріву для виходу на задані параметри пріоритетним завданням є нагрівання та дотримання рівня вологості. Система працює нагрівачами. Заслонки повітряні закриті (вентилятори подачі повітря не активні). Подача води для зволоження починається при підйомі температури +36 оС.

Приклад 2. Після активізації обмінних процесів життєдіяльності ембріона пріоритетним завданням стає забезпечення яйця достатньою кількістю кисню за необхідної температури та вологості. Система зменшує потужність нагрівачів і відкриває заслінки, регулюючи рівень вологості та швидкість повітрообміну.

Приклад 3. У середині інкубації споживання кисню та виділення тепла яйцем збільшується. Для підтримки заданих оператором температурних параметрів пріоритетним завданням стає не нагрівання, а охолодження повітря у камері, за дотримання заданих параметрів вологості. Система відключає нагрівачі, збільшує кут відкриття заслін для того, щоб прискорити повітрообмін. А також збільшує подачу води на вентилятор перемішування,

для того, щоб при збільшеній інтенсивності випаровування, що дозволяє охолодити повітря до заданої температури, і збільшеної швидкості повітрообміну рівень вологості не падав (оскільки волога видаляється з камери разом з відпрацьованим повітрям), а залишався відповідно із заданим значенням.

Приклад 4. У другій половині інкубації основними завданнями залишаються підтримка заданих параметрів повітря (температури, вологості та насиченості киснем). Але інкубаційна камера – відкрита система, а не автономний замкнутий простір. На стан повітряного середовища всередині камери впливають зовнішні чинники. Наприклад, зниження температури в приміщенні інкубаторію і, як наслідок, подача в камеру холоднішого повітря. Це може відбуватися при великій амплітуді добових коливань температури або форс-мажорних обставин, спровокованих людським фактором (наприклад, залишені відчинені двері інкубаторія). У цьому випадку уникнути зниження температури всередині камери можна ввімкнувши нагрівачі або зменшивши кут нахилу заслінок, тим самим зменшивши швидкість повітрообміну та швидкість втрати. Із двох способів система визначить пріоритетним той, який не лише вирішить завдання, а й дозволить заощадити енерговитрати. Система зменшить кут відкриття повітряних заслінок, а також скоротить подачу води, щоб знизити випаровування, а отже, знімання метаболічного тепла. Таким чином, охолодження повітря в камері залишиться на заданому рівні. Хочеться підкреслити, що уповільнення повітрообміну не призведе до погіршення якості повітря, тому що поступає в камеру ззовні більш холодне повітря щільніше і в меншому обсязі кількість атомів кисню буде колишнім, тобто достатнім. І тільки при вичерпанні всіх фізичних можливостей регулювання швидкості повітрообміну та рівня вологості система увімкне нагрівачі [17 – 21].

При підвищенні температури у приміщенні інкубаторія система організує процес охолодження повітря у камері зворотним чином –

прискорить повітрообмін та збільшити подачу води для інтенсифікації випаровування. А в екстреному випадку увімкне радіатори охолодження.

Як показує останній приклад в інтелектуальній інкубаційній системі передбачені дублюючі алгоритми та можливості, що дозволяють підвищити надійність роботи інкубатора в різних умовах навіть за форс-мажорних обставин чи помилок, спровокованих людським фактором. Система також оснащена сигналізацією, що не відключається, сповіщає технічний персонал про необхідність зробити дії зі стабілізації роботи, недоступні для самої системи. Такі, наприклад, як усунення порушення електроживлення або підведення води, механічне пошкодження цілісності камери та інше [17 – 21].

1.3 Реалізація системи автоматичного керування та моніторингу мікрокліматичних параметрів інкубатору

Технологія інкубації – складний процес. Для досягнення необхідного результату САУ має забезпечити задані режими інкубації, що характеризуються такими параметрами, як температура, вологість та концентрація вуглекислоти.

Найбільше впливає на результати інкубації температура повітря. При постійному протягом періоду інкубації дії виведення курчат можна отримати при температурі від 35,6 до 39,7 °С. Результати інкубації (відсоток виведення та якість молодняку), вкрай низькі на межі зазначеного інтервалу, швидко покращуються при наближенні температури до середнього значення. Ембріони добре пристосовані до зниження температури повітряного середовища. Падіння температури до 20 °С протягом доби на будь-якій стадії інкубації не призводить до помітного зниження виведення. Існує діапазон температур повітря, всередині якого варіації температури не впливають на виведення: з першого по восьмий день інкубації – нижня межа близько 37,5 °С, а надалі близько 37,2 °С; верхня межа – не більше 38,3 °С на 18-й день інкубації і 38,7 °С перед вибіркою курчат [21 – 24].

Ще один значущий параметр при інкубації – відносна вологість повітря: потрібно підтримувати значення параметра не нижче 40 і не вище 70%. Висока відносна вологість повітря збільшує небезпеку цвілевого ураження інкубаційних яєць, що призводить до різкого зростання числа «тумаків». При низькій вологості повітря на початку інкубації яйця втрачають багато води та підвищується смертність зародків.

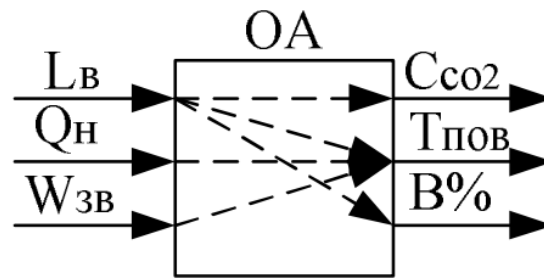
Концентрація CO₂, згідно з технологічними вимогами, не повинна перевищувати 0,5 % при порційному завантаженні інкубаційної машини та 1,0 % при одноразовій. У похідних інкубаторах концентрація CO₂ може досягати 2%.

При постійному, протягом усього інкубаційного періоду, впливі концентрації вуглекислого газу, що перевищують 0,5%, пригнічуються зростання та розвиток ембріонів. Виведення знижується приблизно на 15%, якщо з першого дня інкубації підтримувати концентрацію CO₂ на рівні 1% (контроль – 0,3%). При 5% CO₂ смертність ембріонів сягає 100%.

У вивідний період висока концентрація вуглекислого газу відіграє позитивну роль ембріогенезі: вона синхронізує процес накльовування і виведення, на 1 – 2% збільшує вивідність, але головне, забезпечує кращу якість добового молодняку, оскільки атмосфера, насичена вуглекислим газом пригнічує рухову активність курчат, зберігає масу, зменшує травматизм.

Технологічний ефект процесу інкубації обумовлений якістю яєць, що закладаються в інкубаційну шафу, і рівнем управління процесом інкубації. Виробничий досвід показує, що під час виконання технологічних вимог виведення курчат становить 80...81 % кількості закладених в інкубаційну камеру яєць [21 – 24].

На підставі аналізу технологічних параметрів функціонування інкубатору сформуємо загальну концепцію автоматизації – рис. 4.



Вхідні фактори: L_v – вентиляція; Q_n – обігрів; $W_{зв}$ – зволоження; Вихідні фактори: C_{co_2} – концентрація CO_2 ; $T_{пов}$ – температура повітря в приміщенні; $B\%$ – вологість повітря в приміщенні

Рис. 4. Концепт-схема автоматизації мікрокліматичних параметрів в інкубаторі (ОА) [21 – 24]

Скориставшись методом наукового пошуку релевантних публікацій в актуальному хронометричному горизонті встановимо сучасні можливості реалізації системи автоматичного керування мікрокліматичними параметрами інкубації пташиних яєць.

У системі штучної інкубації все середовище, таке як температура, вологість і вентиляція, контролюється та контролюється контролером, що є ключовим завданням у процесі інкубації. Загальна концепція керуваності параметрами інкубації пташиних яєць представлена на рис. 5.

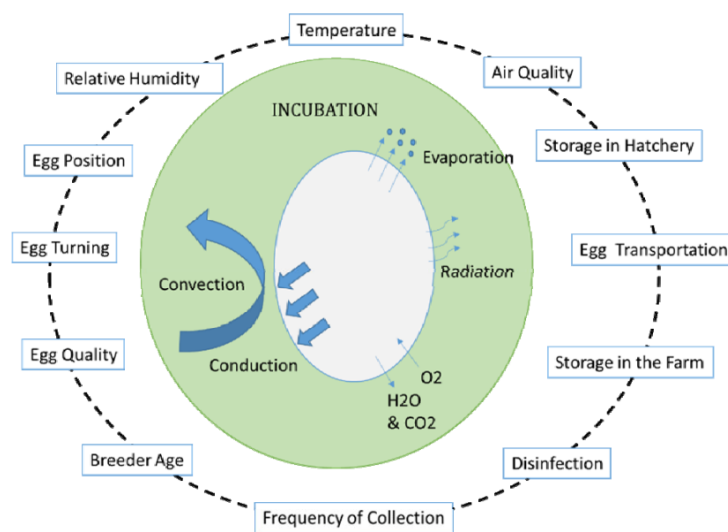


Рис. 5. Концепт-схема керуваності параметрами інкубації пташиних яєць [21

Відповідно до даних, наведених на рис. 5, для досліджуваного об'єкту автоматизації (інкубатору пташиних яєць) необхідно забезпечити контроль наступних параметрів [21 – 24]:

1. Якість повітря (*Air quality*): під час процесу інкубації в інкубаторі слід підтримувати достатній рівень кисню. Для цього слід використовувати вентилятори для введення та виведення повітря для регулювання рівня кисню в інкубаторі. Це контролюється запропонованим способом за допомогою контролера.
2. Перевертання яєць (*Egg turning*): найважливішою частиною інкубації є перевертання яєць, протягом 1-го тижня ембріон не має системи кровообігу, тому обертання яєць має вирішальне значення, це сприяє правильному розвитку додаткової ембріональної оболонки, яка, у свою чергу, допомагає курчаті вискочити без будь-яких зусиль. проблема. Для правильного розвитку курчати, яйця необхідно перевертати кожні 2 години протягом 24 годин. Обертання яйця також допомагає передавати поживні речовини жовтка ембріону через підзародкову рідину.
3. Вологість і випаровування (*Humidity and evaporation*): швидкість випаровування води залежить від вологості, наявної в інкубаційному блоці. Важливим фактором інкубації є підтримання метаболічного балансу, тому загальна втрата ваги не повинна перевищувати 12-13%. У перші 17 днів рівень відносної вологості повинен підтримуватися на рівні 65%, а в останні чотири дні рівень відносної вологості повинен бути близько 70% – 75%.
4. Температура (*Temperature*): температура є найважливішою частиною, і вона відіграє ключову роль у системі інкубації. Для гарного розвитку ембріонів і виводимості температуру необхідно підтримувати на оптимальному рівні. Протягом

перших 17 днів температуру слід підтримувати в межах 37,5 °С – 38 °С. Протягом останніх чотирьох днів температуру слід підтримувати на рівні 36,5 °С – 37,5 °С. Це можна зробити за допомогою системи примусової інкубації повітря для підтримки температури на оптимальному рівні.

5. Дезінфекція (*Disinfection*): дезінфекцію слід проводити перед тим, як зберігати яйця в інкубаторі, це запобіжить розвитку грибків, бактерій, дріжджів і вірусів, які можуть завдати серйозної шкоди зростаючому ембріону. Цього можна досягти, використовуючи дезінфікуючу рідину перед розміщенням яєць в інкубаторі.

У публікаціях [21 – 24] запропонована реалізація інкубатора на базі технології *IoT* (інтернету речей) та контролерах екосистеми *Arduino* з можливістю реалізації потокового контролю засобами персонального зв'язку (смартфоном) з використанням системи *NodeMCU* – рис. 6.

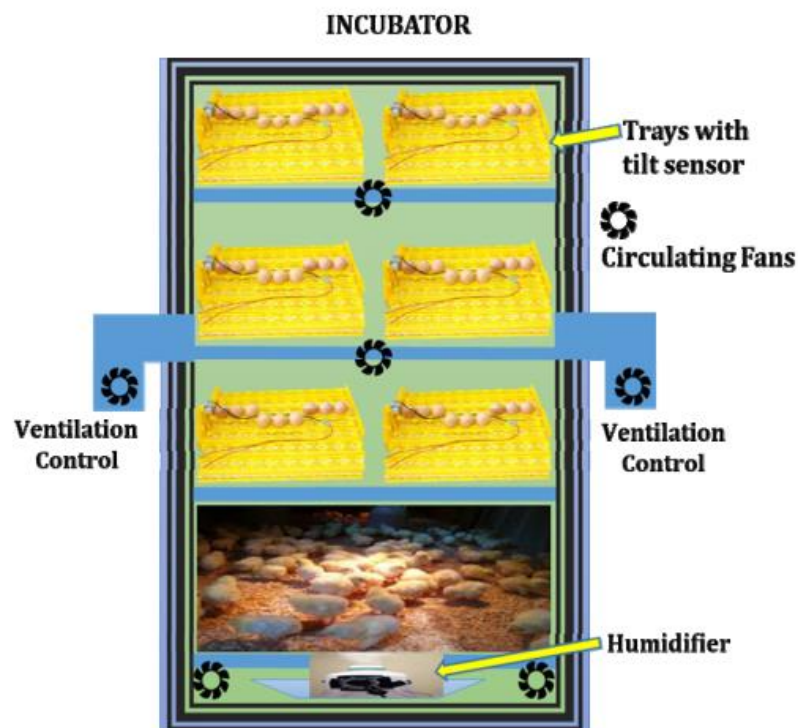


Рис. 6. Реалізація інкубатора для пташиних яєць [21 – 24]

Електронні матеріали включають датчик температури, датчик вологості, датчик світла, датчик нахилу яйця, датчик рівня рідини, мікроконтролер, двигун постійного струму, що обертає яйця, зволожувач повітря, водяний насос, вузол, *MCU*, лампочку, РК-дисплей, *SMPS* та *UPS*.

На рис. 6 показана конструкція інкубатора з необхідною циркуляцією повітря та розміщенням лотків для яєць в установці. На рис. 7 показано електричні з'єднання інкубатора [21 – 24].

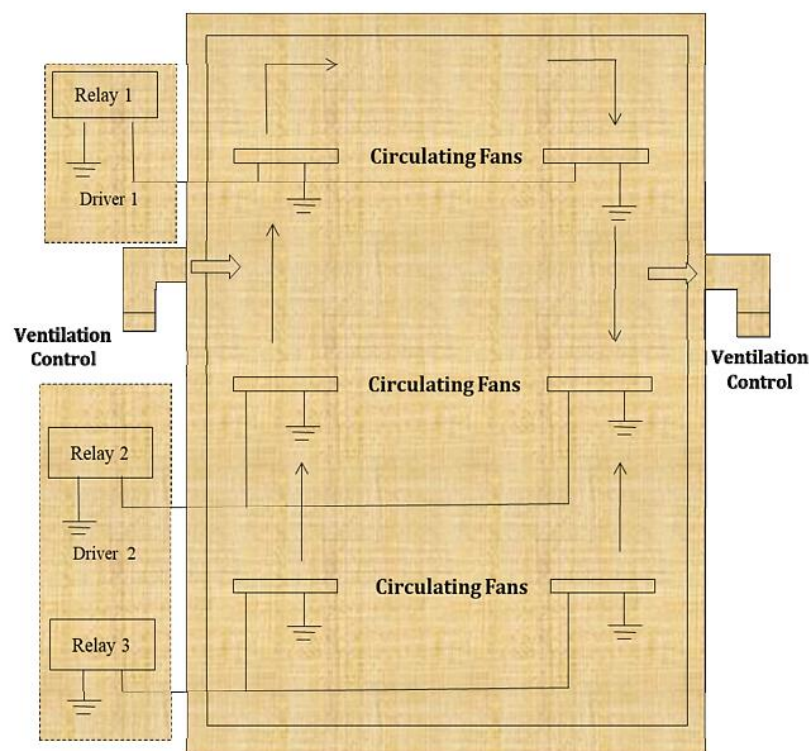


Рис. 7. Електрична схема інкубатора [21 – 24]

Інкубація примусового повітря та нерухомого повітря може бути досягнута шляхом керування вентилятором та вентиляційним отвором за допомогою контролера. Корпус розроблений таким чином, щоб зберігати яйця в теплі та підтримувати рівномірну температуру в усьому інкубаторі, це досягається за допомогою листів пінополістиролу та алюмінієвої фольги. У

пропонованому способі з метою економії місця і коштів інкубатор і брудер знаходяться в одному агрегаті.

Запропонований метод розділений на три частини (рис. 8) [21 – 24]:

- перша частина показує підключення датчиків інкубатора;
- друга частина показує підключення контролера до датчика, дисплея, блоку живлення та блоку драйвера;
- третя частина – це блок драйверів, де контролер підключений через релейний модуль, який, у свою чергу, контролює конкретні параметри, температуру, вологість, вентиляцію, нахил яєць тощо. Третя частина також включає доступ до Інтернету через блок *NodeMCU* на смартфоні.

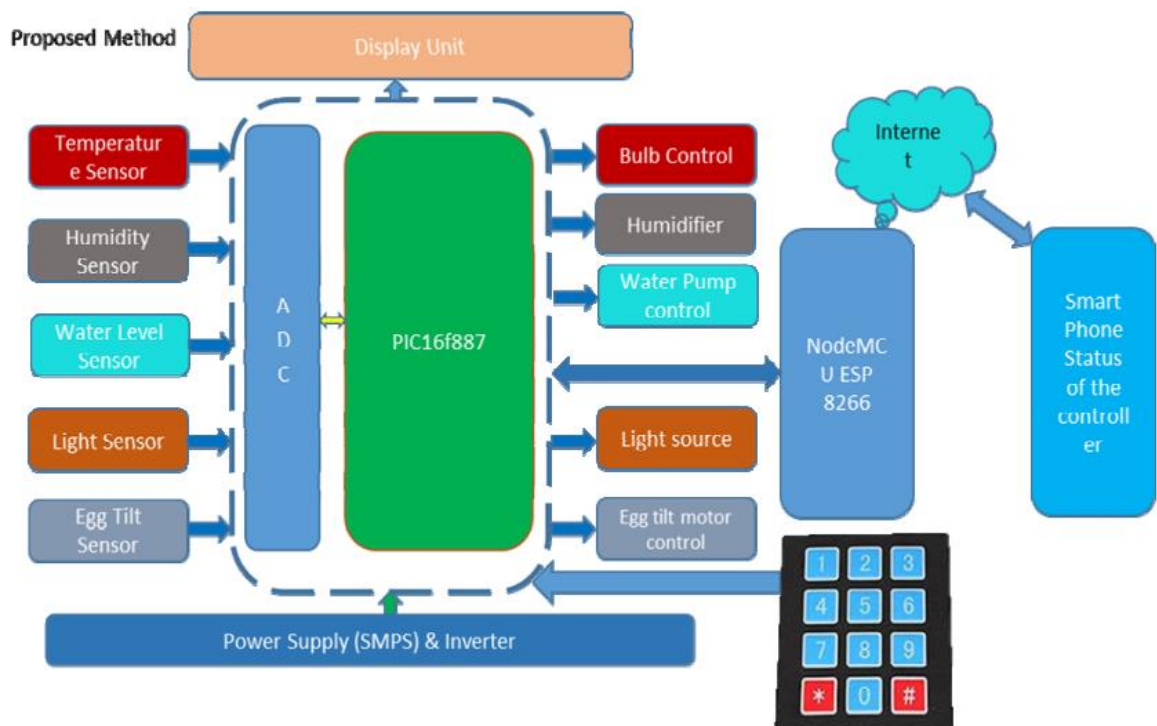


Рис. 8. Система автоматизації інкубатору [21 – 24]

Згідно з наведеною на рис. 8 [21 – 24] схеми, температура і вологість підтримуються за допомогою DS18B20 і DHT11 відповідно. Інформація про сигнал надходить на аналоговий вхід PIC16f887. Тут датчик рівня води

використовується для підтримки рівня води в зволожувачі, який призначений для підтримки в інкубаторі заданого рівня вологості. Температура в установці підтримується за допомогою лампи розжарювання. Датчик світла використовується тут для перевірки стану освітлення незалежно від того, чи джерело світла увімкнено чи вимкнено, щоб подолати проблеми, пов'язані з несправністю лампочки під час інкубації. Кут лотка для яєць підтримується за допомогою двох стулок з обох боків лотка. Кожен сам подбає про кут повороту двигуна в інкубаційному блоці.

Потік дій відбувається від 1-го блоку до 2-го, а потім до 3-го блоку, щоб завершити весь процес потоку.

На РК-дисплеї відображаються такі характеристики, як задані значення температури, вологості, швидкості керування вентиляційним вентилятором, рівня води в лотку та контролю обертання яєць [21 – 24]:

1. На ринку є два основних типи датчиків температури, але характеристики відрізняються залежно від застосування. Один – контактний датчик температури, а інший – безконтактний датчик температури. Датчики контактного типу повинні контактувати з об'єктом, що підлягає вимірюванню, тоді як датчики безконтактного типу сприймають енергію випромінювання в системі, яка випромінюється об'єктом. Можна використовувати термічно чутливий резистор, званий термістором, який поділяється на два типи. Один має позитивний температурний коефіцієнт, а інший – негативний температурний коефіцієнт. При від'ємному температурному коефіцієнті опір знижується по відношенню до підвищення температури так само, як ми маємо позитивний температурний коефіцієнт, у цьому опір зростає по відношенню до підвищення температури. Датчик температури DS18B20 використовується в металевому провіднику, який може працювати в паразитному режимі живлення, що дозволяє датчику працювати без локального джерела живлення. Ця паразитна

потужність корисна для програм, де потрібен дистанційний моніторинг температури.

2. Датчик температури: DS18B20 використовується для підтримки температури в установці. Тут використовуються два датчики, один у верхній частині, а інший у нижній частині пристрою, які рівномірно регулюють тепло.
3. Зволожувач: HSM-20G використовується для підтримки вологості в установці. Тут використовуються два датчики, один у верхній, а інший у нижній частині пристрою, які рівномірно регулюють вологість.
4. Датчик нахилу яєць: Геркон використовується для підтримки нахилу яєць у лотках. Є два геркони, які з'єднані протилежно від лотка, що вказує на нахил лотків за допомогою логічної операції.
5. Датчик рівня води: три стрижні з нержавіючої сталі використовуються для перевірки рівня води. Один для верхнього рівня і один для нижнього рівня. Третій призначений для посилення на обидва рівні.
6. Контролери: PIC16F887 (*Arduino*) і ESP 8266 використовуються для дистанційного керування всім пристроєм користувачем. Мікроконтролер використовується для керування всіма параметрами в інкубаторі, ESP8266 (*NodeMCU*) використовується для дистанційного керування та моніторингу пристрою за допомогою програми *Blynk*.
7. Вентиляційний блок: циркуляція повітря контролюється шістьма вентиляторами постійного струму, які синхронізуються з температурою. Контролер піклується про циркуляцію повітря, відстежуючи температуру та рівень вологості в установці.

Схема з'єднань автоматизованого інкубатору розроблена за допомогою інструменту *Proteus Design*. Повне моделювання виконується за допомогою цього інструменту, а вхідні дані змінюються в симуляторі, щоб перевірити

дії, виконані контролером. Кодування виконується за допомогою програмного забезпечення *MP-Lab* з використанням с-коду – рис. 9 [21 – 24].

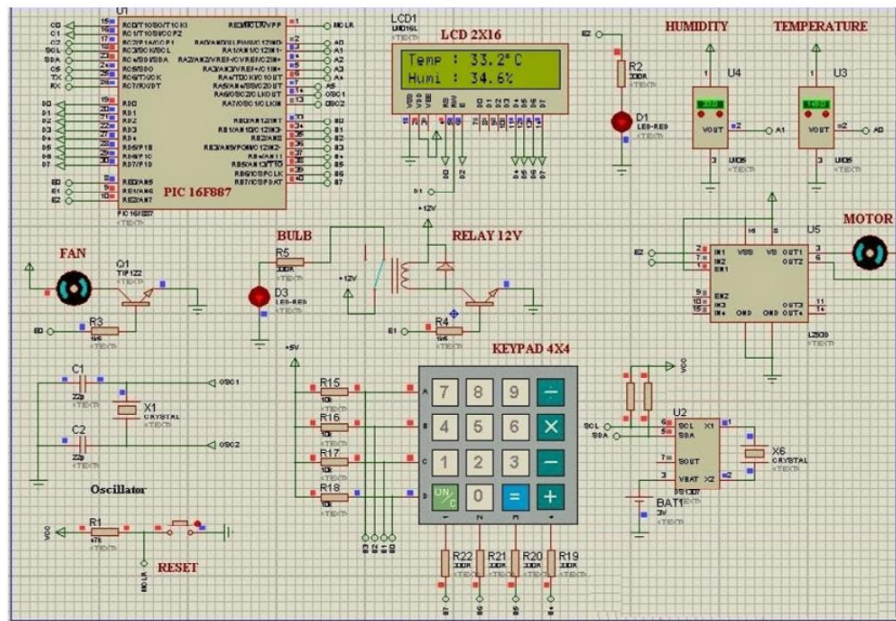


Рис. 9. Схема з'єднань автоматизованого інкубатору [21 – 24]

Алгоритм функціонування досліджувано способу автоматичного керування інкубатором наводиться на рис. 10 [21 – 24].

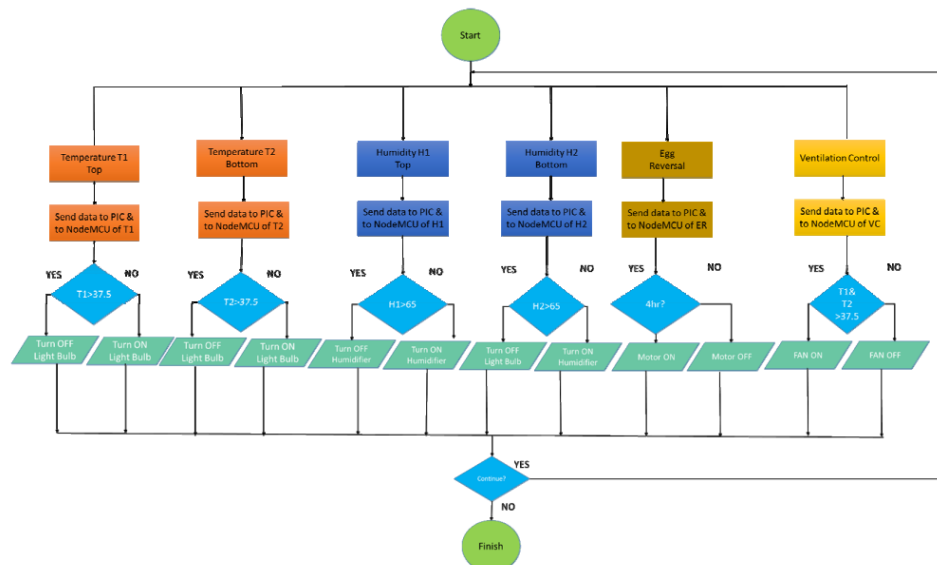


Рис. 10. Алгоритм функціонування досліджувано способу автоматичного керування інкубатором [21 – 24]

Реалізація службового процесу керування досліджуваною системою інкубатору за допомогою персонального засобу зв'язку (смартфону) за посередництва технології *NodeMCU* наводиться на рис. 11 [21 – 24].



Рис. 11. Скрін службової програми для потокового контролю засобами персонального зв'язку (смартфоном) з використанням системи *NodeMCU* [21 – 24]

Таким чином, засобами наукового пошуку, встановлено, що наразі для реалізації сформованої мети та задач поточного дослідження перспективне використання технологій *IoT* в екосистемі *Arduino*.

Аналогічні актуальні рішення з автоматизації процесів інкубації пташиних яєць наводяться і в наукових публікаціях [25 – 30] – рис. 12 – 14.

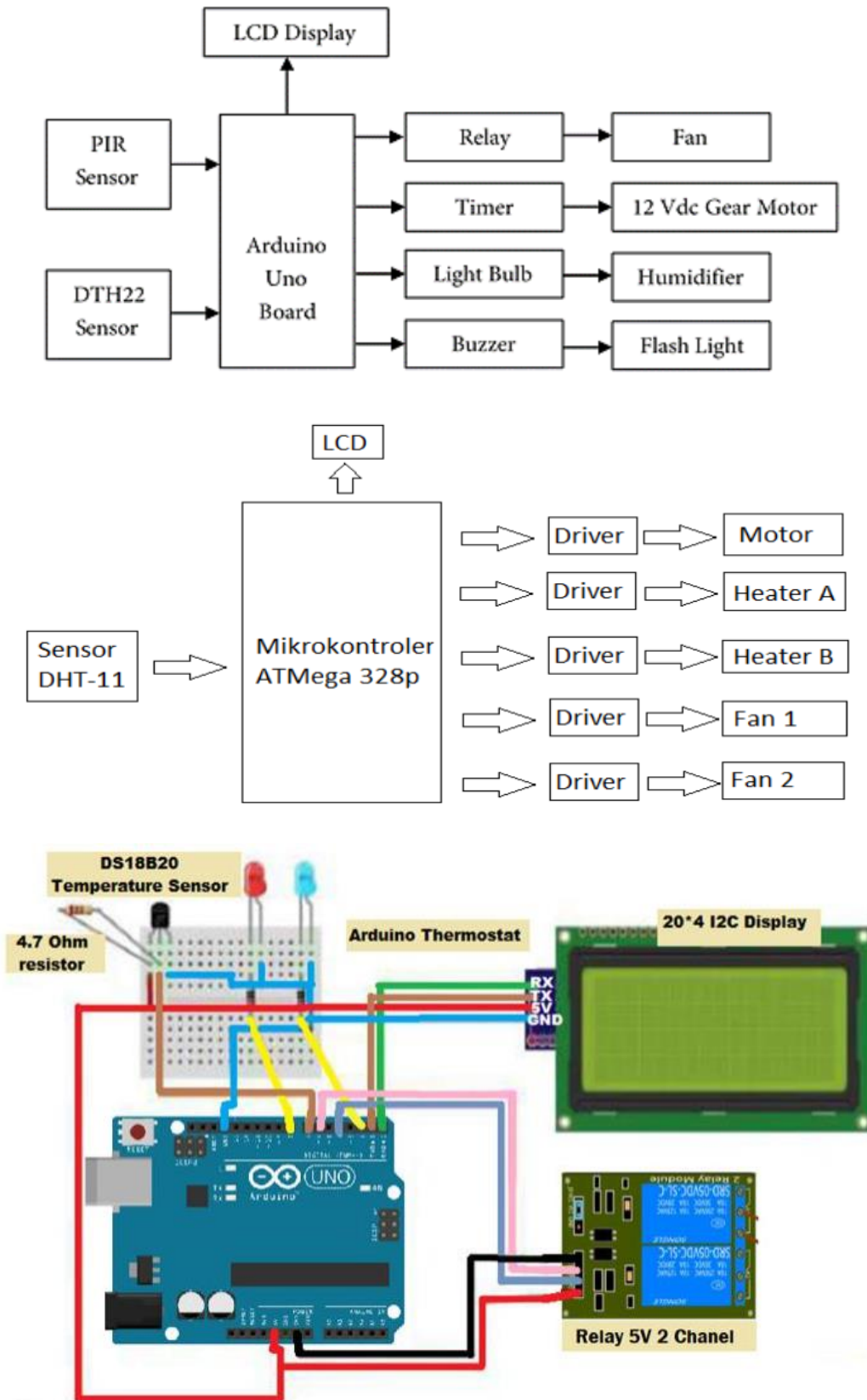


Рис. 12. Варіант №1 реалізації контролерів екосистеми *Arduino* для автоматизованого керування технологічними процесами інкубації пташиних яєць [25 – 30]

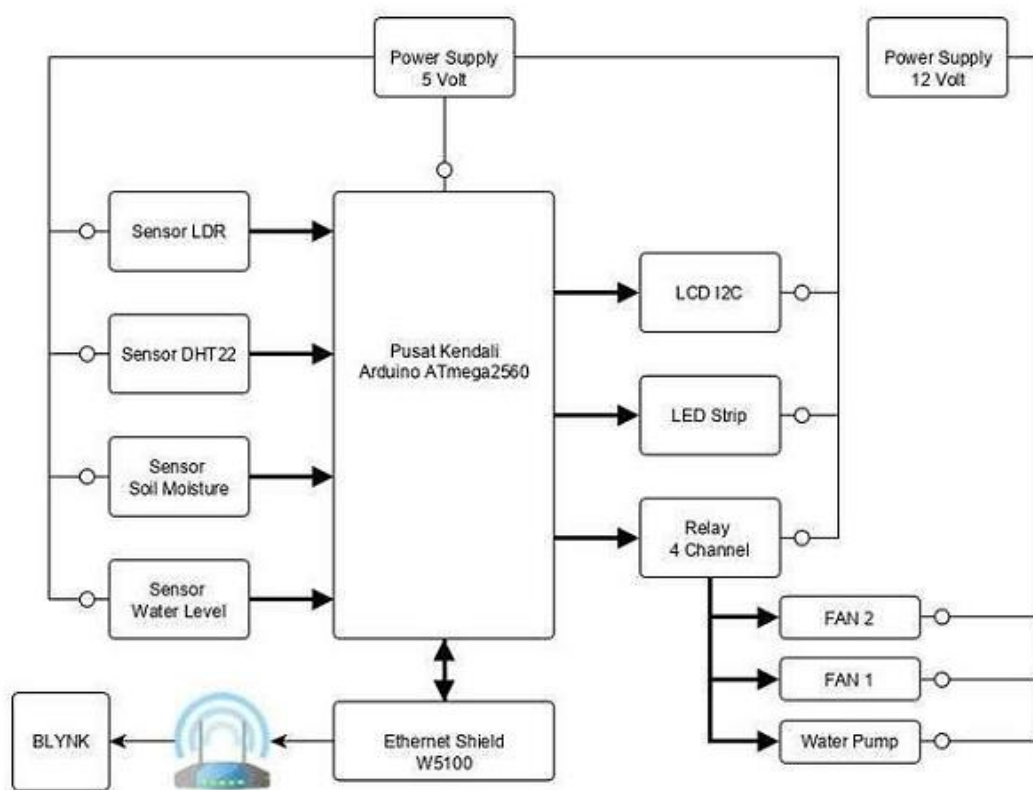
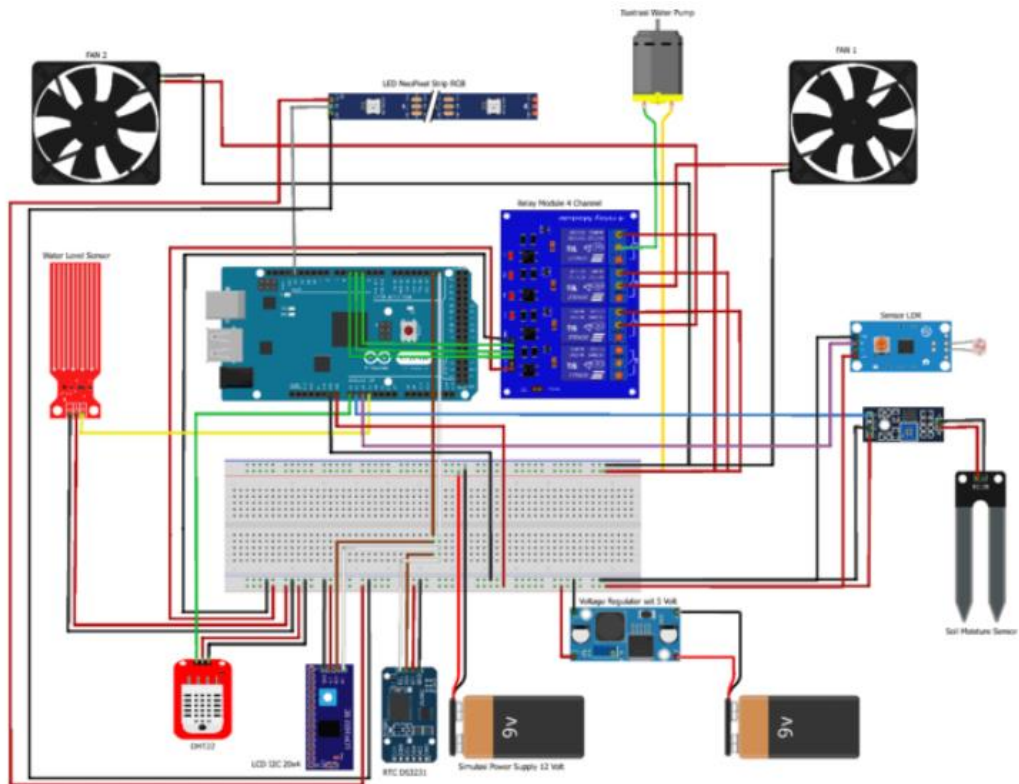


Рис. 13. Варіант №2 реалізації контролерів екосистеми *Arduino* для автоматизованого керування технологічними процесами інкубації пташиних яєць [25 – 30]

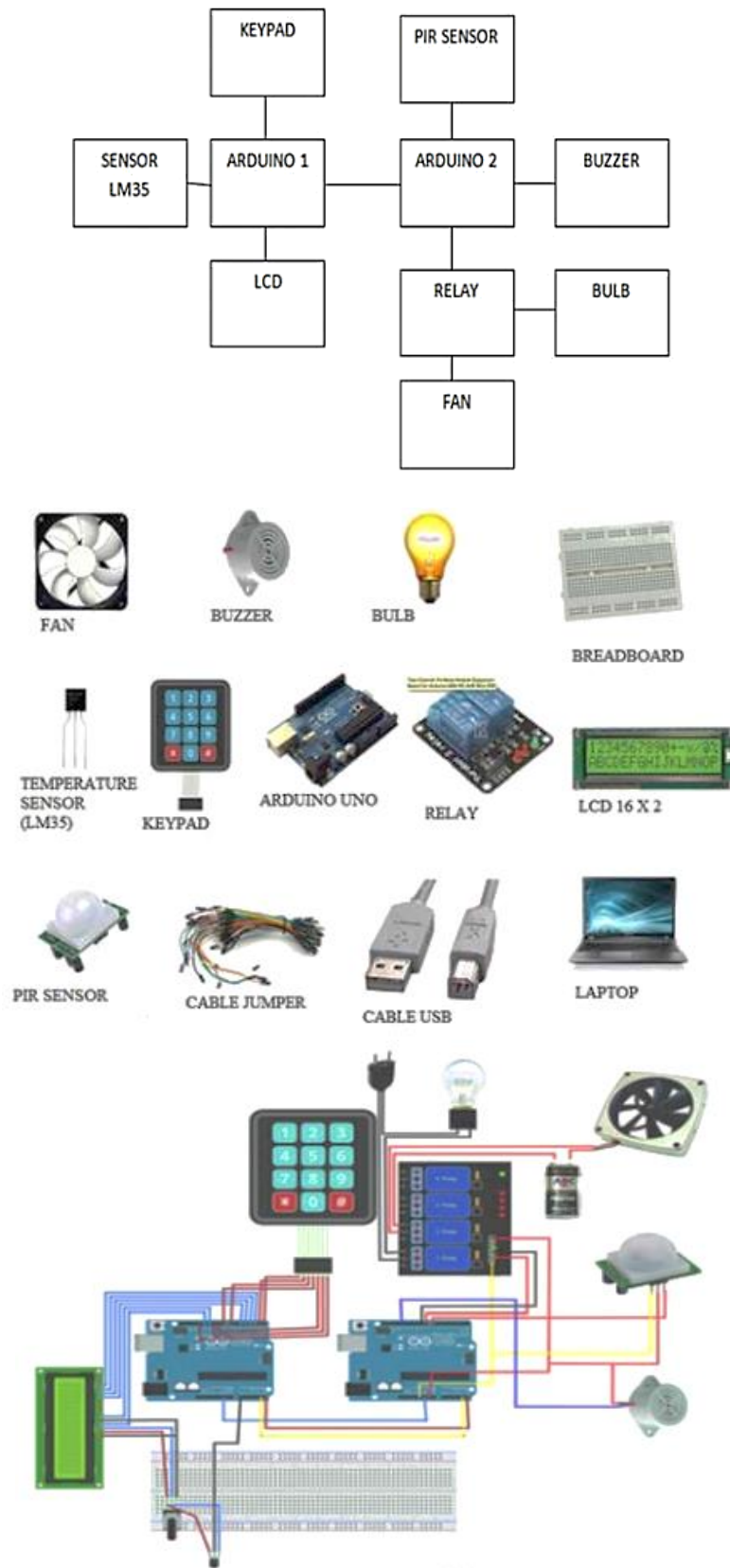


Рис. 14. Варіант №3 реалізації контролерів екосистеми *Arduino* для автоматизованого керування технологічними процесами інкубації пташиних яєць [25 – 30]

Медіанна узагальнена блок-схема використання контролерів екосистеми *Arduino* для автоматизованого керування технологічними процесами інкубації пташиних яєць наводиться на рис. 15 [25 – 30].

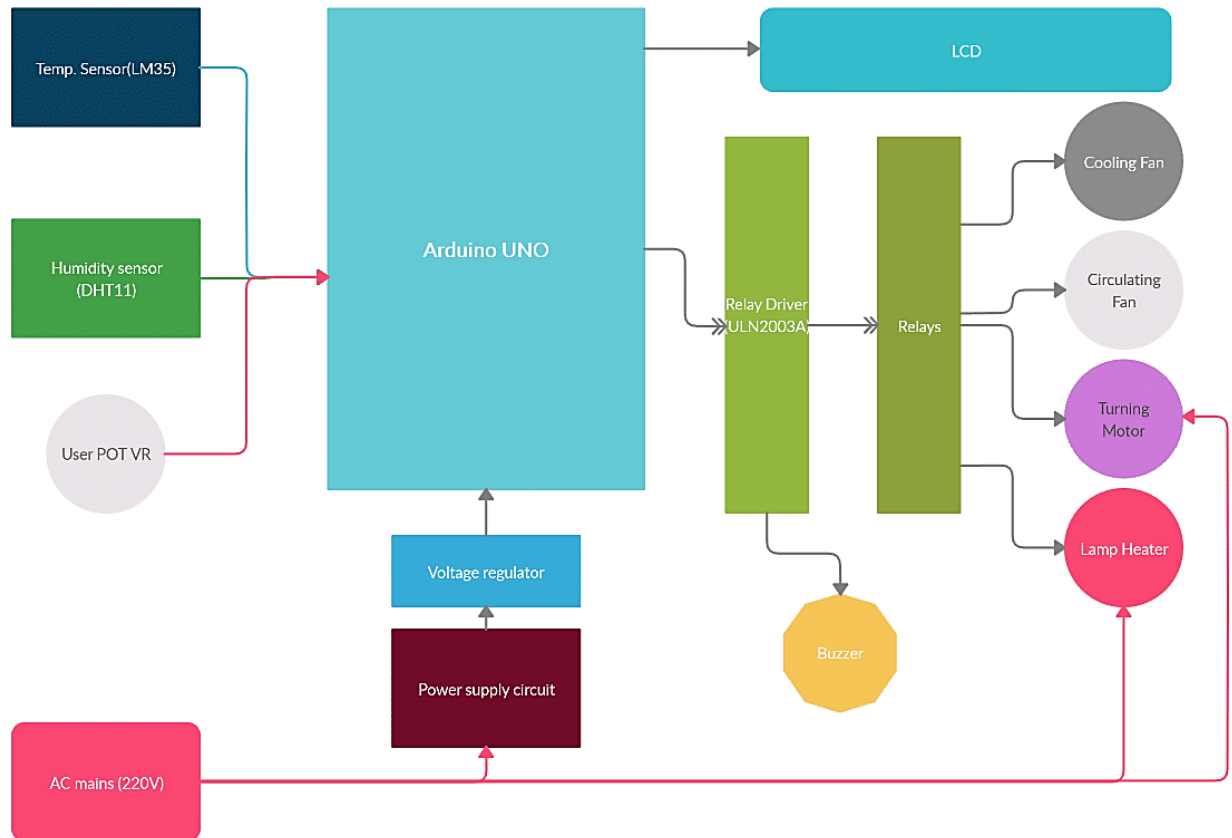


Рис. 15. Медіанна узагальнена блок-схема використання контролерів екосистеми *Arduino* для автоматизованого керування технологічними процесами інкубації пташиних яєць [25 – 30]

Таким чином, встановлені актуальні можливості реалізації системи автоматичного керування та моніторингу мікрокліматичних параметрів інкубатору, які пропонують застосовувати контролери та датчики в екосистемі *Arduino*.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Функціональна і структурна схеми системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі

Використовуючи нормативний підхід, визначений у профільних публікаціях [31 – 34] сформуємо функціональну систему автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі.

Основний процес інкубації відбувається у інкубаційних камерах, обладнаних поворотними лотками, у яких укладаються яйця. Інкубатор є кліматичною шафою з теплоізоляційними стінками, виконаними з рами (сухе дерево), фанерованої зовні листовою пластмасою, всередині пінопласт, а зсередини – оцинкованим залізом, що має два вентиляційні отвори (припливне – на задній стінці і витяжне – в стелі).

Шафа обладнана вентилятором, що забезпечує рівномірне перемішування повітря та рівномірність температурно-вологісних полів, а також надходження свіжого повітря в камеру через припливний отвір та викид забрудненого повітря.

Для підтримки необхідних параметрів мікроклімату в інкубаторі передбачені системи обігріву та зволоження (рис. 16). У систему обігріву входять електронагрівальні елементи.

Технологічний ефект процесу інкубації обумовлений якістю яєць, що закладаються в інкубаційну шафу, і якістю управління процесом інкубації. Виробничий досвід показує, що під час виконання технологічних вимог виведення курчат становить 80–81% кількості закладених в інкубаційну камеру яєць.

Обмін повітря в інкубаторі повинен забезпечувати видалення вуглекислого газу для збереження кисневого балансу.

Повітрообмін в інкубаторі забезпечується вентилятором із постійною частотою обертання. Розмір повітрообміну регулюється вручну установкою

положень заслінок. Заслінки на припливному та витяжному отворі пов'язані між собою тягами таким чином, щоб зміни положення однієї заслінки викликало таке саме положення іншої заслінки [31 – 34].

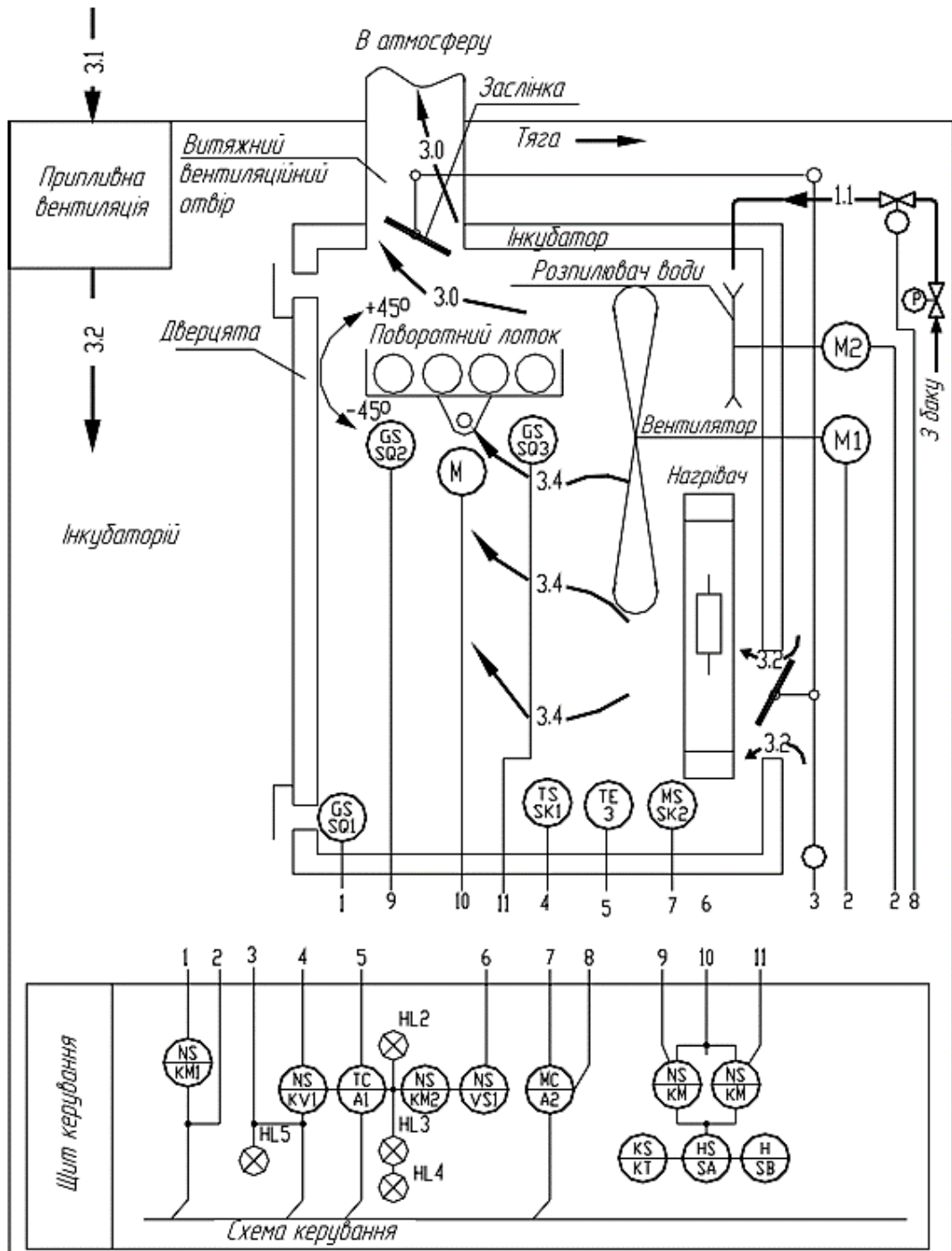


Рис. 16. Функціональна схема системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі

Першого дня інкубації встановлюється мінімально допустимий повітрообмін. На 8 – 10-й день повітрообмін збільшується. Технологічні вимоги до режиму інкубації представлені в табл. 1 [31 – 34].

Табл. 1. Технологічний регламент процесу інкубації пташиних яєць

Контрольований параметр	Значення, од. вим.
Температура повітря	35,6-39,7 °С
Вологість повітря:	
– в інкубаційній шафі:	40-60%
– у вивідній шафі:	50-80%
Концентрація вуглекислоти:	
– в інкубаційній шафі:	0,5%
– у вивідній шафі:	2%

Вентилятор увімкнений постійно в процесі інкубації птиці.

При відчинених дверях вентилятор та нагрівальні елементи відключаються кінцевим вимикачем SQ1 (Рисунок 17).

Процес інкубації яєць відбувається з виділенням тепла та вуглекислого газу інкубаційним яйцем. Температура яєць є важкодоступною для контролю, тому як регульована величина приймається температура в камері.

Регулююча дія в інкубаційній шафі здійснюється електронагрівачами, потужність яких можна визначити після вирішення рівняння теплового балансу та проведення аналізу впливів, що обурюють.

При стабілізованій температурі повітря, що всмоктується в інкубатор, основним збурюючим впливом є тепловиділення яєць. У перші дні інкубації тепловиділення настільки малі, що їх не вистачає на випаровування вологи, що виділяється, і тепло, необхідне для зміни агрегатного стану води, вилучається частково або повністю з навколишнього середовища. Лише на сьому добу (для курей) або 11–12 добу (для качок, гусей) випаровування вологи може відбуватися за рахунок власного біологічного тепла, і з цього моменту інкубаційні яйця можуть віддавати надлишки теплоти повітрю. Таким чином, потужність нагрівальних елементів розрахована забезпечення

температурного режиму в початковий період інкубації. На сьому добу (для курей) або 11–12 добу (для качок, гусей) повітрообмін в інкубаторі збільшується перестановкою заслінки, що дозволяє відводити надлишки тепла на підігрів повітря, що додатково надійшло всередину, і «полегшити» роботу регулюючого приладу.

Температурним режимом керується за допомогою трипозиційного терморегулятора.

В автоматичному режимі, при зниженні температури в камері, терморегулятор (рис. 17) посилає сигнал на відкриття тиристора VS1. Електрична напруга дорівнює половині номінальної, надходить на обігрівальні елементи ЕК1 та ЕК2. При подальшому зниженні температури терморегулятор подає напругу на котушку магнітного пускача КМ2, який своїми контактами шунтує тиристор та подає на нагрівальні елементи повну напругу. При підвищенні температури в шафі спочатку відключається КМ2, а потім надсилається сигнал, що замикає тиристор. Якщо температура перевищує 38,3 °С, замикається контакт термореле SK1 і включає реле KV1, яке відключить проміжне реле KV2, а відповідно і регулюючий прилад А1 і включити охолодження соленоїд YA1, який повністю відкриває заслінку і збільшує додаткове надходження більш холодного повітря в камеру, цьому включається світлова та звукова аварійна сигналізація, а також місцева світлова.

При зниженні вологості повітря (на 3%) вологорегулятор А2 включає соленоїд YA2 та подає воду на диск механічного розпилювача з електроприводом М2. При цьому запалюється сигнальна лампа HL5. Світлова сигналізація HL4 показує «Розігрів», HL3 – «Температура в нормі», HL2 – «Охолодження» [31 – 34].

Поворотом лотків керують за допомогою реле часу, яке у поєднанні з двома кінцевими вимикачами виконує човниковий поворот валу на кут $\pm 45^\circ$. Автоматичне керування дублюється ручним – рис. 18.

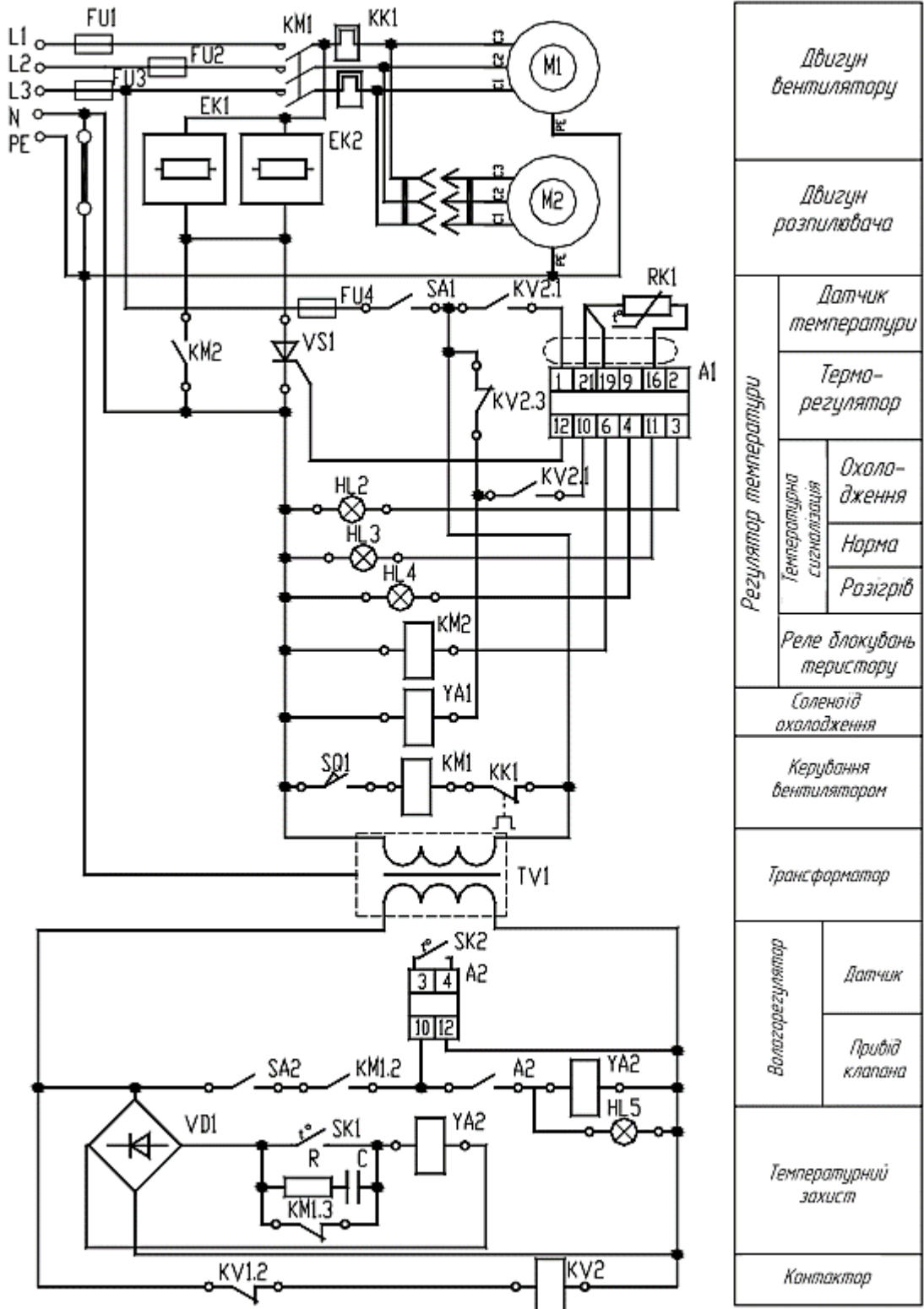


Рис. 17. Електрична схема системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі

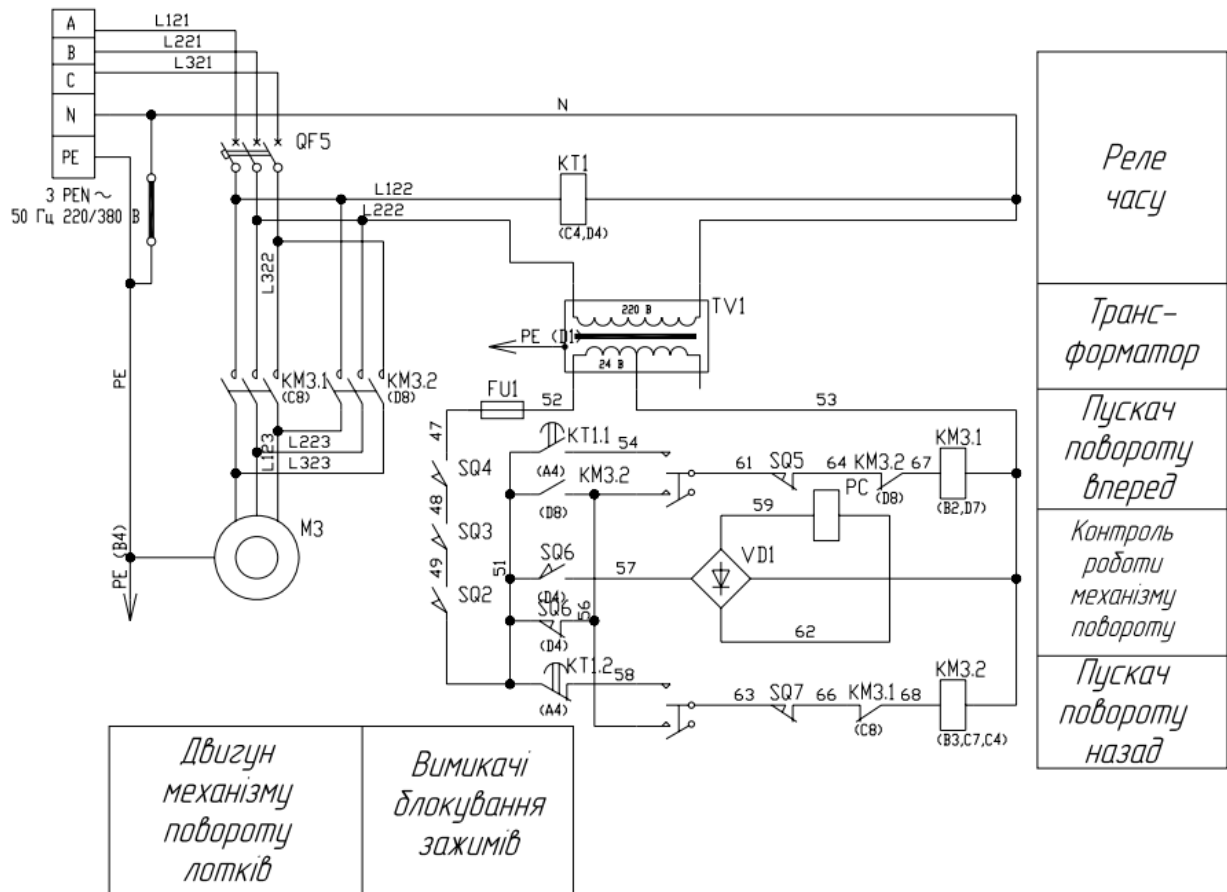


Рис. 18. Електрична схема системи повороту лотків в інкубаторі

Структурна схема автоматизації базується на логічних інформаційних потоках, що впливають на об'єкт автоматичного керування [31 – 34] – рис.19.

Виходячи з сучасних засобів автоматизованого контролю, що зафіксовані в профільних наукових публікаціях [35 – 41], для розробки автоматизованої системи інкубації пташиних яєць сформуємо структурну схему автоматизації, що базується на наступних технологічних рішеннях:

- у якості датчиків, що використовуються для задання початкових значень для розвитку керівних впливів визначаємо *IoT*-датчики температури і вологості внутрішнього повітря в об'ємі проектного інкубатора;
- у якості логічного модулю для автоматичного надання керівних впливів засобам контролю мікроклімату (інфрачервоній лампі та зволожувачу повітря) визначаємо модуль *Arduino UNO*;

- безпосередній фізичний вплив на об'єкт автоматичного керування буде здійснюватися за рахунок дії керівних впливів на виконавчі органи – вентилятори, інфрачервону лампу, зволожувач та механізовані лотки (що формують необхідний кут нахилу системи інкубації яєць);
- зважаючи на необхідність контролю параметрів інкубації пташиних яєць з урахуванням нечіткості задання контрольованих параметрів застосуємо нейромережні засоби, що разом з модулем *NodeMCU* будуть повідомляти адміністратора (на персональний засіб зв'язку – смартфон) про необхідність втручання в технологічний процес.

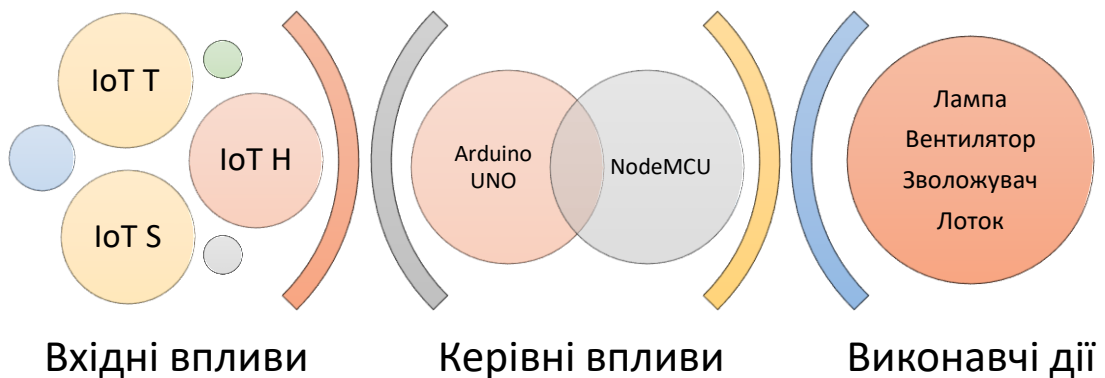


Рис. 19. Структурна схема автоматизованого керування процесом інкубації пташиних яєць

Таким чином, отримані логіко-структурні схеми автоматизованого керування процесом інкубації пташиних яєць, що застосовують сучасні засоби і технічні рішення, які дозволяють не лише організувати автоматизацію в заданих обмежуючих діапазонах виконавчих дій (рис. 19), а й дозволяти адміністратору, здійснювати опосередкований контроль за

технологічним процесом, реагуючи лише на визначні події і фактори, які встановлює нейромережа.

2.2 Математична модель системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі

Математична модель системи автоматичного керування процесом інкубації пташиних яєць шляхом контролю мікрокліматичних параметрів базується на тепловому балансі інкубатору [42 – 49].

Тепловий баланс – це співвідношення між надходженням теплоти в приміщення та його тепловтратами.

Якщо теплонадходження в інкубаторі перевищують тепловтрати, то маємо позитивний тепловий баланс, а якщо навпаки, перевищують тепловтрати, то баланс буде негативним.

Тепловтрати в об'ємі інкубатора залежить від наступних факторів [42 – 49]:

- площі, товщини огорожувальних конструкцій, виду та властивостей матеріалу огорожувальних конструкцій, а також різниці температури внутрішнього та зовнішнього повітря;
- кількості тепла, витраченого на підігрів холодного повітря, яке надходить через вентиляційну систему та на процес випаровування вологи для підтримки вологісного режиму.

Правильно розрахований тепловий баланс об'єму інкубатора дозволяє передбачити та своєчасно вжити заходів щодо утеплення об'єкту та забезпечення роботи вентиляції у відповідних режимах.

Процес інкубації яєць супроводжується виділенням теплоти та вуглекислого газу інкубаційним яйцем (при температурі повітря в технологічному об'ємі інкубатора рівній 37,5 °С, середньому значенні

відносної вологості 60 % та швидкості руху повітря близько 0,1 – 0,2 м/с) (табл. 2) [42 – 49].

Табл. 2. Температурний та вологісний режими під час інкубації яєць

Етапи	Тривалість (доба)	Індекс максимальної температури (°C)	Індекс оптимальної вологості (%)	Тривалість і кількість провітрювань	Перевернення
№1	1 – 7	37,8 – 38,0	50 – 55	–	1 раз / год
№2	8 – 14	37,8 – 38,0	45 – 50	–	5 – 6 разів / добу
№3	15 – 18	37,8	50	15 – 20 хвилин, двічі на добу з рівними інтервалами	4 – 5 разів / добу
№4	19 – 21	37,3 – 37,5	65 – 70	–	не перевертається

Контролювати температуру яєць практично не можливо, тому якості величини що регулюється приймається температура повітря в технологічному об'ємі інкубатора.

Температура повітря в технологічному об'ємі інкубатора залежить від кількості теплоти що надходить в об'єм. Оскільки в інкубаторі постійно відбувається теплообмін, то в систему керування температурою інкубатора необхідно ввести складову Q_p , що називається регулюючим впливом величина та знак якого визначатиметься після обчислення складових теплового балансу. В зв'язку з тим, що температура повітря в інкубаторі t_n вища за температуру навколишнього середовища необхідно враховувати тепловтрати через огорожувальні конструкції інкубатора $Q_{m/вт}$, а також на нагрівання припливного повітря Q_{np} та на процес його зволоження $Q_{зв}$ [42 – 49].

Теплота, що надходить в об'єм інкубатора $Q_{яе}$ залежить від біологічних процесів всередині яйця. В перші дні інкубації тепловиділення настільки малі, що їх недостатньо на випаровування вологи, що виділяється (теплота,

яка необхідна для зміни агрегатного стану води буде частково або повністю використовуватися із навколишнього середовища). Тільки на 7 (кури) або 11-12 (гуси, вутки) добу випаровування вологи відбувається за рахунок власної біологічної теплоти та починаючи з цього періоду інкубаційні яйця будуть віддавати надлишки теплоти повітряю – рис. 20 [42 – 49].

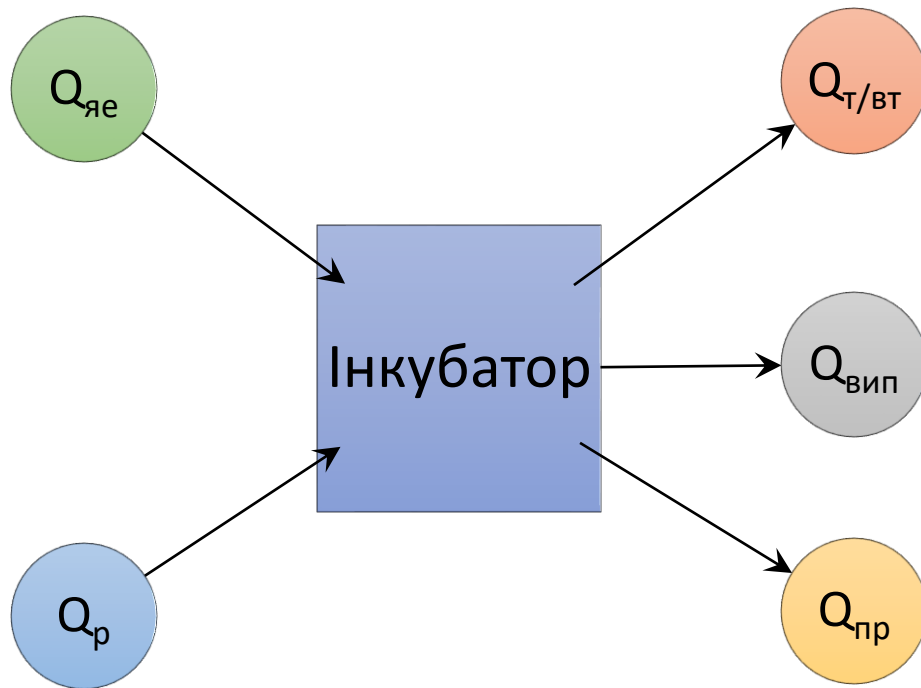


Рис. 20. Математична модель теплового балансу інкубатора

Загальний вигляд рівняння теплового балансу інкубатора (рис. 20) – ф. (1) [42 – 49]:

$$Q_{\text{яе}} + Q_p = Q_{\text{т/вт}} + Q_{\text{зв}} + Q_{\text{пр}}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{яе}}$ – теплота, що виділяється від біологічного процесу в яйці, Дж;

Q_p – теплота, яка виділяється внутрішніми джерелами, Дж;

$Q_{\text{т/вт}}$ – тепловтрати через огорожувальні конструкції інкубатора, Дж;

$Q_{\text{зв}}$ – кількість теплоти, що витрачається на зволоження повітря, Дж;

Q_{np} – витрати теплоти на нагрівання припливного повітря, Дж.

Кількість теплоти, що виділяється від біологічного процесу в яйці визначається за залежністю, Дж [42 – 49] – ф. (2):

$$Q_{яе} = q_{яе} \times m_{яе}, \quad (2)$$

де $q_{яе}$ – кількість явної теплоти, що виділяється від біологічного процесу одного яйця, Дж/кг;

$m_{яе}$ – маса яєць в інкубаторі, кг.

При проходженні електричного струму I через резистивні нагрівачі в них виділяється тепло, що призводить до нагрівання повітря в технологічному об'ємі інкубатора. Вказана кількість теплоти Q_p визначається рівнянням, Дж [42 – 49] – ф. (3):

$$Q_p = I^2 \times R \times \tau, \quad (3)$$

де I – сила струму, А;

R – опір провідника, Ом;

τ – час проходження електричного струму, с.

Втрати теплоти $Q_{m/вт}$ шляхом теплопередачі через стінки огорожувальної конструкції інкубатора визначаються рівнянням, Дж [42 – 49] – ф. (4):

$$Q_{m/вт} = \frac{1}{R} \times F \times (t_{вн} - t_{зов}) \times \tau, \quad (4)$$

де: R – опір теплопередачі огорожувальної конструкції інкубатора, $(\text{м}^2 \times \text{°C})/\text{Вт}$;

F – загальна площа огорожувальних конструкцій (поверхні стінок) інкубатора, м²;

$t_{вн}, t_{зов}$ – температура внутрішнього та зовнішнього повітря, °С;

τ – час втрати теплоти через огорожувальну конструкцію інкубатора, с.

Кількість теплоти, яка витрачається на зволоження повітря, Дж [42 – 49] – ф. (4):

$$Q_{зв} = r \times W_{вод}, \quad (5)$$

де r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг;

$W_{вод}$ – кількість води, яка буде подаватися в інкубатор для зволоження, кг.

Кількість теплоти $Q_{пр}$, яку треба витратити на нагрів припливного повітря, Дж [42 – 49] – ф. (6):

$$Q_{пр} = c \times L \times \rho \times (t_{вн} - t_{зов}) \times \tau, \quad (6)$$

де c – теплоємність повітря, Дж/(кг × °С);

L – повітрообмін в інкубаторі, $\frac{м^3}{с}$;

ρ – густина повітря, $\frac{кг}{м^3}$.

τ – час на нагрівання припливного повітря, с.

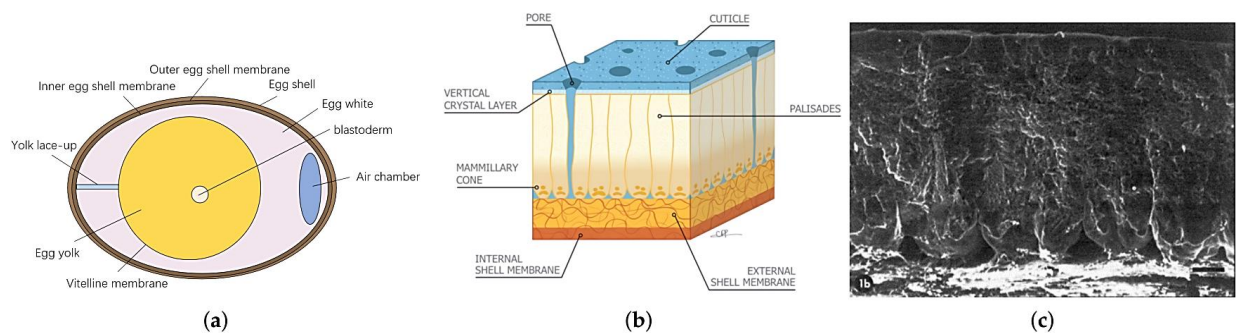
Таким чином, отримана математична модель проектного автоматизованого інкубатора, що базується на тепловому балансі технологічного процесу інкубації, що включає:

- в прибутковій частині: тепловий потік біологічного тепла пташиного яйця; тепловий потік нагрівальних елементів;

- у витратній частині: тепловтрати огорожувальними конструкціями інкубатора, тепловтрати на зволоження повітря, тепловтрати на нагрівання свіжого повітря, що надходить до внутрішнього об'єму вентилятору.

2.3 Вибір методу синтезу та закону керування системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі

Аналіз наукових праць та профільних публікацій [50 – 56] дозволяє дійти висновку, що тепловологістний режим інкубації пташиних яєць значно впливає на їх якість та структуру – рис. 21.



(a) улаштування пташиного яйця; (b) структура шкарлупи яйця;
(c) мікросвітлина шкарлупи яйця

Рис. 21. Ілюстрація внутрішнього улаштування пташиного яйця

Згідно з ілюстрацією, наведеною на Рисунку 21, пташине яйце має систему зовнішнього захисту – шкарлупу, що в свою чергу також має складну структуру, через яку здійснюється дифузія зовнішніх впливів на внутрішнє середовище досліджуваного об'єкту.

Порушення індивідуальних та специфічних вимог до організації тепловологістного режиму інкубації пташиних яєць призводить як до раннього, так і до пізнього завмирання зародка. Тепловологістний режим

також впливає на показники здоров'я, вагу, співвідношення статі інкубованого покоління птиці – рис. 22 [50 – 56].

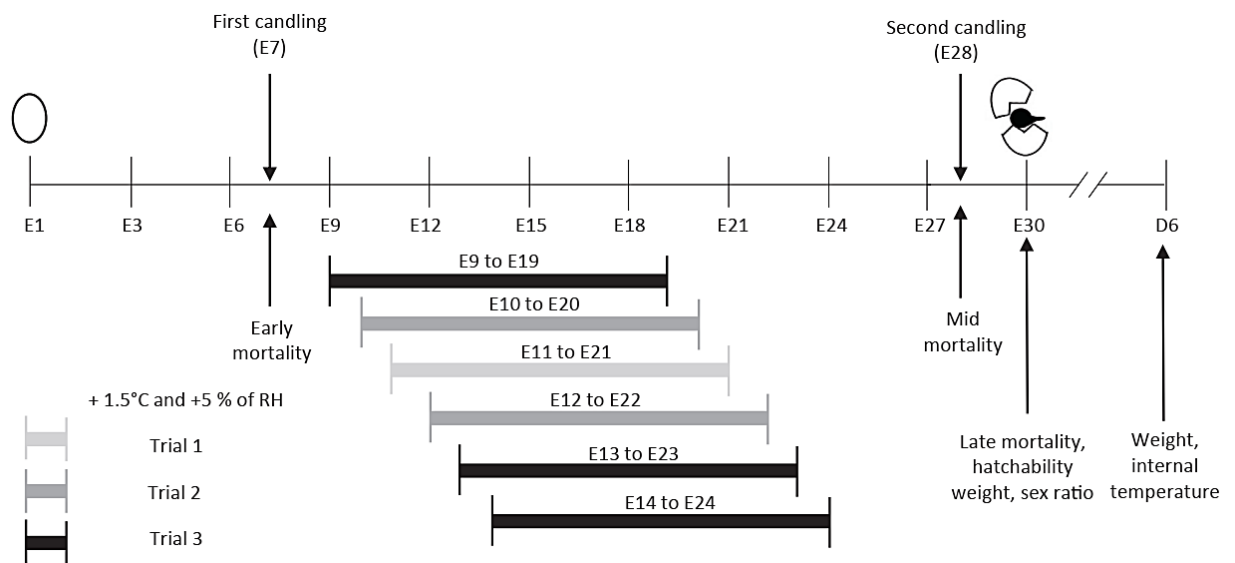


Рис. 22. Дослідження впливу тепловологістних режимів на специфічні параметри інкубації пташиних яєць: показники здоров'я, вагу, співвідношення статі інкубованого покоління птиці

Таким чином, дотримання індивідуальних мікрокліматичних параметрів у внутрішньому об'ємі інкубатору має визначальне значення та прямі економічні наслідки, створюючи при цьому певну нечіткість регулювання, що потрібно врахувати при розробці законів синтезу та автоматичного керування.

Нечітке логічне автоматичне керування мікрокліматичними параметрами інкубації пташиних яєць передбачає використання схем фазифікації, що заснована на базі нечітких правил та системі нечітких обмежень (лімітів) – рис. 23 [50 – 56].

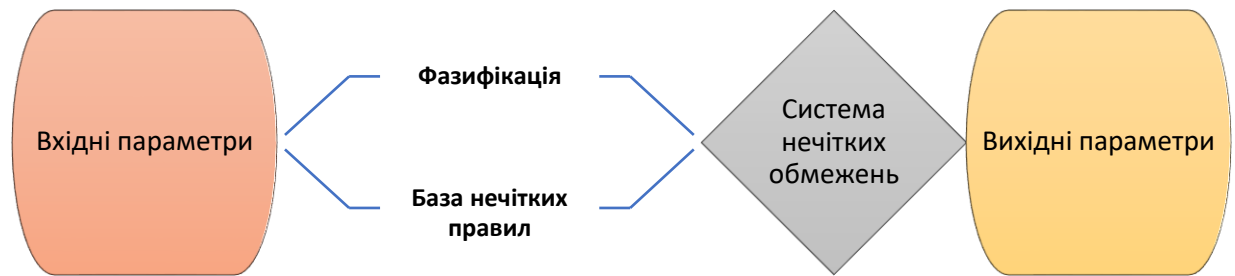


Рис. 23. Проектний метод синтезу та закону керування системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі

Відповідно до запропонованого методу синтезу та закону керування системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі, зазначені логічні блоки мають наступну реалізацію:

– Вхідні параметри:

Вхідні дані приймаються датчиком DHT11. Даний датчик має діапазон вимірювання температури від -40 до $+125$ °C з точністю $\pm 0,5$ °C. Крім того, датчик має ефективний діапазон вимірювання вологості від 0 до 100 % з точністю 2 – 5 %. Робоча напруга DHT11 коливається від 3 до 5 В, а максимальний струм, який використовується під час вимірювання, становить 25 мА – рис. 24 [50 – 56].

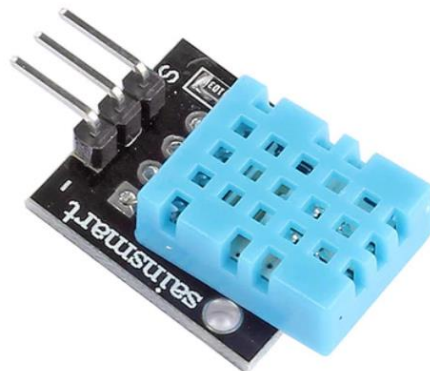


Рис. 24. IoT-датчик температури і вологості DHT11

Температура: в інкубаторі для курячих яєць обов'язкова підтримка температури протягом усього процесу інкубації. Оптимальна температура становить 38 °С, але її слід підтримувати в межах 37-39 °С.

Відносна вологість: зазвичай для курячих яєць процес інкубації завершується через 21 день. Відносна вологість повинна бути 50-55 % в перші 17 днів і 60-65 % на 18-21 день.

– Фазифікація:

У процесі фазифікації всі параметри були визначені як змінні відповідно до їх значення. Для всіх параметрів форма функції приналежності є трикутною та функцією Гауса. Відповідно до вимог використовуються трикутні функції для температури, вологості та швидкості вентилятора [50 – 56].

Трикутну функцію можна представити у вигляді – ф. (7):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x-a}{m-a}, & a < x \leq m \\ \frac{b-a}{b-m}, & m < x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases}, \quad (7)$$

де a – нижнє ліміт;

b – верхній ліміт;

m – поточне значення.

Зміна тепла в інкубаторі повинна бути плавною для стабільного вилуплення. Отже, для тепла була використана функція Гауса. Функцію Гауса з центральним значенням m і стандартним відхиленням $k > 0$ можна представити у вигляді – ф. (8):

$$\mu_A(X) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2k^2}}. \quad (8)$$

Для температури є три функції належності, визначені на рис. 25.

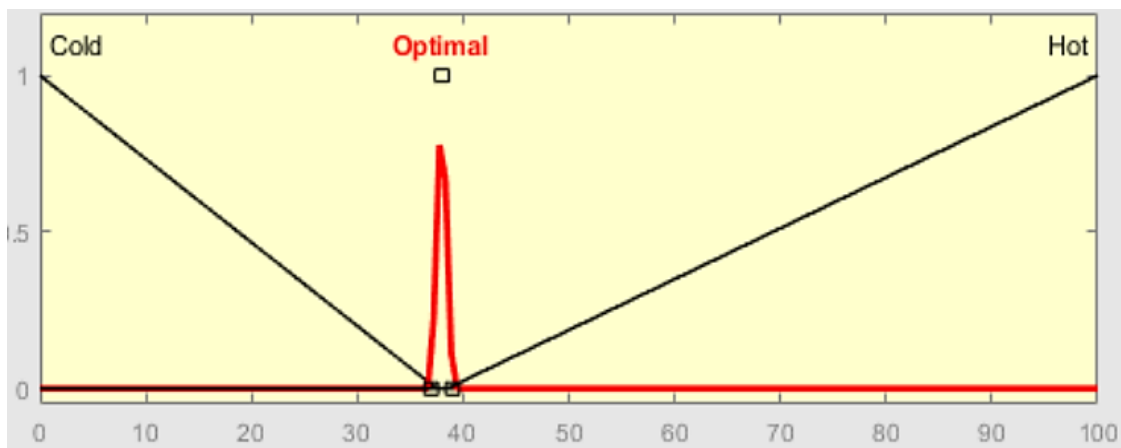


Рис. 25. Графік функції належності температури

Але у випадку іншого вхідного параметра, тобто відносної вологості, умова функції приналежності повинна бути визначена двічі. Перша умова встановлюється для перших 17 днів інкубаційного процесу, а потім відповідно до змін у вимогах до вологості на 18-21 день у функції внесено наступні зміни – рис. 26 [50 – 56].

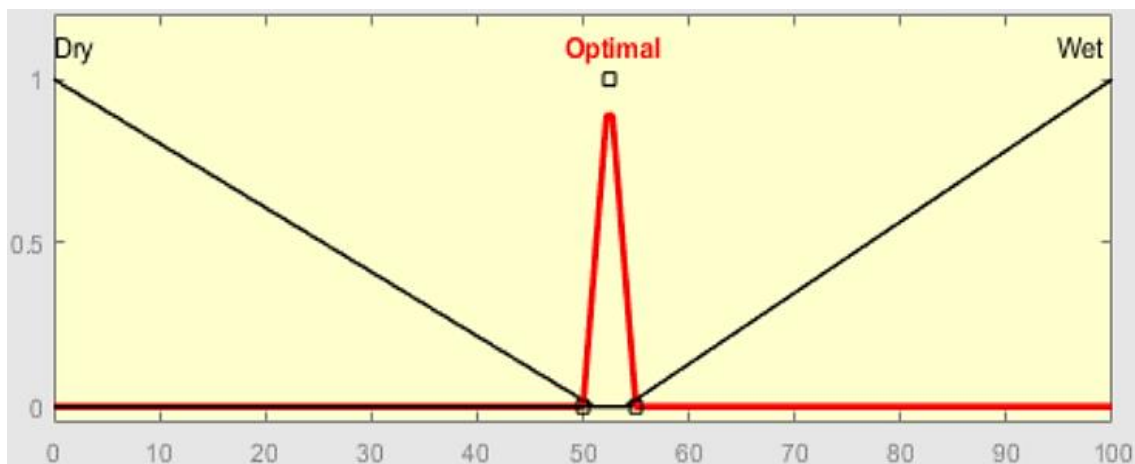


Рис. 26. Графік функції приналежності вологості за перші 17 днів

Для належної інкубації відносну вологість слід підвищити через 17 днів на 10-15%, що можна визначити за рис. 27.

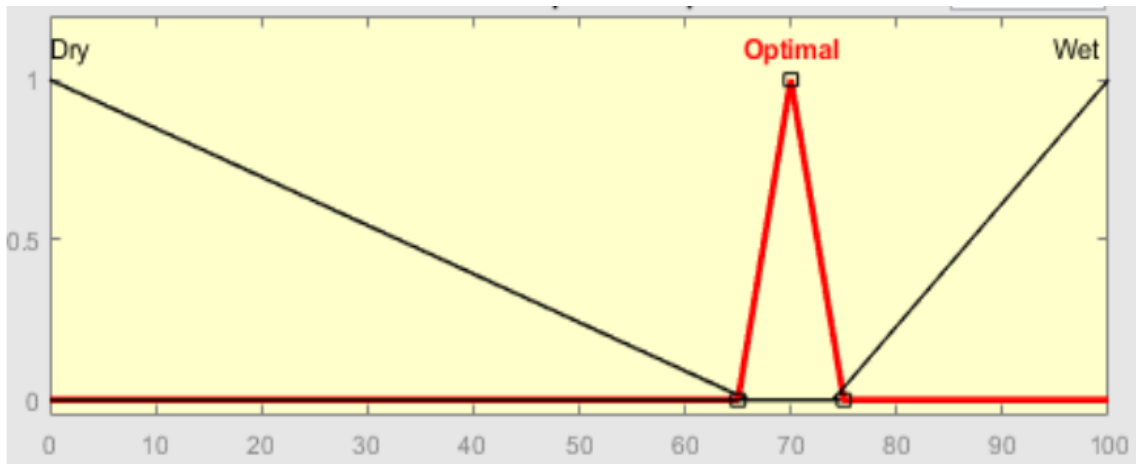


Рис. 27. Графік функції приналежності вологості для днів 18-21

Після цього результати процесу інкубації приймаються як тепло та швидкість вентилятора. Функція належності оціненої теплоти визначається в діапазоні від 1 до 10. Зміна тепла в інкубаторі повинна бути плавною для стабільного вилуплення. З цієї причини функція Гауса була використана як функція належності, що проілюстрована на рис. 28 [50 – 56].

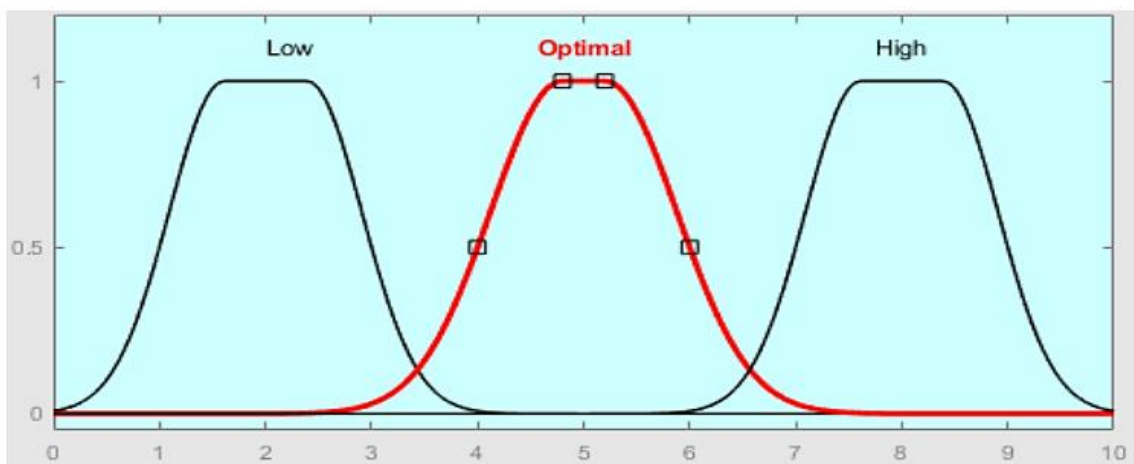


Рис 28. Графік функції належності тепла

Вихідна швидкість вентилятора також була розділена на три функції належності, визначені в діапазоні 1-10, що зазначено на рис. 29.

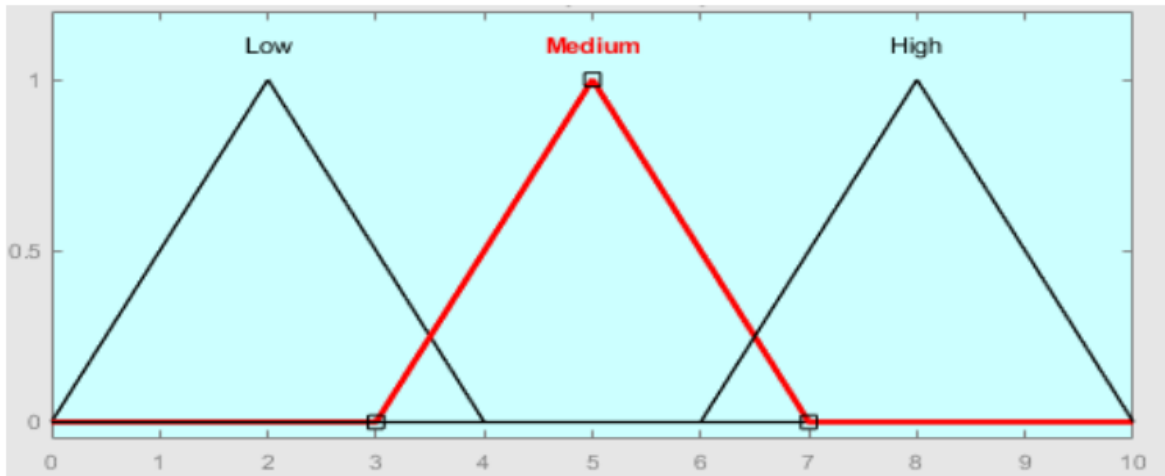


Рис. 29. Графік функції належності швидкості вентилятора

– Система нечітких обмежень:

Приймаємо, що функція приналежності та зв'язок між ними не є лінійними чи постійними, щоб отримати оптимальну температуру та вологість.

– База нечітких прав:

Правила оптимізації температури та вологості в процесі інкубації були встановлені для максимально можливих умов, які можуть переважати в процесі – табл. 3 [50 – 56].

Табл. 3. Правила для нечіткої моделі

№ з/п	Температура	Відносна вологість	Тепловий потік	Швидкість обертання вентилятору
1	2	3	4	5
01.	Холодна	–	Високий	Середня
02.	Оптимальна	–	Оптимальний	Середня
03.	Гаряча	–	Низький	Середня
04.	–	Суха	Оптимальний	Висока
05.	–	Оптимальна	Оптимальний	Середня
06.	–	Волога	Оптимальний	Низька
07.	Холодна	Суха	Високий	Висока

1	2	3	4	5
08.	Холодна	Оптимальна	Високий	Середня
09.	Холодна	Волога	Високий	Низька
10.	Оптимальна	Суха	Оптимальний	Висока
11.	Оптимальна	Оптимальна	Оптимальний	Середня
12.	Оптимальна	Волога	Оптимальний	Низька
13.	Гаряча	Суха	Низький	Висока
14.	Гаряча	Оптимальна	Низький	Середня
15.	Гаряча	Волога	Низький	Низька

– Вихідні параметри:

Тут, для процесу дефазифікації використовувався метод центроїда площі (МЦП), який можна представити як – ф. (9):

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^k A_i \times \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^k A_i} \quad (9)$$

де A_i – зона влучань i -тих правил;

k – загальна кількість запускених правил;

\bar{x}_i – центр площі.

Тепло: що стосується температури та відносної вологості, тут було виміряно тепло з урахуванням розрахункового значення, але фактичне тепло змінюватиметься залежно від кількості яєць та конструкції інкубатора – рис. 30.

Швидкість вентилятора: вентилятор зволожувача випаровує воду та виносить її в повітря. Вентилятор зволожувача використовується з водяним каналом. Коли відносна вологість нижче оптимального рівня, швидкість вентилятора буде високою, і навпаки – рис. 31 [50 – 56].

Модель *Simulink* цієї системи управління може бути представлена у вигляді – рис. 32.

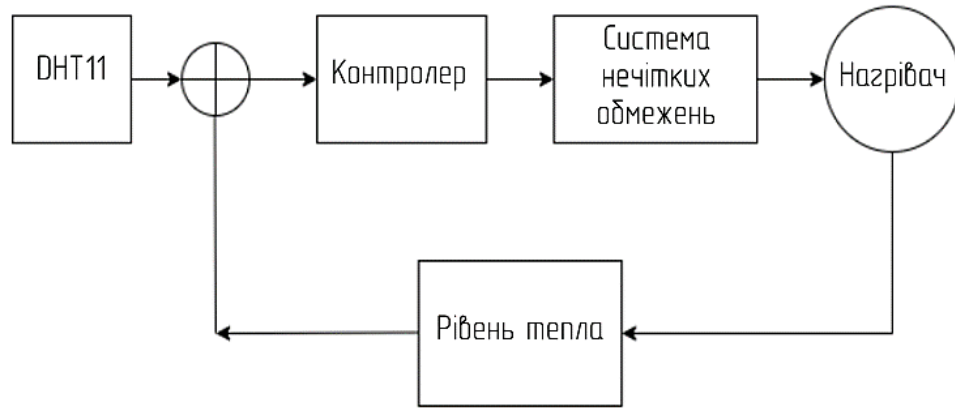


Рис. 30. Структурна схема регулювання тепла

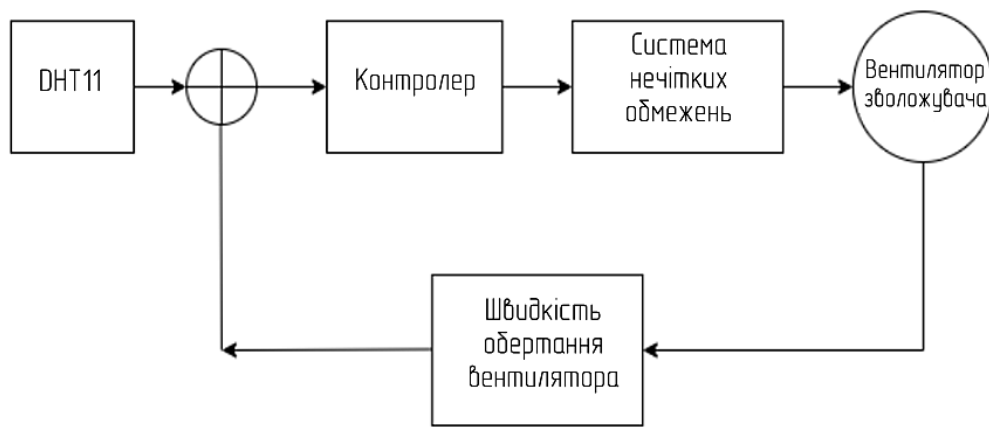
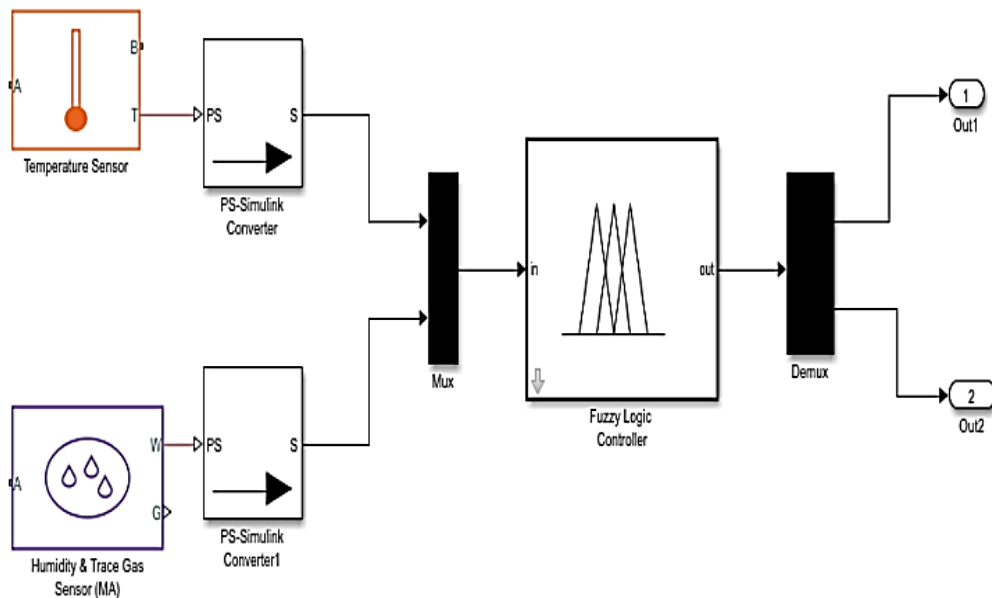


Рис. 31. Структурна схема регулювання швидкості вентилятора

Рис. 32. Імітаційна модель для системи нечітких обмежень
(Fuzzy Interference system)

В автоматичних інкубаторах для яєць температура та вологість усередині інкубаційної камери вимірюються датчиком DHT11. Система втручання з нечіткою логікою приймає ці параметри як вхідні дані, порівнює дані із збереженими оптимальними рівнями, а створений вихід контролює нагрівач і вентилятор зволожувача як систему зворотного зв'язку з замкнутим контуром. При підвищенні температури вище оптимального рівень тепла регулюється шляхом зменшення тепла і навпаки. Швидкість вентилятора зволожувача зменшується пропорційно збільшенню відносної вологості, тому зі зниженням рівня вологості вентиляція збільшується, а коли відносна вологість низька, швидкість вентилятора збільшується.

Таким чином, встановлено, що для досліджуваного об'єкту автоматизації найбільш доцільним методом синтезу та закону керування є метод логічного нечіткого керування, що дозволяє контролеру приймати адекватні рішення, відповідно до індивідуальних потреб кожної партії інкубованих пташиних яєць.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Синтез регулятора системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі

Відповідно до рішень, отриманих в результаті досліджень, представлених в Розділі 2 поточної роботи, встановлено, що доцільною програмно-апаратною основою для синтезу системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі є екосистема *Arduino*.

Концепт-схема проектного інкубатора проілюстрована на рис. 33.

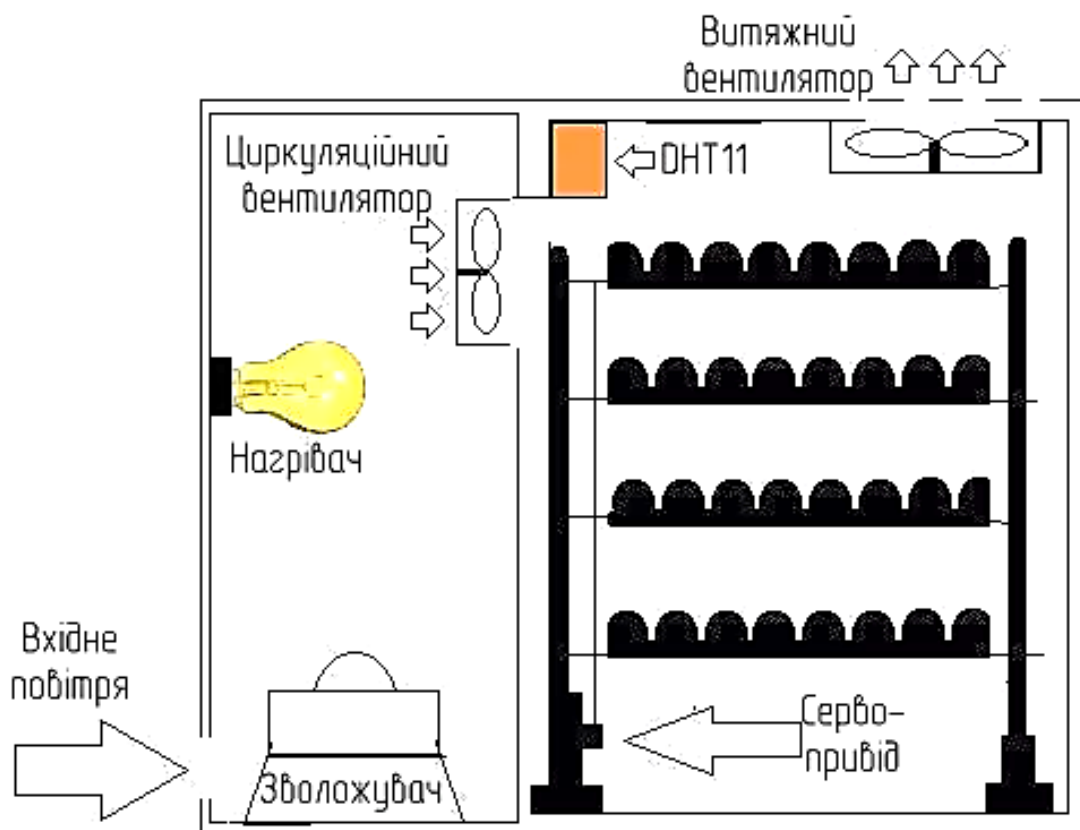


Рис. 33. Концепт-схема проектного інкубатора

Сервопривід механізованого лотка дозволяє здійснювати перевертання інкубаційних пташиних яєць, що продемонстровано на рис. 34.

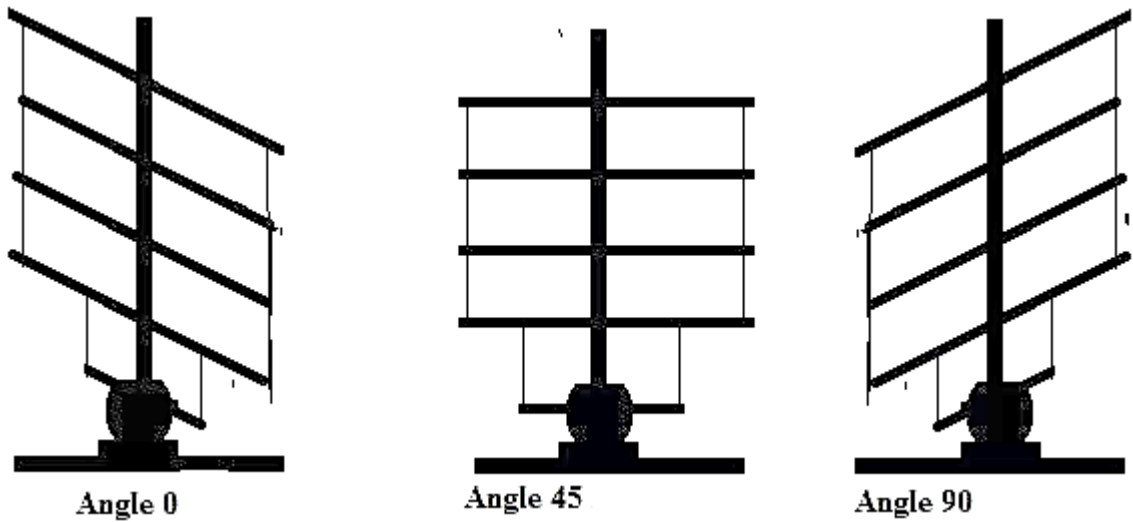


Рис. 34. Варіанти положень механізованого лотка

У відповідності до рішень Розділу 2 та профільних наукових праць [57 – 64], проектна схема керування мікрокліматичними параметрами інкубатора пташиних яєць реалізується на базі *IoT*-датчиків та контролеру *Arduino* – рис. 35.

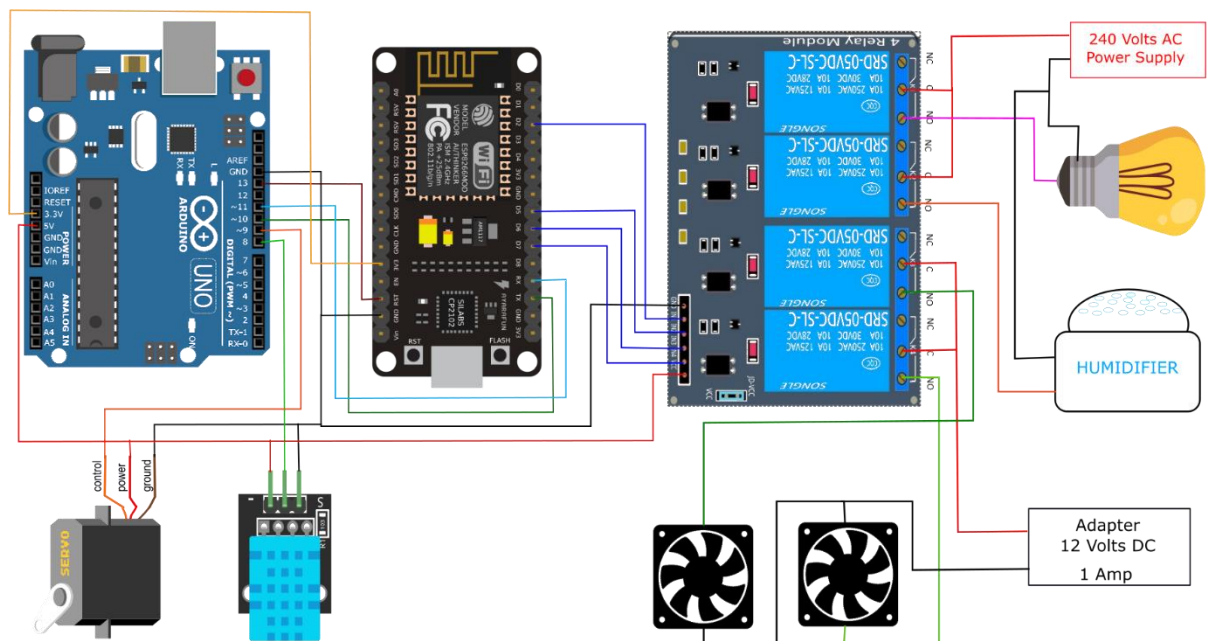





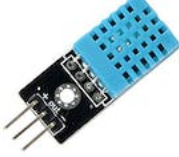




Рис. 35. Структурна схема реалізації автоматичного керування мікрокліматичними параметрами інкубатора пташиних яєць на базі *IoT*-датчиків та контролеру *Arduino*

Комплектація проектної структурної схеми керування мікрокліматичними параметрами інкубатора пташиних яєць, наводиться в Табл. 4 [57 – 64].

Табл. 4. Комплектація проектної структурної схеми керування мікрокліматичними параметрами інкубатора пташиних яєць

Зовнішній вид	Назва	Кількість, од.
	NodeMCU ESP8266 Breakout Board	1
	Arduino Uno Rev3	1
	Bulb filament type	2
	Servo MG995	1
	CPU fan 12 volt	2
	DHT11 Temperature & Humidity Sensor	1
	LED (generic)	1
	Humidifier	1

Датчик температури та вологості внутрішнього повітряного об'єму проектного автоматизованого інкубатору для пташиних яєць – DHT11 Temperature & Humidity Sensor описаний раніше (п. 2.3). DHT11, як описано раніше, виконує функції задачі входних параметрів (рис. 23) при реалізації методу логічного нечіткого керування.

Зв'язок з адміністратором здійснюється за допомогою модуля – *NodeMcu Lua WIFI Development Board For ESP8266 Module* – рис. 36.

NodeMCU – це вбудоване програмне забезпечення на базі Lua з відкритим кодом для ESP8266 WiFi SOC від Espressif і використовує вбудовану в модуль флеш-пам'ять файловою системою SPIFFS. *NodeMCU* реалізовано на C і накладено на Espressif NON-OS SDK.

Спочатку мікропрограму було розроблено як супутній проект для популярних модулів розробки *NodeMCU* на основі ESP8266, але тепер проект підтримується спільнотою, і тепер мікропрограму можна запускати на будь-якому модулі ESP [57 – 64].

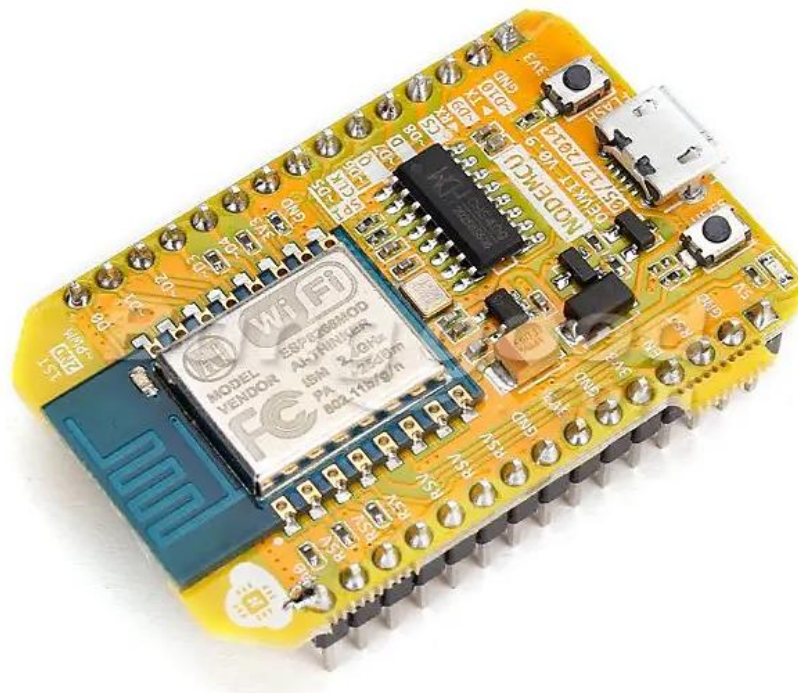


Рис. 36. *NodeMCU ESP8266 Breakout Board*

Модель програмування NodeMCU схожа на модель Node.js, тільки в Lua. Він асинхронний і керований подіями. Тому багато функцій мають параметри для функцій зворотного виклику – рис. 37 [57 – 64].

Connect to the wireless network

```
print(wifi.sta.getip())
--nil
wifi.setmode(wifi.STATION)
wifi.sta.config("SSID","password")
print(wifi.sta.getip())
--192.168.18.110
```

Arduino like IO access

```
pin = 1
gpio.mode(pin,gpio.OUTPUT)
gpio.write(pin,gpio.HIGH)
gpio.mode(pin,gpio.INPUT)
print(gpio.read(pin))
```

HTTP Client

```
-- A simple http client
conn=net.createConnection(net.TCP, false)
conn:on("receive", function(conn, pl) print(pl) end)
conn:connect(80,"121.41.33.127")
conn:send("GET / HTTP/1.1\r\nHost:
www.nodemcu.com\r\n"
...Connection: keep-alive\r\nAccept: */*\r\n\r\n")
```

HTTP Server

```
-- a simple http server
srv=net.createServer(net.TCP)
srv:listen(80,function(conn)
  conn:on("receive",function(conn,payload)
    print(payload)
    conn:send("<h1> Hello, NodeMCU.</h1>")
  end)
end)
```

PWM

```
function led(r,g,b)
  pwm.setduty(1,r)
  pwm.setduty(2,g)
  pwm.setduty(3,b)
end
pwm.setup(1,500,512)
pwm.setup(2,500,512)
pwm.setup(3,500,512)
pwm.start(1)
pwm.start(2)
pwm.start(3)
led(512,0,0) -- red
led(0,0,512) -- blue
```

Blinking Led

```
lighton=0
tmr.alarm(0,1000,1,function()
  if lighton==0 then
    lighton=1
    led(512,512,512)
    -- 512/1024, 50% duty cycle
  else
    lighton=0
    led(0,0,0)
  end
end)
```

Рис. 37. Варіації внутрішньосистемного зв'язку та зв'язку з адміністратором за допомогою *NodeMCU ESP8266 Breakout Board*

Основним засобом автоматизації запропонованої структурної схеми автоматичного керування процесами інкубації пташиних яєць є контролер *Arduino Uno Rev3* – рис. 38 [57 – 64].

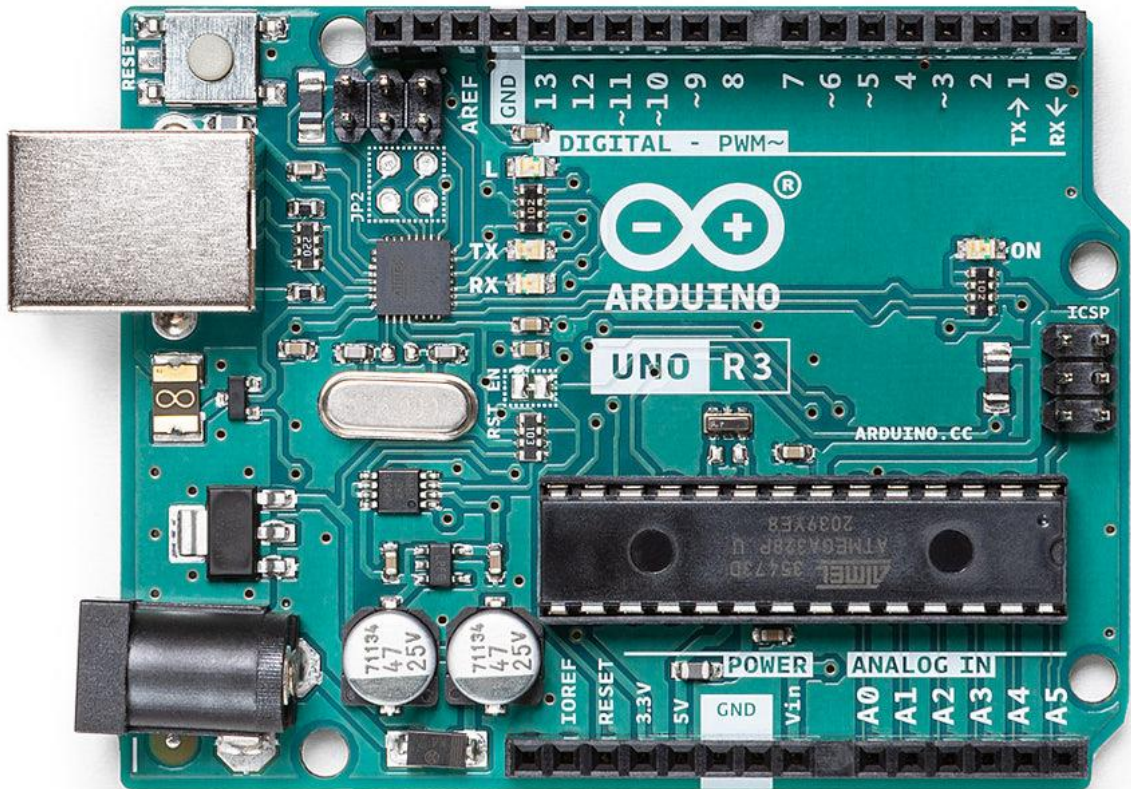


Рис. 38. *Arduino Uno Rev3*

Arduino Uno – це мікроконтролерна плата на основі ATmega328P. Вона має 14 цифрових входів/виходів (з яких 6 можна використовувати як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, керамічний резонатор 16 МГц (CSTCE16M0V53-R0), USB-з'єднання, роз'єм живлення, роз'єм ICSP і кнопку скидання – табл. 5.

ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P – це малопотужний 8-розрядний мікроконтролер CMOS на основі вдосконаленої архітектури RISC AVR®. Виконуючи інструкції за один такт, пристрої досягають пропускну здатності процесора, що наближається до мільйона інструкцій за секунду

(MIPS) на мегагерц, що дозволяє розробнику системи оптимізувати енергоспоживання в порівнянні зі швидкістю обробки – рис. 39 [57 – 64].

Табл. 5. Технічні характеристики *Arduino Uno Rev3*

мікроконтролер	АТmega328P
Робоча напруга	5В
Вхідна напруга (рекомендовано)	7-12В
Вхідна напруга (обмеження)	6-20В
Цифрові контакти введення/виведення	14 (з яких 6 забезпечують вихід ШІМ)
Виводи цифрового входу/виводу ШІМ	6
Аналогові входи	6
Постійний струм на контакт введення/виведення	20 мА
Постійний струм для контакту 3,3 В	50 мА
Флеш-пам'ять	32 КБ (АТmega328P), з яких 0,5 КБ використовується завантажувачем
SRAM	2 КБ (АТmega328P)
EEPROM	1 КБ (АТmega328P)
Тактова швидкість	16 МГц
LED_BUILTIN	13
Довжина	68,6 мм
Ширина	53,4 мм
Вага	25 г

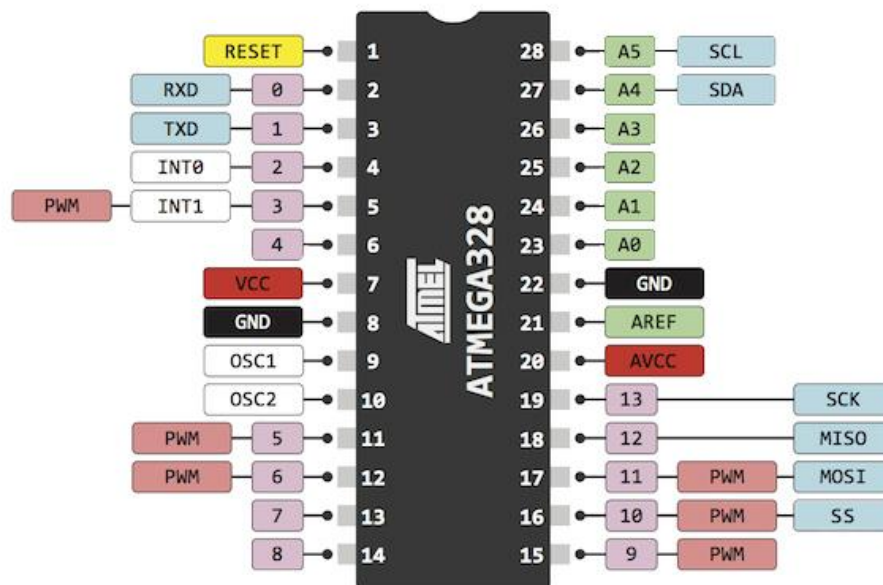


Рис. 39. Інтеграція *ATmega328P* в модуль *Arduino Uno Rev3*

Виконання схеми автоматизації технологічного процесу інкубації пташиних яєць, зображеної на рис. 35, пропонується з застосуванням хмарного сервісу *CavyIoT*, що використовується для взаємозв'язку та взаємоузгодження *IoT*-датчиків та контролеру *Arduino*.

CavyIoT-DevBoard дозволяє виконувати наступні функції:

- здійснювати потоковий моніторинг функціонування датчиків і системи автоматичного керування;
- контролювати всі технологічні параметри та дії процесу інкубації пташиних яєць;
- організовувати контроль параметрів інкубації за принципом віддаленого адміністрування;
- вести хронологію функціонування всіх датчиків та систем проектного інкубатора;
- здійснювати перехід від автоматичного до ручного керування та налагодження об'єкту автоматизації.

Алгоритм налаштування функціонування проектною системою автоматизованого керування технологічним процесом інкубації пташиних яєць в екосистемі *Arduino* з застосуванням хмарної платформи наступний *CavyIoT* [57 – 64]:

1. Інтеграція прошивки *CavyIoT* в *NodeMCU* за допомогою *Arduino IDE*. Створення платформи *CavyIoT-DevBoard*.
2. Комутація *Arduino* до *CavyIoT-DevBoard*, а також датчика DHT11 до серверу *Dev-Board*.
3. Налаштування та створення *CavyIoT-DevBoard*: через *Arduino IDE* завантажується ескіз керівної програми *ESP8266-httpupdate* для *NodeMCU* (рис. 40). Далі здійснюється налаштування комутації *CavyIoT* та *NodeMCU* – рис. 41. Відтак створюється *CavyIoT-DevBoard* – рис. 42.

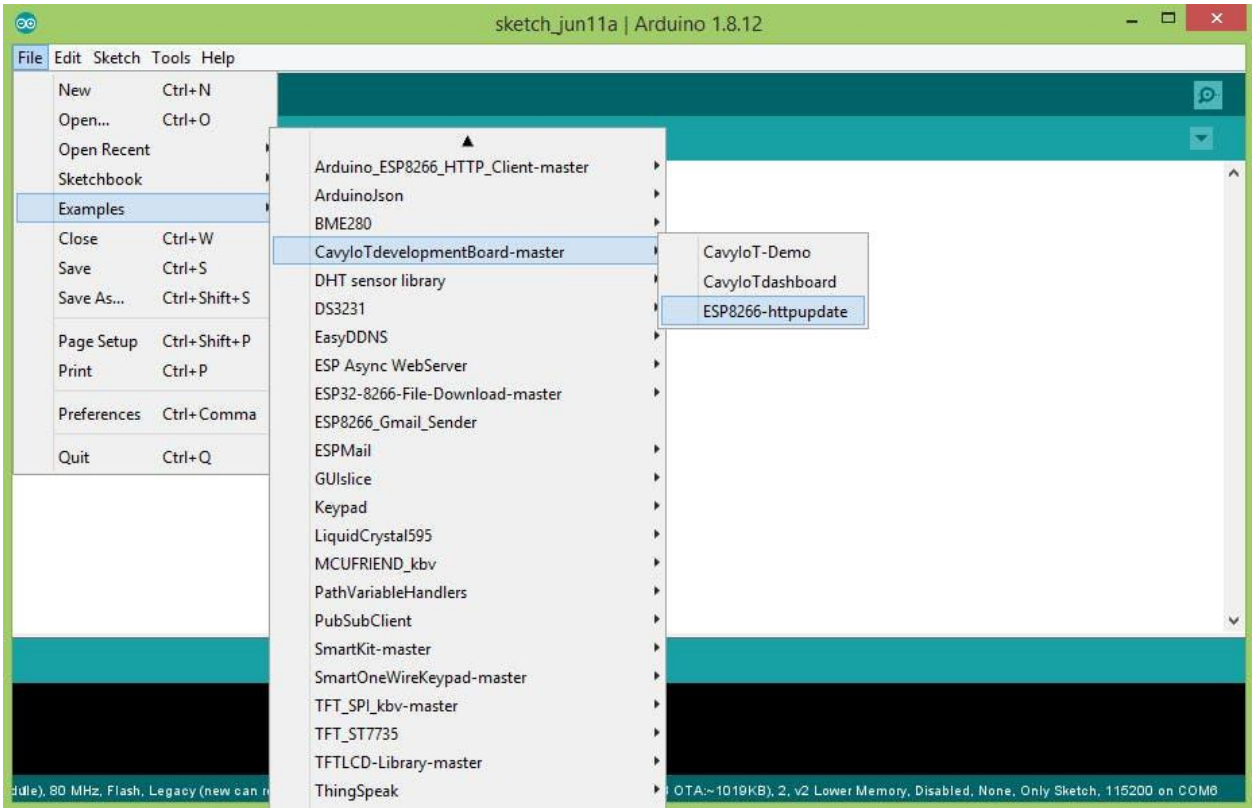


Рис. 40. Завантаження ескізу керівної програми *ESP8266-httpupdate* для *NodeMCU* в допомогою *Arduino IDE*

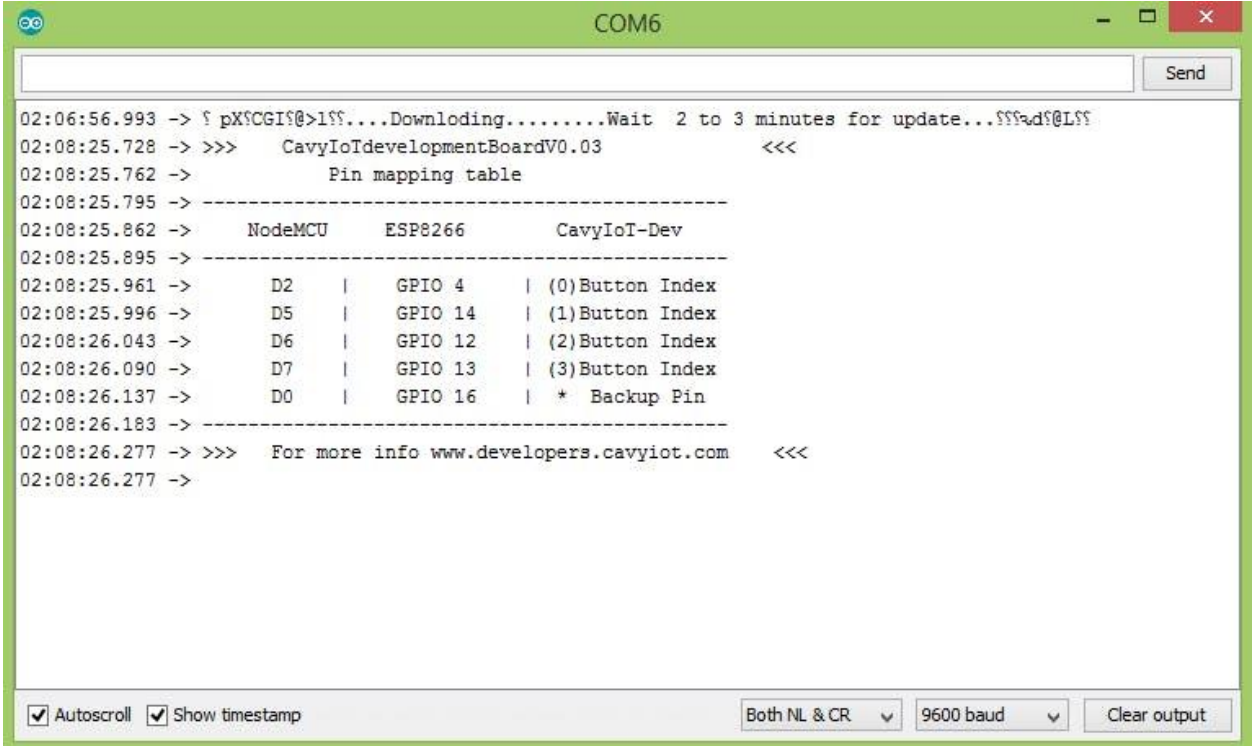


Рис. 41. Налаштування комутації *CavyIoT* та *NodeMCU*

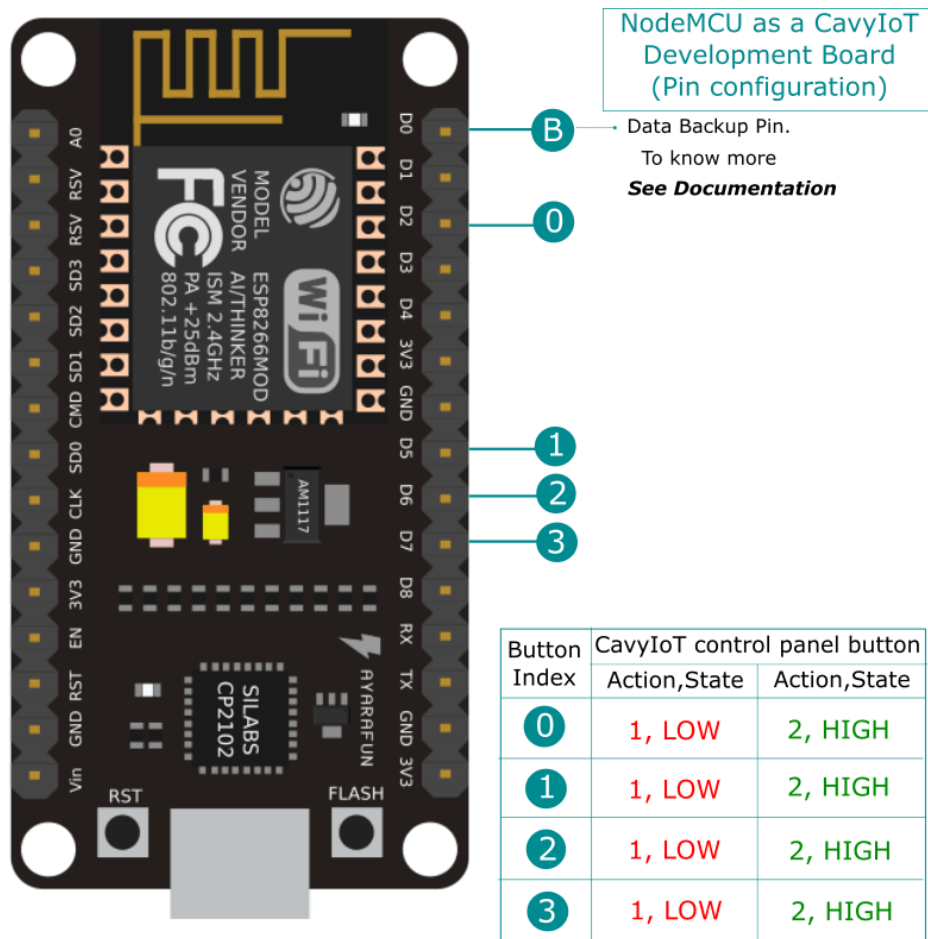


Рис. 42. Створення *CavyIoT-DevBoard*

4. Виконується налаштування комутації *Arduino Uno Rev3* та *CavyIoT-DevBoard* за проектною схемою, наведеною на Рисунок 35 :
 - a. Підключення *Arduino, DevBoard*: виводи *Arduino* 10, 11, 13 підключені до Tx, Rx, першої плати *Dev-Board*;
 - b. *Arduino*, підключення датчиків і сервосистем: вивід *Arduino* 9 підключений до сервоприводу; вивід 8 *Arduino* підключено до виводу даних DHT11;
 - c. *DevBoard*, чотириканальне релеjne підключення: вивід індексу *DevBoard* 0 (D2 *NodeMCU*) до IN1 плати реле; вивід 1 індексу *DevBoard* (D5 *NodeMCU*) до IN2 плати реле; вивід 2 індексу *DevBoard* (D6 *NodeMCU*) до IN3 плати реле; вивід 3 індексу *DevBoard* (D7 *NodeMCU*) до IN4 плати реле;

- d. Влаштовані релейні з'єднання: реле-1 для управління інфрачервоною лампою; реле-2 для управління зволожувачем; реле-3 для керування припливним вентилятором; реле-4 для керування витяжним вентилятором;
- e. Блок живлення: *Arduino UNO* (5 вольт через USB); *DevBoard* (3,3 В); Плата реле (5 В); Інфрачервона лампа (мережа 240 В змінного струму) через реле-1; зволожувач (мережа 240 В змінного струму) через реле-2 (із вбудованим адаптером); вентилятори (12 В постійного струму, 1 А) через реле-3 і реле-4, один для впуску повітря, а інший – для випуску .
5. Перевірка правильності комутації елементів – рис. 42.



Рис. 43. Перевірка правильності комутації елементів

6. Налаштування системі віддаленого адміністрування на хмарному сервісі *CavyIoT* – рис. 44. Перевірка відгуку датчиків та систем керування – рис. 45. Встановлення тригерів автоматичного керування – рис. 46. Запуск локального сервісу *DevBoard* – рис. 47. Перевірка хронометрії функціонування проектної системи автоматичного керування процесам інкубації пташиних яєць – рис. 48.



Рис. 44. Налаштування системі віддаленого адміністрування на хмарному сервісі *CavyIoT*

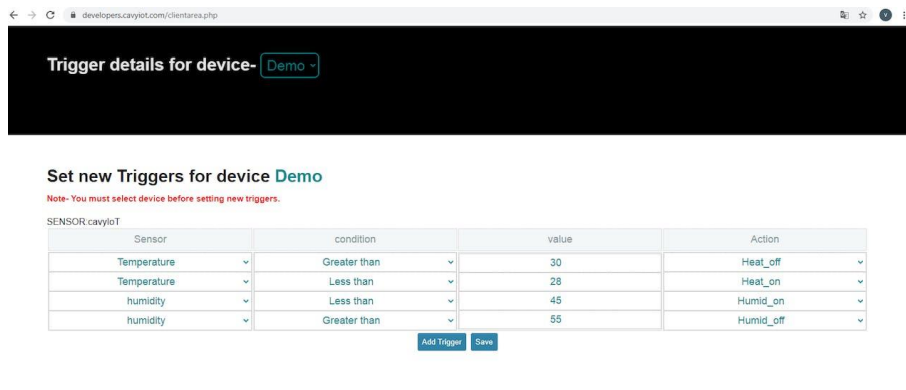


Рис. 45. Перевірка відгуку датчиків та систем керування

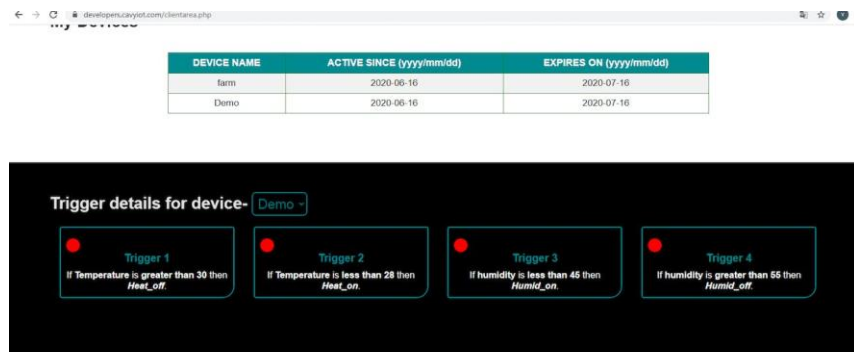


Рис. 46. Встановлення тригерів автоматичного керування



Рис. 49. Функціональні можливості кастомізації панелі керування

CavyIoT Trigger – це безкоштовний і повністю керований сервіс, який дозволяє користувачеві визначати конкретну подію даних датчика, щоб запускати події для бажаної дії.

Раніше виконувався складний алгоритм з застосування вартісних програмних комплексів для збору даних із різних вузлів, щоб застосувати логіку прийняття рішень для умови для виявлення події, щоб запуснути іншу програму для виконання дій, необхідних для цієї події. Але тепер за допомогою тригерів *CavyIoT* легко виявляти події з даних датчиків *IoT* (наприклад, температура, вологість тощо), щоб ініціювати потрібну подію.

Наприклад, система інкубатора яєць повинна підтримувати температуру в певному діапазоні. Для підтримки температури в певному діапазоні необхідно виявити подію в даних температури шляхом безперервного спостереження. І якщо температура перевищує максимальне значення діапазону, то потрібна дія, щоб зупинити подальший нагрів. Так само, коли температура опускається нижче мінімального діапазону, потрібна дія, щоб почати нагрівання.

CavyIoT полегшує користувачеві визначення тригера, надаючи стандартний інтерфейс користувача. Користувач може легко встановити логіку «якщо» та «тоді» для певної події та вибрати конкретну дію з опцій, яка буде активована, коли відбудеться визначена подія. *CavyIoT* постійно відстежує дані з кількох датчиків *IoT* для виявлення подій, ініціює сповіщення та дії у відповідь на події на основі логіки, визначеної користувачем, для швидкого вирішення проблем, зниження витрат на обслуговування та підвищення ефективності роботи – рис. 50 [57 – 64].

Таким чином, досягнута мета з розробка системи управління параметрами мікроклімату в інкубаторі з моніторингом через мобільний додаток.

Однак, сучасні засоби четвертої хвилі технологічного розвитку *Industry 4.0* дозволяє не лише автоматизувати окремі технологічні процеси, а й допомогти адміністратору здійснювати більш глибокий придиктивний

моніторинг з подальшим адекватним прийняттям рішення щодо провадження автоматизованого процесу. Для цієї мети використовуються нейромережні засоби [65 – 78].

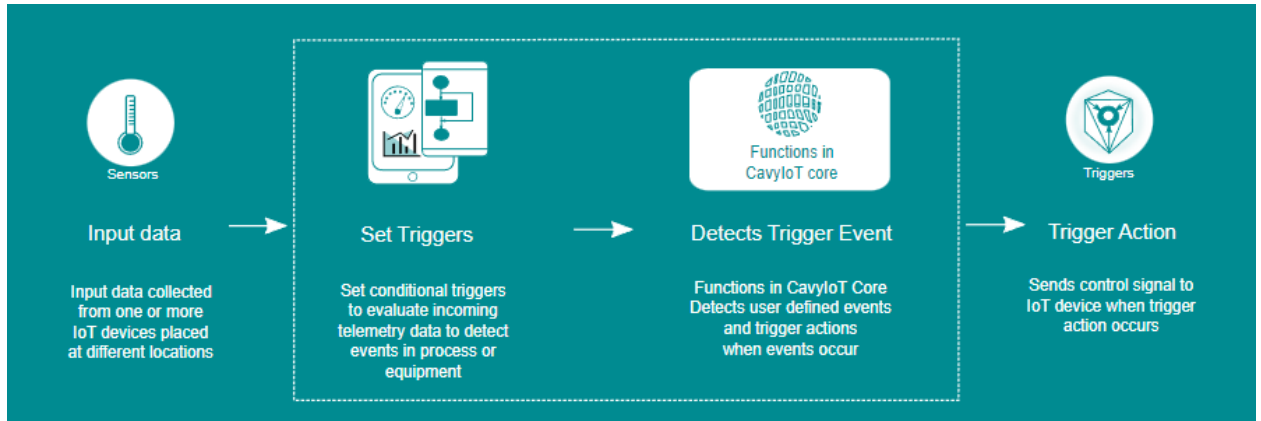


Рис. 50. Механізм функціонування *CavyIoT Trigger*

Як зазначено в п. 2.3 (рис. 21, 22) поточного дослідження, дуже важливо забезпечити індивідуальні мікрокліматичні параметри для успішної інкубації кожного окремого покоління пташиних яєць, відповідно до чого необхідно застосовувати метод логічного нечіткого керування, для якого доцільно застосовувати нейромережні засоби моніторингу та прийняття рішень [65 – 78].

Для нейромережного моніторингу стану пташиних яєць під час інкубації доцільно застосовувати термальну камеру FLIR UAS, оснащеною нейромережею *YOLO*, що керується за принципом віддаленого адміністрування – рис. 51.

Камера здійснює потоковий тепловізійний моніторинг стану покоління інкубованих пташиних яєць (рис. 52), відповідно до чого нейромережа здійснює навчання, що прийняття рішень, чи задовольняють автоматично створювані мікрокліматичні параметри індивідуальним потребам кожного яйця – рис. 53 [65 – 78].

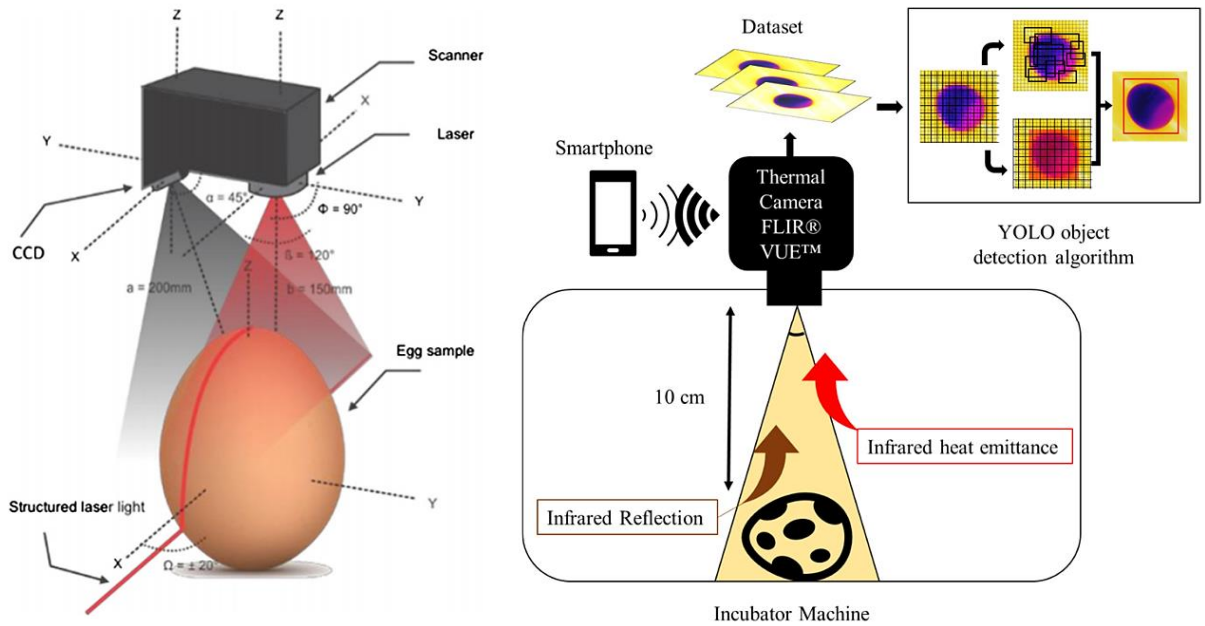
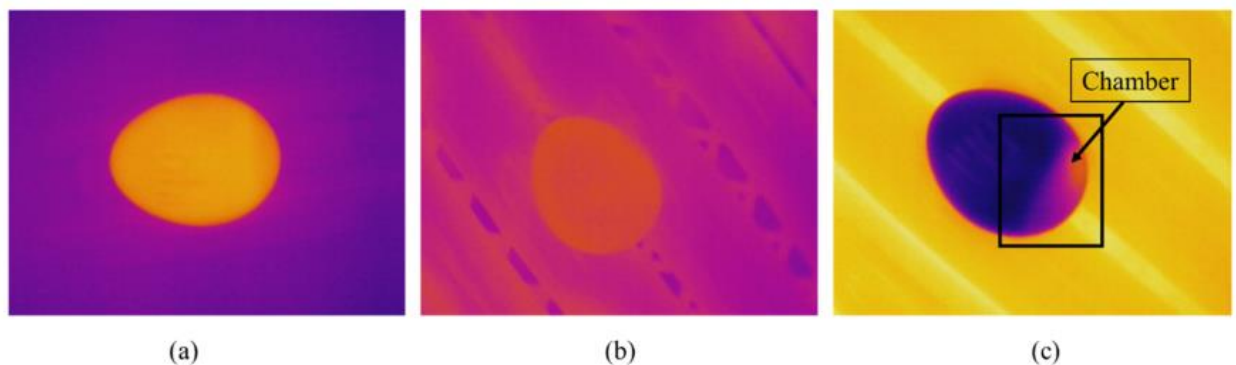


Рис. 51. Схема функціонування термальної камери *FLIR UAS*, оснащеною неймережею *YOLO*



(a) температурний скрін яйця за кімнатної температури; (b) яйце нагріте до необхідної температури інкубації ($37\text{ }^{\circ}\text{C}$); (c) яйце, що вийшло за температурні межі процесу інкубації ($17\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Рис. 52. Тепловізійні потокові скрінні пташиних яєць, що передаються від термальної камери *FLIR UAS* до навчання неймережі *YOLO*

Неймережа *YOLO* відповідно до вибірки натурних поточкових даних визначає чи відбувся розвиток пташиного зародку, чи вказаного розвитку не відбулось – рис. 54. Таким чином, *YOLO* формує базу даних, відповідно до якої зазначена неймережа може з високою часткою вірогідності встановити

поточний розвиток пташиного зародку у яйці та повідомити про це адміністратора – рис. 55 [65 – 78].

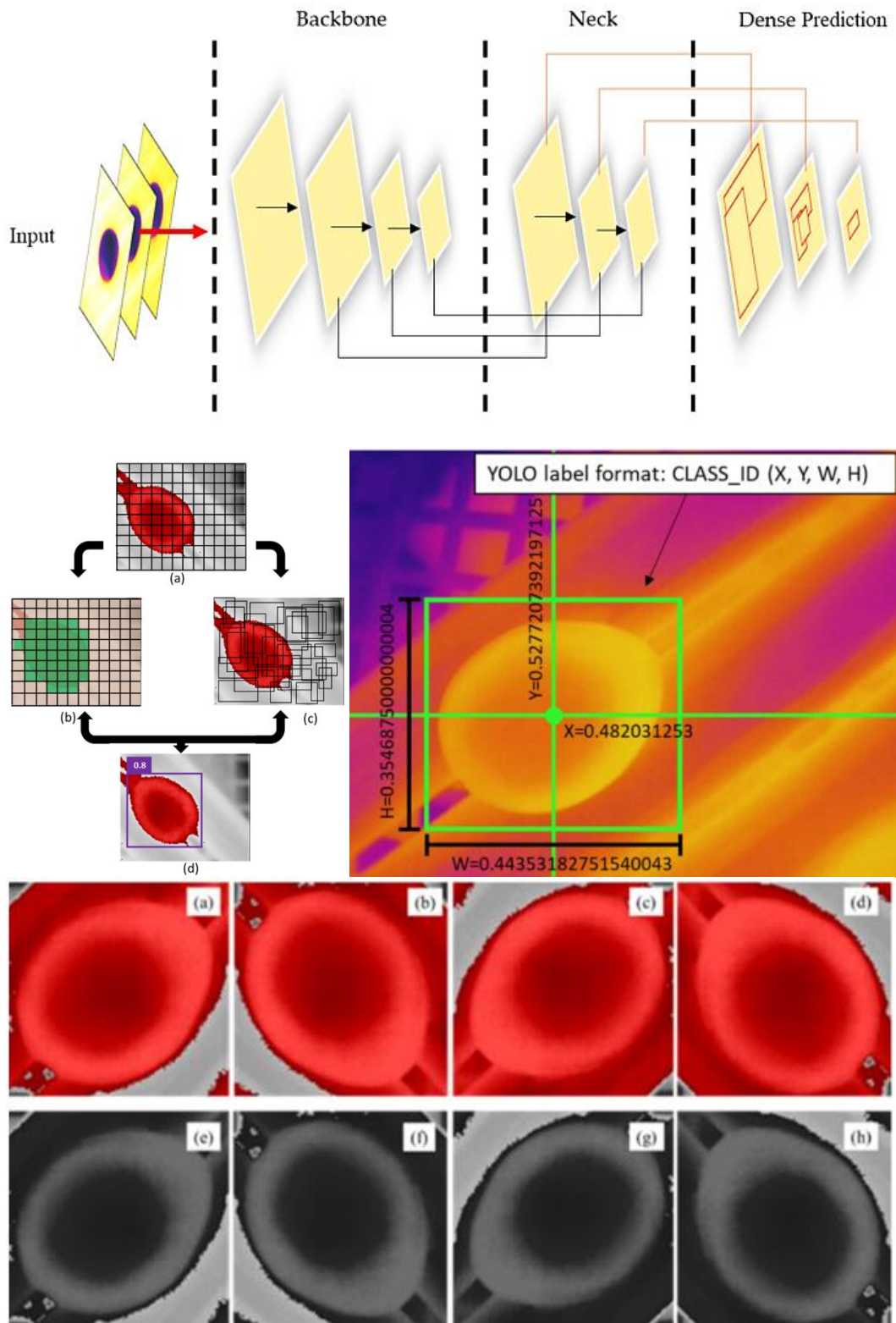


Рис. 53. Процес навчання неймережі *YOLO*

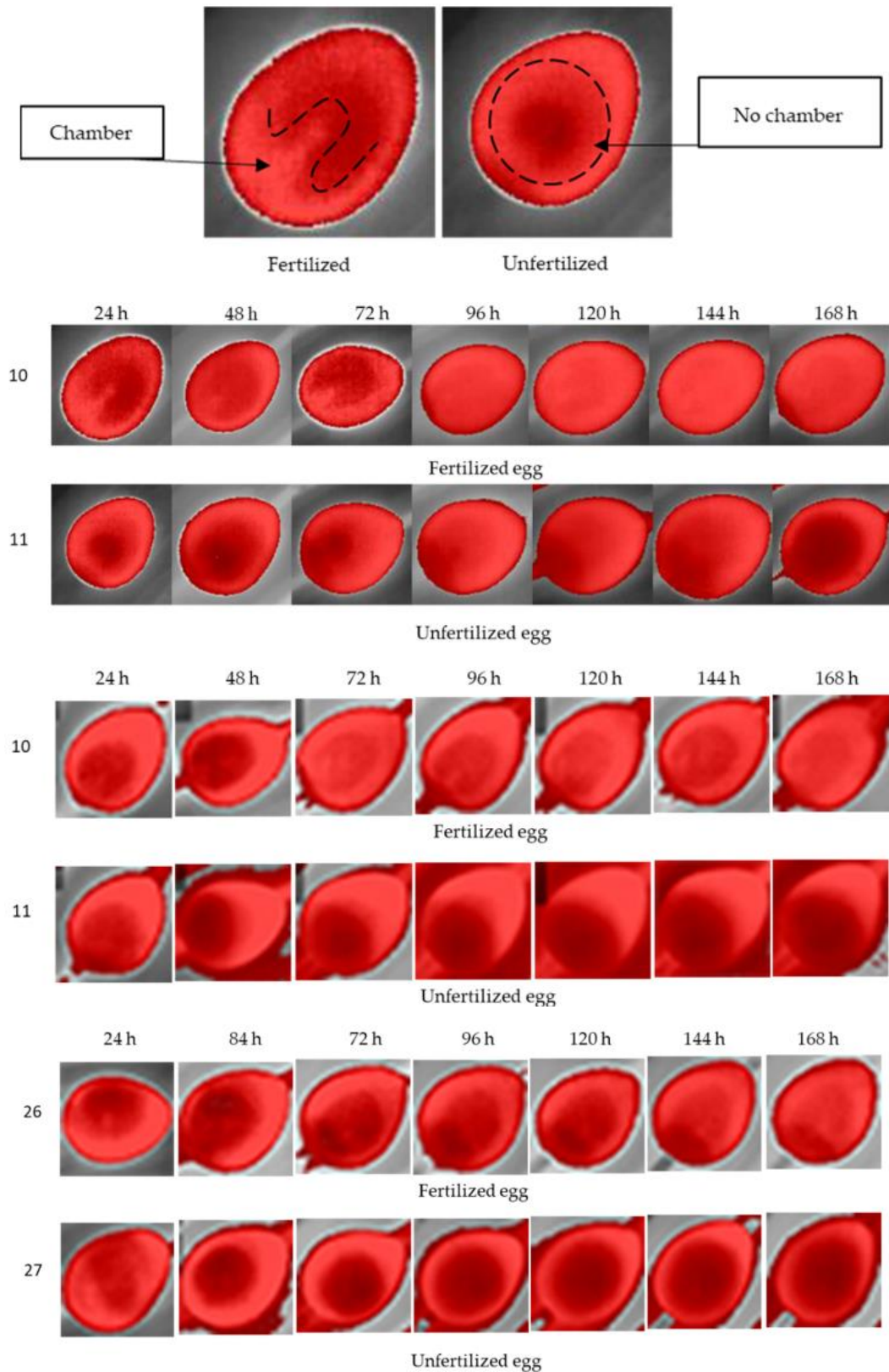


Рис. 54. Навчання та встановлення фактичного розвитку пташиного зародку у яйці нейромережею *YOLO*

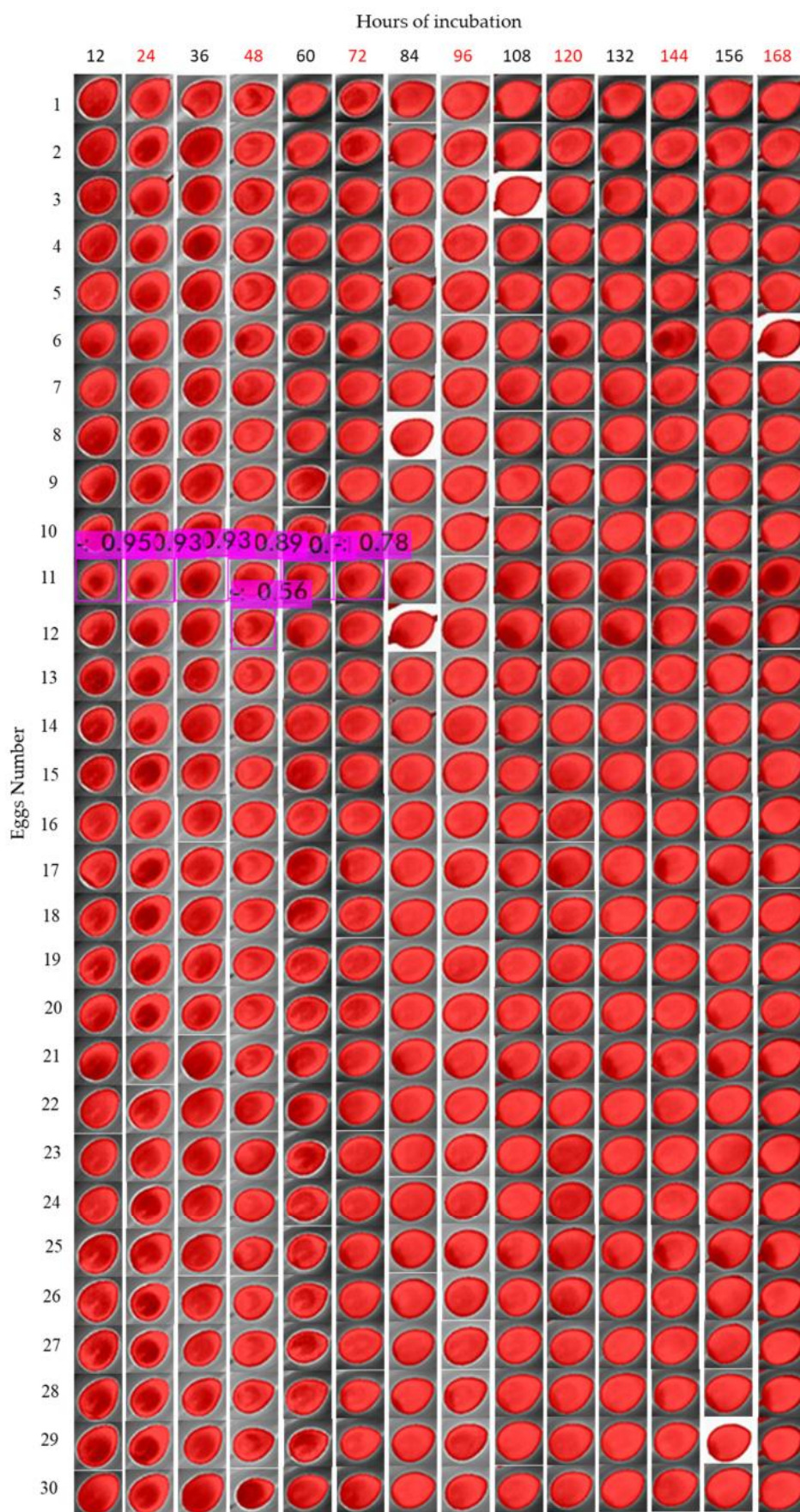


Рис. 55. База даних неймережі *YOLO* щодо поточного розвитку пташиного зародку у яйці з оцінкою вірогідності визначення та прогнозу

Медіанна схема взаємодії системи автоматизації інкубатору на базі *Arduino* з неймережними засобами *YOLO* проілюстрована на рис. 56 [65 – 78].

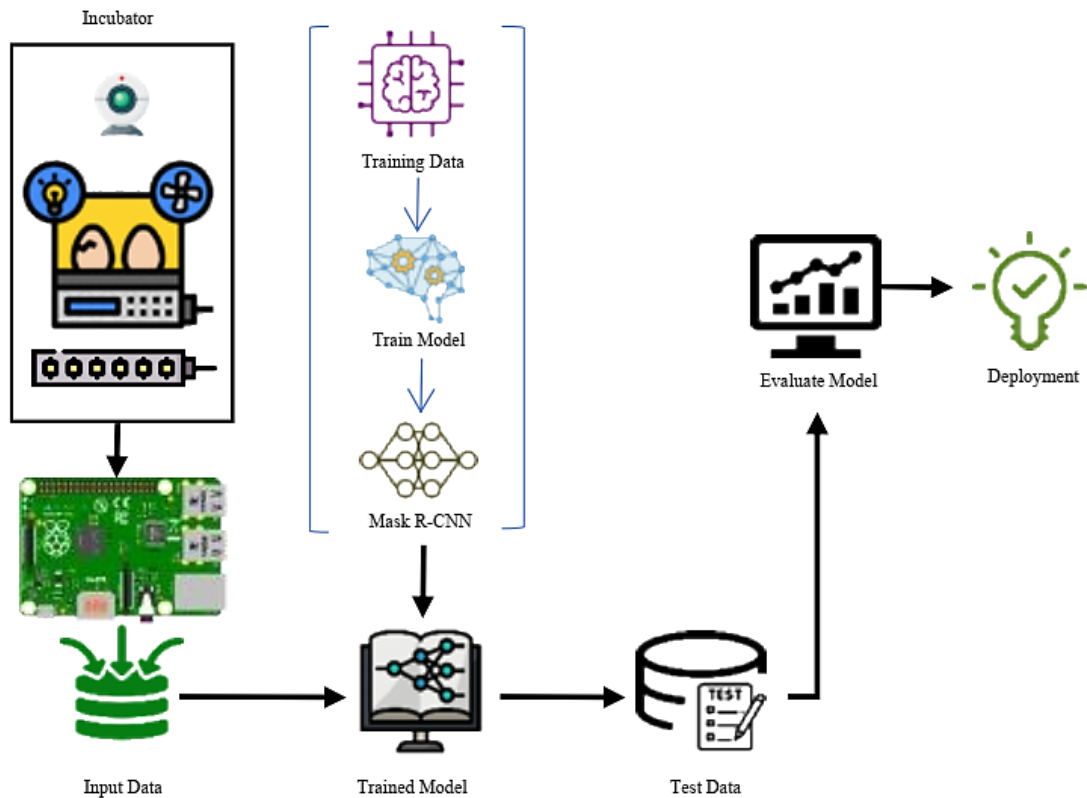


Рис. 56. Медіанна схема взаємодії системи автоматизації інкубатору на базі *Arduino* з неймережними засобами *YOLO*

Таким чином, неймережний засіб *YOLO* з термальною камерою *FLIR UAS* дозволяє удосконалити розроблену схему автоматизації процесу інкубації пташиних яєць в екосистемі *Arduino – CavyIoT* (Рисунок 35) не лише за підтримки індивідуальних потокових значень параметрів мікроклімату, а й безпосереднім моніторингом стану пташиного зародку у яйці з розумною системою прийняття рішень щодо подальшого провадження інкубації. Модернізована схема автоматизації матиме кращі показники виводку пташенят, що відповідно покращить техніко-економічні показники проектної системи автоматичного контролю.

3.2 Дослідження системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі

Для перевірки розробленої математичної моделі системи автоматичного керування мікрокліматичними параметрами інкубації пташиних яєць виконаємо відповідне чисельне моделювання з подальшою кореляцією з емпірично-натурними вимірами [42 – 49].

Досліджуваний інкубатор це технологічна камера (об'єм інкубаційної камери становить 1 м^3) з постійною температурою $37,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

В технологічній камері в період інкубації повинна підтримуватися температура на рівні $t_{\text{вн}}$ з відхиленням не більше $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, при допустимому відхиленні не більше $Q_{\text{яє}}^{\text{max}}$ та часу регулювання. Відносна вологість повітря $\varphi_{\text{вн}}$ (%) повинна бути номінальною з відхиленням не більше $\pm 5\%$. Повітрообмін повинен забезпечувати видалення вуглекислого газу CO_2 для зберігання кисневого балансу. Температурні та вологісні поля повинні бути рівномірними (в межах допустимих відхилень). Відносне розташування яєць в просторі під час інкубації повинно змінюватися. Технологічні вимоги до режиму інкубації представлені в табл. 6.

Табл. 6. Режим інкубації

Параметр, що контролюється	Значення
Температура повітря $t_{\text{вн}}$	$35,6 - 39,7 \text{ }^\circ\text{C}$
Відносна вологість повітря $\varphi_{\text{вн}}$	$40 - 60 \%$
Концентрація вуглекислого газу K_{CO_2}	$0,1 \%$

1. Розраховуємо кількість теплоти, що виділяється від біологічного процесу в курячому яйці (параметри процесу інкубації та дані результатів наведені в табл. 7). В якості спрощення було прийнято, що тепловиділення яйця

величина стала, а враховано тільки середню вагу 1 курячого яйця в залежності від категорії:

- 1 категорії – 60 г;
- 2 категорії – 50 г;
- 3 категорії - 40 г;

Табл. 7. Параметри процесу інкубації курячих яєць та кількість виділеної ними теплоти $Q_{яе}$

Доба	Тепловиділення яєць $q_{яе}$, Дж/кг на 1000 яєць	Кількість виділеної теплоти $Q_{яе}$, Дж на 1000 яєць		
		1 категорія	2 категорія	3 категорія
1	2	3	4	5
1	0,0	0	0	0
2	1,3	0,078	0,065	0,052
3	4,2	0,252	0,21	0,168
4	8,4	0,504	0,42	0,336
5	13,4	0,804	0,67	0,536
6	25,1	1,506	1,255	1,004
7	33,5	2,01	1,675	1,34
8	41,9	2,514	2,095	1,676
9	58,6	3,516	2,93	2,344
10	79,5	4,77	3,975	3,18
11	108,8	6,528	5,44	4,352
12	150,7	9,042	7,535	6,028
13	205,1	12,306	10,255	8,204
14	280,5	16,83	14,025	11,22
15	347,4	20,844	17,37	13,896
16	410,2	24,612	20,51	16,408
17	447,9	26,874	22,395	17,916
18	473,0	28,38	23,65	18,92
19	544,2	32,652	27,21	21,768
20	711,6	42,696	35,58	28,464
21	920,9	55,254	46,045	36,836

2. Розраховуємо втрати теплоти $Q_{m/вт}$ через стінки огороджувальної конструкції технологічної інкубаційної камери (дані наведені в табл. 8). В якості спрощення було прийнято, що температура зовнішнього повітря стала та становить $t_{зов} = 20$ °С. В якості утеплювача застосовуються плити з

мінеральної вати на синтетичному зв'язуючому товщиною $\delta = 50$ мм та коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,032$ Вт/(м \times °С) [42 – 49];

Табл. 8. Тепловтрати через огорожувальні конструкції технологічної інкубаційної камери

Найменування та температура внутрішнього повітря, $t_{вн}$, °С	Характеристика огородження			Коефіцієнт теплопередачі К, Вт/(м 2 ·°С)	Розрахункова різниця температур, $(t_{вн} - t_{зов})$ °С	Добавки		$1 + \Sigma\beta$	Тепловтрати через огородження, $Q_{т/вт}$, Дж
	Найменування огородження	Розміри в плані, а \times в, м	Площа, F, м 2			На орієнтацію	Інші		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Інкубатор + 37,5 °С	ЗС	1,0 \times 1,0	6,0	0,64	17,5	–	–	1,0	67,2

3. Розраховуємо кількість теплоти Q_{np} , необхідну для нагрівання припливного повітрям. В процесі інкубації яйця поглинають велику кількість кисню та виділяють багато вуглекислого газу. Вміст кисню в повітрі менше 18-15 % призводить до загибелі зародку. Концентрація вуглекислого газу вище 1% затримує ріст та збільшує смертність зародків. Тому необхідно забезпечити регулярний повітрообмін в інкубаторі: він має бути невеликим на початку та значно збільшуватися в другий період інкубації. В повітрі інкубатора повинно міститись 21% кисню і не більше 0,05-0,1% вуглекислого газу. Нормальний склад повітря забезпечується при 5-кратному його обміні за годину. Виділення вуглекислого газу в об'ємі інкубатора наведені в табл. 9 [42 – 49];

Табл. 9. Виділення вуглекислого газу ембріонами

Доба	Виділення вуглекислого газу CO ₂ г/год на 1000 яєць		
	Кури	Вутки	Гуси
1	2	3	4
1	0,5	0,8	0,4
2	0,5	0,8	0,8
3	0,5	0,8	1,2
4	0,6	0,7	1,5
5	1,0	0,6	1,8
6	1,5	0,7	2,1
7	2,5	0,8	2,5
8	3,1	1,1	2,8
9	4,3	1,4	3,4
10	5,8	1,8	3,7
11	8,0	2,5	5,1
12	12,0	3,2	7,4
13	15,0	3,5	8,9
14	20,6	4,9	11,7
15	25,5	7,4	15,4
16	30,1	10,7	20,3
17	32,9	16,0	27,0
18	43,9	20,9	35,5
19	49,9	24,6	37,5
20	52,2	28,2	52,2
21	65,3	32,2	59,9

Як видно з табл. 9, виділення вуглекислого газу збільшується з розвитком ембріонів, але орієнтуватися потрібно на максимальне виділення, тобто на останній день інкубації [42 – 49].

В нормальному атмосферному повітря кисень складає приблизно 5-ту частину, тому повітрообмін в інкубаторі буде складати, г/год – ф. (10):

$$G_{\min} = 0,5 \cdot 5 = 2,5;$$

$$G_{\max} = 65,3 \cdot 5 = 326,5.$$
(10)

Тепер необхідно перевести вагу повітря в об'єм. 1 м³ повітря важить 1,29 кг. Тому визначаємо об'ємні витрати повітря, м³/год – ф. (10):

$$L_{\min} = \frac{G_{\min}}{\rho} = \frac{2,5}{1,29} = 1,938;$$

$$L_{\max} = \frac{G_{\max}}{\rho} = \frac{326,5}{1,29} = 253,1.$$
(11)

Необхідно також враховувати дихальний коефіцієнт ембріонів, він дорівнює 0,73. Таким чином – ф. (12):

$$L_{\min'} = \frac{L_{\min}}{0,73} = \frac{1,938}{0,73} = 2,655;$$

$$L_{\max'} = \frac{L_{\max}}{0,73} = \frac{253,1}{0,73} = 336,7.$$
(12)

Об'єм технологічної інкубаційної камери становить 1 м³ і тому, беручи до уваги те, що вентилятор 3/4 своєї продуктивності витрачає на переміщення повітря всередині інкубаційного об'єму, потрібно, з урахуванням коефіцієнта запасу, обрати вентилятор, витрати повітря якого не менші ніж 345,0 м³/год (з урахуванням посиленого виділення ембріонами вуглекислого газу на останній стадії інкубації). Для забезпечення розрахункового повітрообміну доцільно встановити двошвидкісний вентилятор ВЕНТС 150 Х1 турбо, максимальна продуктивність якого становить 345,0 м³/год [42 – 49].

Потужність електродвигуна (кВт) вентилятора при нехтуванні зміни густини повітря визначається співвідношенням – ф. (13):

$$P = k_3 \cdot \frac{3,6 \cdot \rho \cdot L}{\eta_{\text{заг}}},$$
(13)

де p – тиск повітря, що створюється вентилятором, Па;

L – витрати повітря, м³/год.

Загальний ККД вентиляторної установки інкубатора – ф. (14):

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_6 \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{пер}}, \quad (14)$$

де η_6 – ККД вентилятора;

$\eta_{\text{пр}}$ – ККД привода;

$\eta_{\text{пер}}$ – ККД передачі.

Коефіцієнт запасу k_3 приймемо рівним 1,1.

Значення величини потужності електродвигуна становить 10 Вт. Обраний вентилятор ВЕНТС 150 X1 турбо укомплектований електродвигуном потужністю 12 Вт і має ступінь захисту IP 24, що цілком придатний для приведення в рух обраного вентилятора.

Таким чином кількість теплоти на нагрівання припливного повітря, Дж:

$$Q_{\text{пр}}^{\text{min}} = 0,0167;$$

$$Q_{\text{пр}}^{\text{max}} = 2,12.$$

4. Розраховуємо кількість теплоти, яка витрачається на зволоження повітря. На І – d діаграмі вологого повітря визначаємо параметри середовища в об'ємі інкубатора (рис. 57) [42 – 49]:

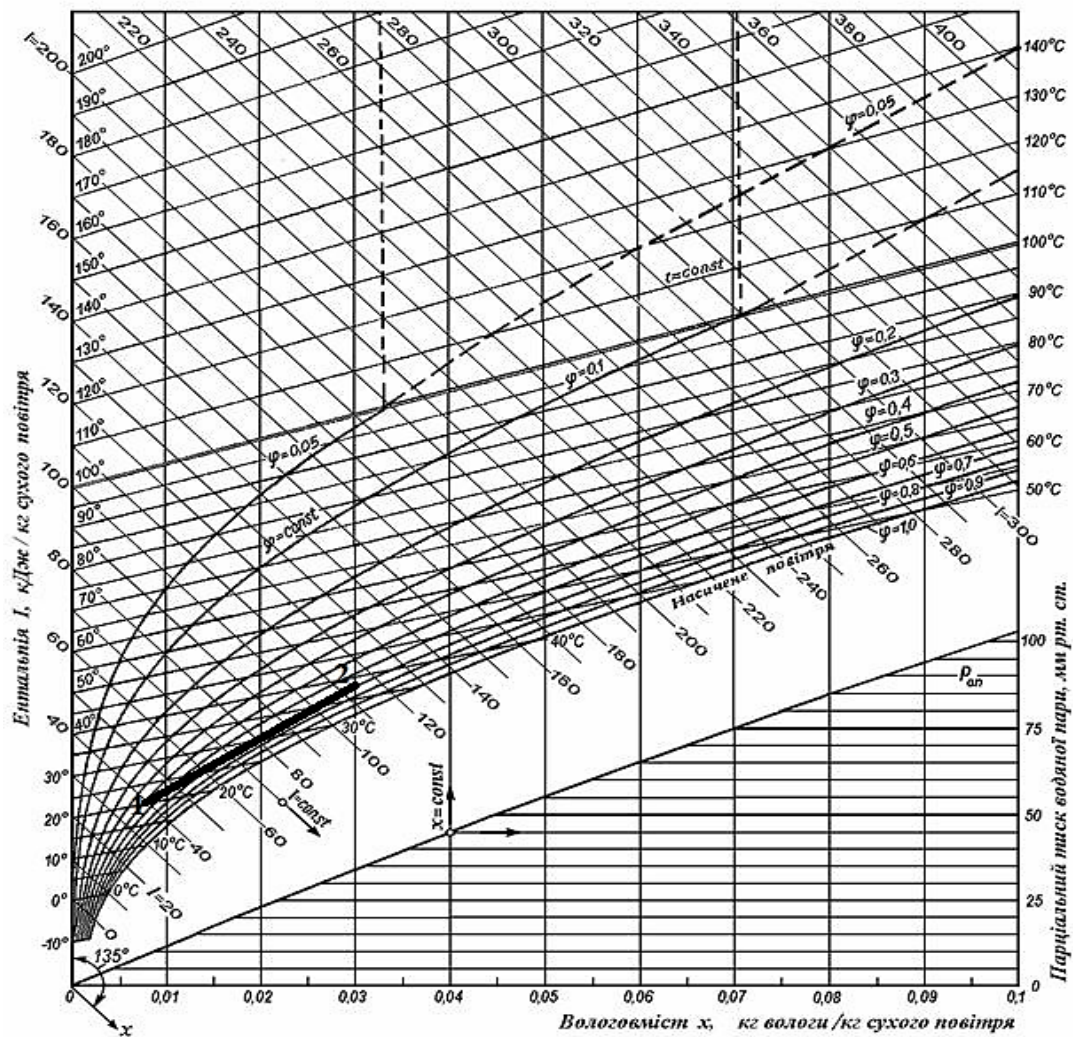


Рис. 57. I – d діаграма вологого повітря

Відповідно до рис. 57:

- точка 1 – параметри води, яка вноситиметься в інкубатор для зволоження: $t_1 = +20,0 \text{ }^\circ\text{C}$; $I_1 = 38 \text{ кДж/кг}$; $\varphi_1 = 50 \%$; $d_1 = 8,6 \text{ г/кг}$;
- точка 2 – параметри повітря, яке необхідно підтримувати в інкубаторі: $t_2 = +37,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $I_2 = 112 \text{ кДж/кг}$; $\varphi_2 = 60 \%$; $d_2 = 30,0 \text{ г/кг}$.

Визначаємо кількість води, яку потрібно подавати в камеру інкубатора, кг – ф. (15) [42 – 49]:

$$W = L \cdot \rho \cdot (d_2 - d_1) \cdot 10^{-3} \cdot \tau, \quad (15)$$

де d_2 – вологовміст повітря на виході з технологічної камери інкубатора, г/кг;

d_1 – вологовміст повітря на вході в камеру інкубатора г/кг.

Відповідно до ф. (15):

$$W_{\min} = 0,073;$$

$$W_{\max} = 9,295.$$

Кількість теплоти, яка витрачається на зволоження повітря, Дж:

$$Q_{зв}^{\min} = 0,05;$$

$$Q_{зв}^{\max} = 6,45.$$

5. Виходячи з рівняння теплового балансу обраховуємо кількість теплоти, яка надходить від внутрішніх джерел, Дж – ф. (16) [42 – 49]:

$$Q_p = Q_{m/вт} + Q_{зв} + Q_{пр} - Q_{яе}. \quad (16)$$

Дані результатів розрахунків наведено в табл. 10 та на рис. 58.

Табл. 10. Розрахункові значення складових теплового балансу

Доба	$Q_{яе}$, Дж	$Q_{m/вт}$, Дж	$Q_{пр}$, Дж	$Q_{зв}$, Дж	Q_p , Дж
1	2	3	4	5	6
1	0	67,2	16,73	0,79	84,73
2	0,052	67,2	16,73	0,79	84,67
3	0,168	67,2	16,73	0,79	84,56
4	0,336	67,2	20,08	0,95	87,89

1	2	3	4	5	6
5	0,536	67,2	33,46	1,59	101,71
6	1,004	67,2	50,19	2,38	118,77
7	1,34	67,2	83,65	3,97	153,49
8	1,676	67,2	103,73	4,93	174,18
9	2,344	67,2	143,89	6,83	215,57
10	3,18	67,2	194,08	9,22	267,31
11	4,352	67,2	244,75	12,71	320,31
12	6,028	67,2	332,71	19,07	412,95
13	8,204	67,2	372,86	23,84	455,69
14	11,22	67,2	453,00	32,73	541,71
15	13,896	67,2	487,59	40,52	581,41
16	16,408	67,2	483,46	47,83	582,08
17	17,916	67,2	478,10	52,28	579,67
18	18,92	67,2	470,07	69,76	588,11
19	21,768	67,2	467,53	75,30	588,26
20	28,464	67,2	449,15	88,90	576,79
21	36,836	67,2	437,01	103,76	571,14

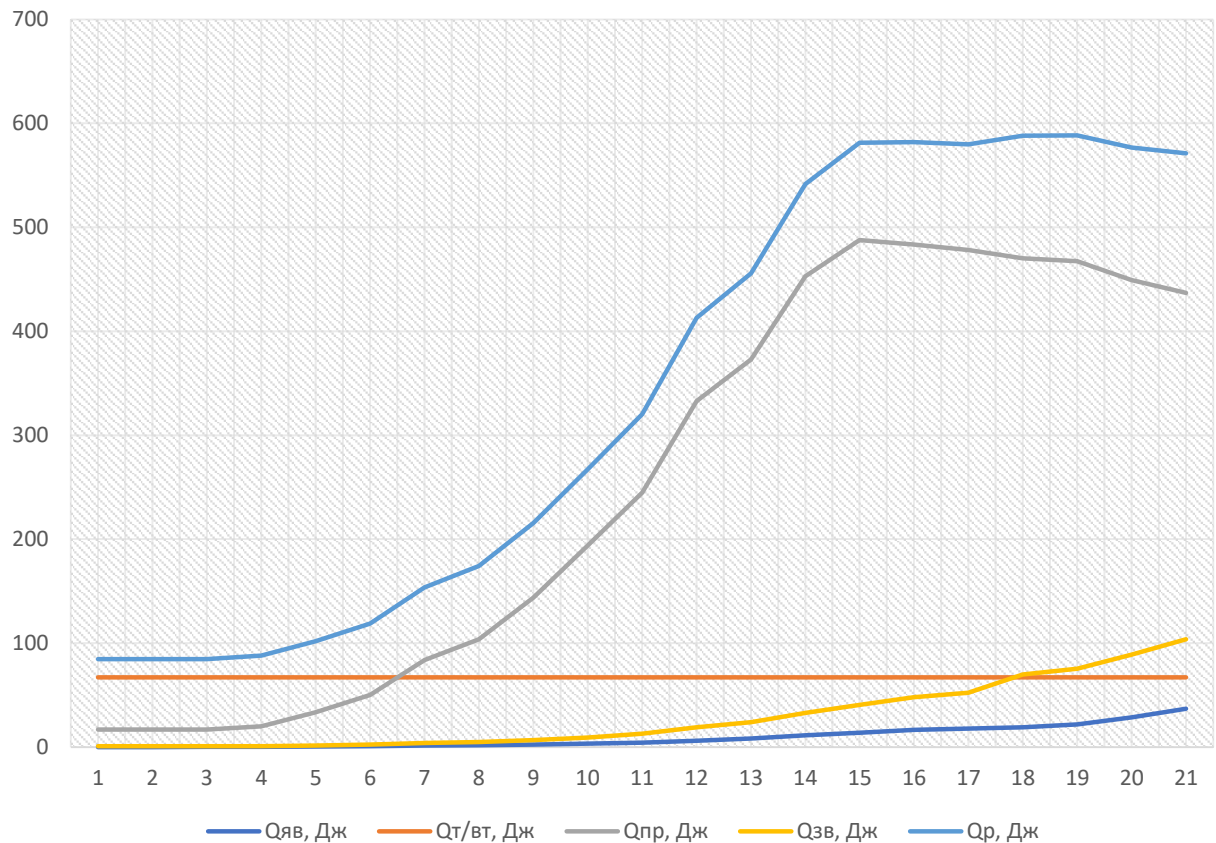
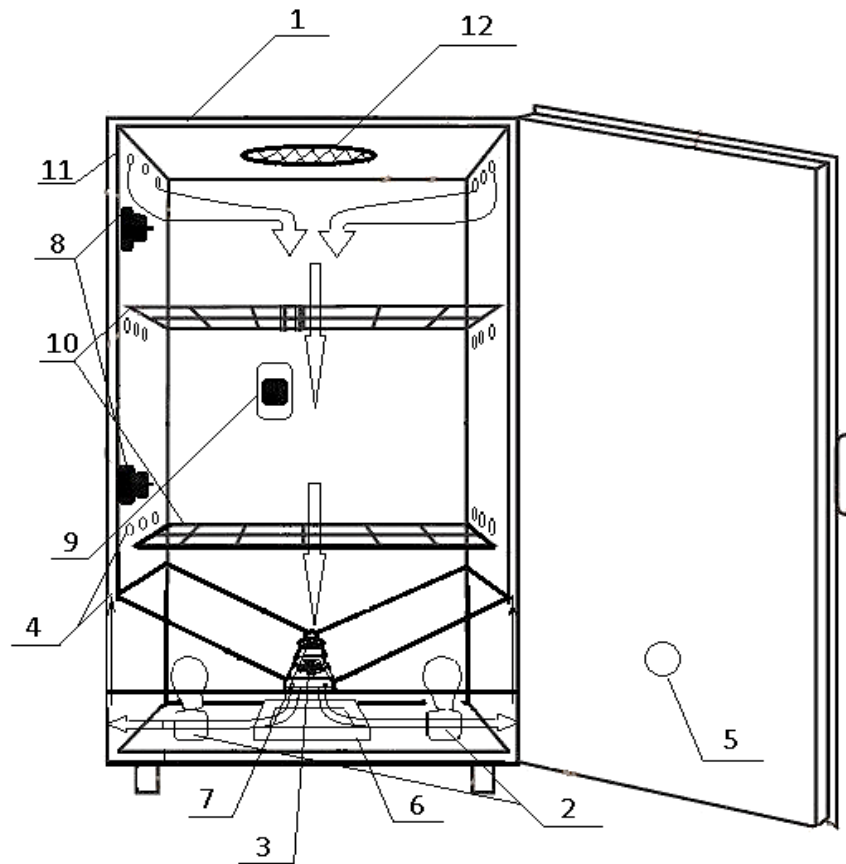


Рис. 58. Тепловий баланс інкубатора

Далі проводимо лабораторне дослідження проектного зразка автоматизованого інкубатору – рис. 59.



1 – огорожувальна конструкція інкубатора (корпус); 2 - інфрачервоні лампи розжарювання; 3 - двошвидкісний вентилятор; 4 - повітряний канал в корпусі; 5,12 - вентиляційні технологічні отвори, обладнані припливним та витяжним вентиляторами, відповідно; 6 - ванна з водою; 7 - генератор туману; 8 – система нейромержного моніторингу в двох зонах об'єму; 9 - вимірювальний перетворювач температури і вологості DHT11; 10 – механізовані лотки для інкубаційного матеріалу, обладнані сервоприводом; 11 - бокова стінка каналу з отворами

Рис. 59. Проектний зразок інкубатору

Проектний зразок інкубатору оснащується відповідними елементами автоматизованого контролю, передбаченими в п. 2.3 та 3.1 поточного дослідження – рис. 60.

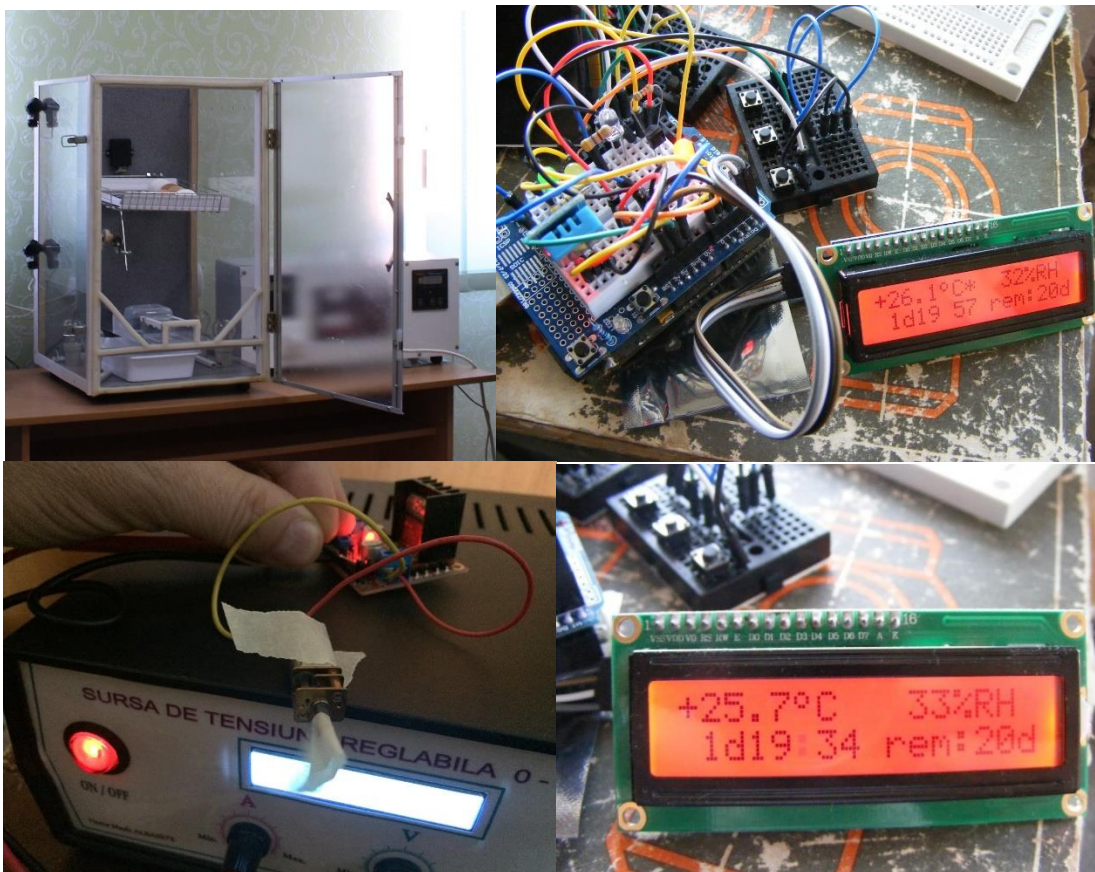


Рис. 60. Проектно-дослідний зразок автоматизованого інкубатора

Результати лабораторних вимірів наводяться в табл. 11.

Табл. 11. Результати лабораторних досліджень

Доба	$Q_{\text{яе}}$, Дж	$Q_{\text{т/вт}}$, Дж	$Q_{\text{пр}}$, Дж	$Q_{\text{зв}}$, Дж	$Q_{\text{р}}$, Дж
1	2	3	4	5	6
1	0	15,36	1,61	0,081	17,05
2	0,000218	15,36	1,93	0,081	17,37
3	0,000706	15,36	1,93	0,081	17,37
4	0,001411	15,36	1,93	0,081	17,37

З метою перевірки правильності розробленої математичної моделі, було виконано порівняння результатів розрахунку теплового режиму інкубатора з результатами лабораторного експерименту (рис. 61 – 64).

В табл. 12 – 15 приведені дані, які дають змогу порівняти тепловий режим інкубатора, розрахований за допомогою розробленої математичної моделі та одержаний внаслідок лабораторних досліджень.

Табл. 12. Тепловиділення від яєць (теоретичні та лабораторні дані)

№ п/п	Час τ , доба	Теоретичні дані $Q_{яе}$, Дж	Експериментальні дані $Q_{яе}$, Дж	Абсолютне відхилення, °C	Відносне відхилення, %
1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	0	0
2	2	0,000218	0,000208	-0,0000104	-5
3	3	0,000706	0,000672	-3,36E-05	-5
4	4	0,001411	0,001344	-6,72E-05	-5

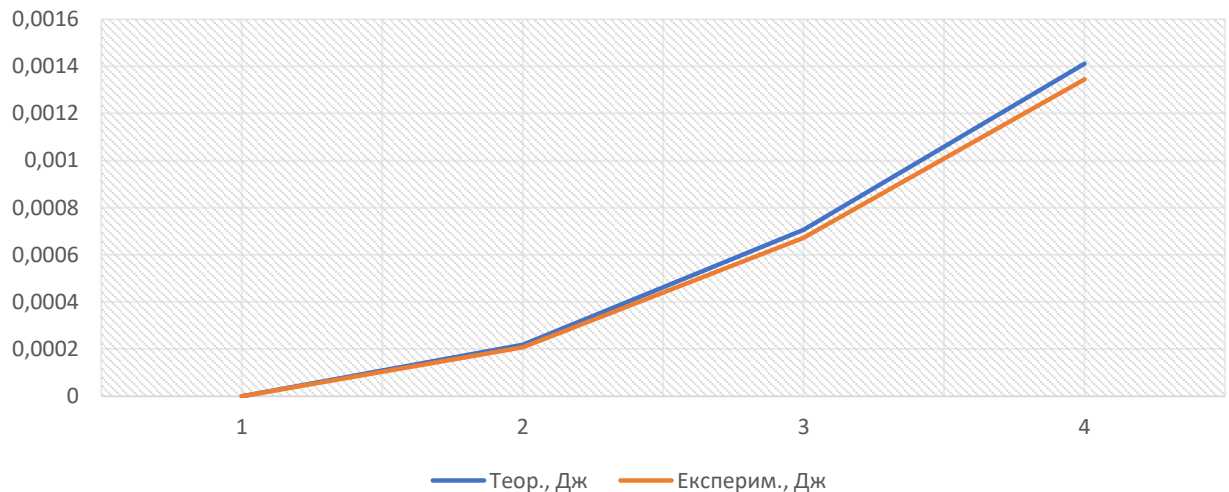


Рис. 61. Порівняння результатів тепловиділень від яєць

Табл. 13. Теплота на зволоження повітря (теоретичні та лабораторні дані)

№ п/п	Час τ , доба	Теоретичні дані $Q_{зв}$, Дж	Експериментальні дані $Q_{зв}$, Дж	Абсолютне відхилення, °C	Відносне відхилення, %
1	2	3	4	5	6
1	1	1,606	1,673	0,07	3,99
2	2	1,820	1,673	-0,15	-8,79
3	3	1,820	1,673	-0,15	-8,79
4	4	1,927	2,008	0,08	4,01

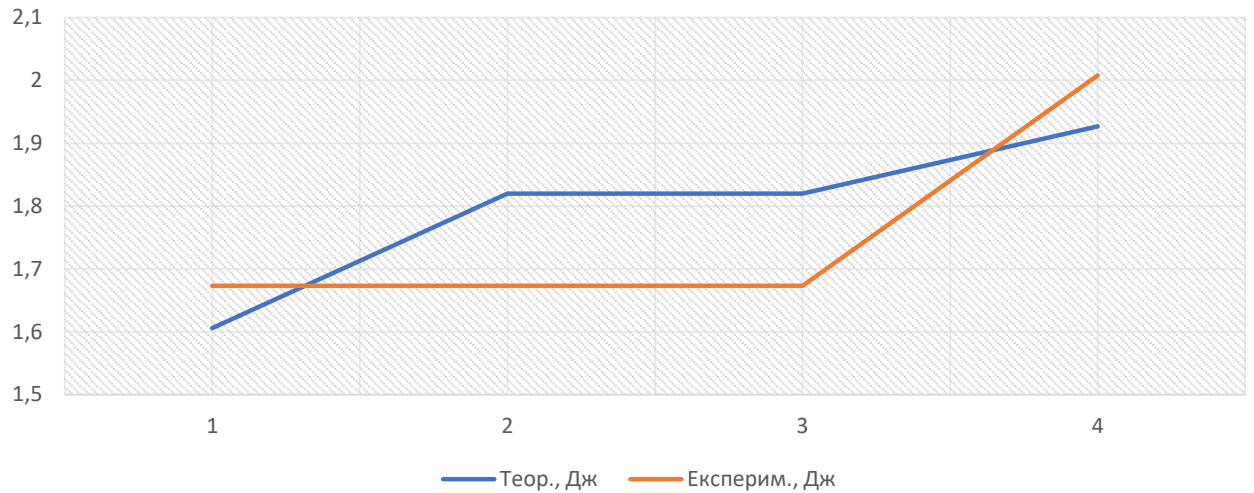


Рис. 62. Порівняння результатів на нагрівання припливного повітря

Табл. 14. Теплота на нагрівання повітря (теоретичні та лабораторні дані)

№ п/п	Час τ , доба	Теоретичні дані Q_{np} , Дж	Експериментальні дані Q_{np} , Дж	Абсолютне відхилення, °С	Відносне відхилення, %
1	2	3	4	5	6
1	1	0,0806	0,0790	-0,002	-1,969
2	2	0,0806	0,0790	-0,002	-1,969
3	3	0,0806	0,0790	-0,002	-1,969
4	4	0,0806	0,0900	0,009	10,494

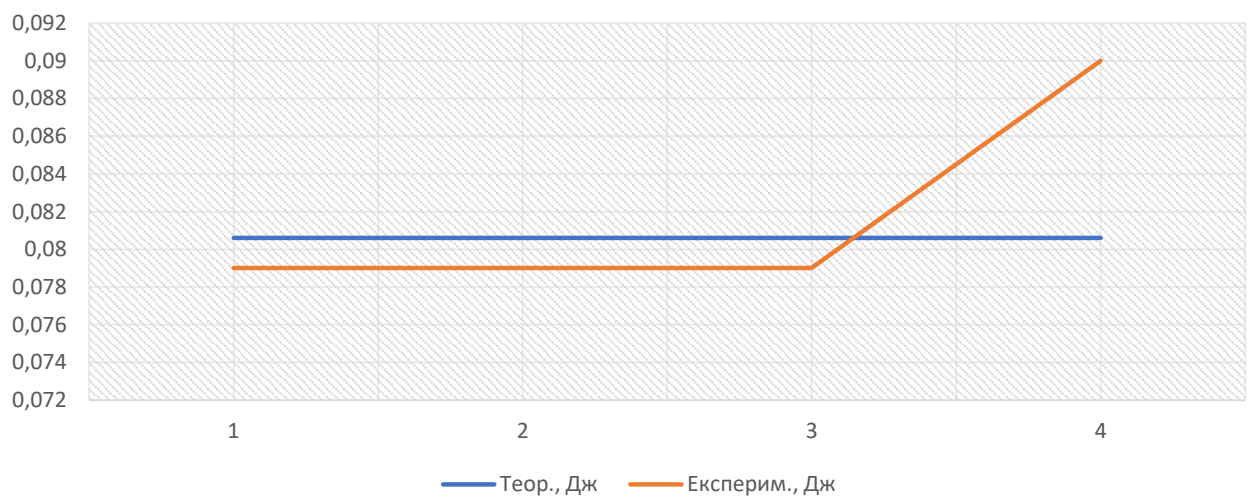


Рис. 63. Порівняння результатів на процес зволоження повітря

Табл. 15. Теплота на додаткове джерело (теоретичні та лабораторні дані)

№ п/п	Час τ , доба	Теоретичні дані Q_p , Дж	Експериментальні дані Q_p , Дж	Абсолютне відхилення, °C	Відносне відхилення, %
1	2	3	4	5	6
1	1	17,047	19,600	2,553	13,027
2	2	17,367	19,691	2,324	11,805
3	3	17,367	19,775	2,408	12,176
4	4	17,367	20,100	2,733	13,599

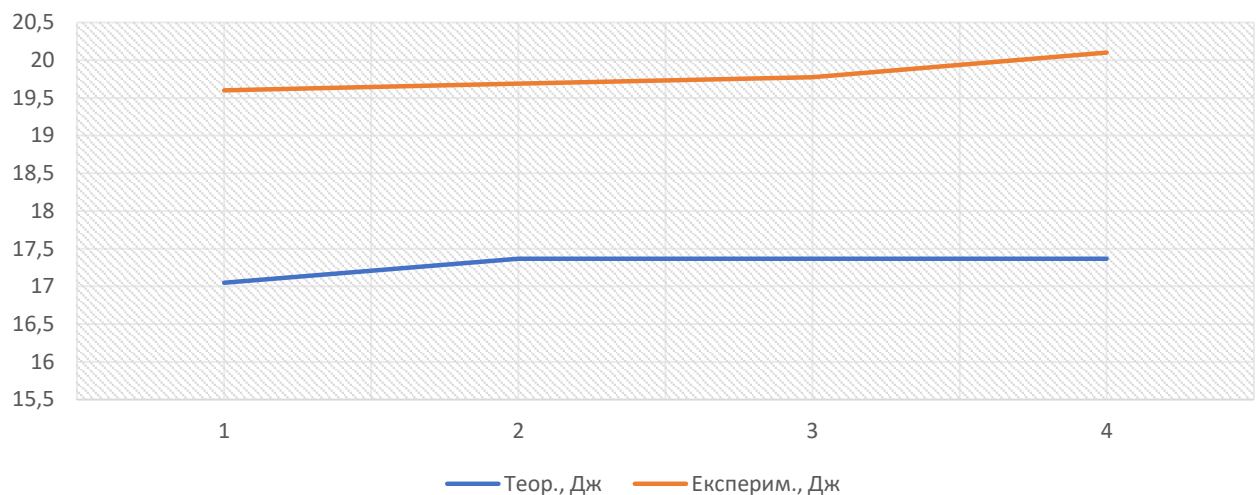


Рис. 64. Порівняння результатів теплоти на додаткове джерело

Порівняння теоретичних та експериментальних даних свідчить про те, що розроблена математична модель з високим ступенем достовірності описує тепловий режим автоматизованого інкубатора.

3.3 Встановлення доцільних параметрів функціонування системи автоматичного контролю та моніторингу параметрів мікроклімату в інкубаторі за результатами експериментального дослідження та моделювання

За результатами вишукувань у п. 2.3 поточного дослідження встановлено, що для досліджуваного об'єкту автоматизації найбільш доцільним методом синтезу та закону керування є метод логічного нечіткого

керування, що дозволяє контролеру приймати адекватні рішення, відповідно до індивідуальних потреб кожної партії інкубованих пташиних яєць.

Після дефазифікації результат можна проаналізувати за допомогою двох виходів. Протягом перших 17 діб можна спостерігати, що коли температура та вологість становили 38 °C і 53,60 %, оцінка стабілізованого тепла та швидкості вентилятора становила 5,00 і 5,00 відповідно (розглядається в діапазоні 10) – табл. 16.

Табл. 16. Результати автоматизованого керування за принципом нечіткої логіки протягом перших 17 діб

Температура, °C	Відносна вологість, %	Тепловий потік (діапазон регулювання від 0 до 10)	Швидкість вентилятора (діапазон регулювання від 0 до 10)
1	2	3	4
0.00	34.30	7.02	6.06
24.70	45.20	6.38	5.79
34.30	48.80	5.68	5.37
35.50	51.20	5.33	5.00
38.00	53.60	5.00	5.00
41.60	58.40	4.80	4.40
50.00	17.50	4.25	7.20
58.40	62.00	3.43	3.92
64.50	69.30	3.19	3.65
76.50	75.30	3.09	3.64

Для періоду 18-21 діб критерії відносної вологості змінювалися в міру підвищення рівня вологості. Було видно, що коли температура та вологість становили 38,2 °C та 64,10 %, оцінка стабілізованого тепла та швидкості вентилятора становила 5,00 та 5,00 відповідно – табл. 17.

Наступний графік (рис. 65) представляє співвідношення між вхідними і вихідними параметрами у системі нечіткої логіки. Спостерігаючи за графіком, можна зробити висновок, що коли температура підвищується, розподіл тепла падає, але такі зміни змінюються нелінійним чином.

Табл. 17. Результати автоматизованого керування за принципом нечіткої логіки протягом періоду 18-21 діб

Температура, °C	Відносна вологість, %	Тепловий потік (діапазон регулювання від 0 до 10)	Швидкість вентилятора (діапазон регулювання від 0 до 10)
1	2	3	4
0.00	34.10	6.98	6.28
22.30	40.40	5.80	6.00
33.10	52.20	5.26	5.47
35.50	59.20	5.06	5.20
38.20	62.60	5.00	5.00
40.40	64.10	4.86	4.17
51.20	19.90	4.25	7.60
57.20	80.10	3.23	3.52
68.10	85.70	3.19	3.25
76.50	87.30	3.06	3.04

Зі збільшенням вологості в інкубаційній камері швидкість вентилятора зволожувача значно зменшується.

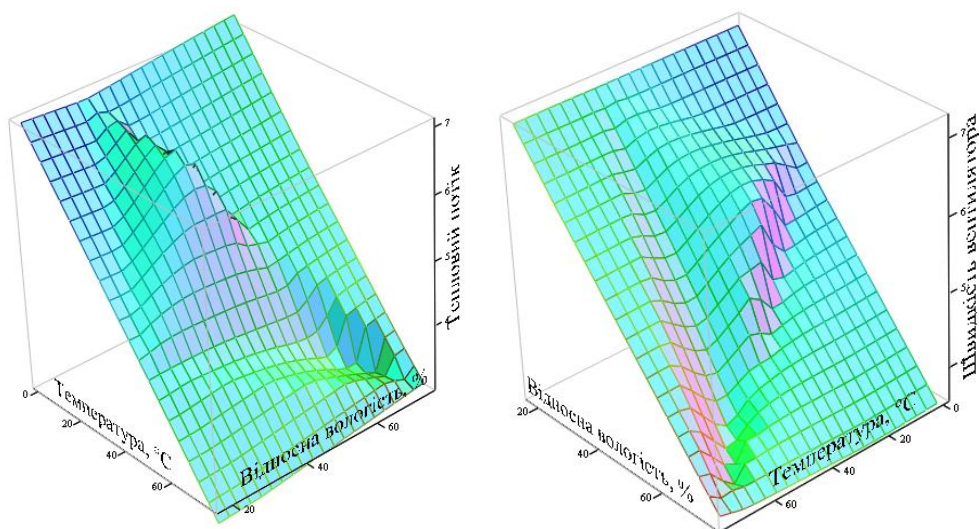


Рис. 65. Графік, що відображає зміни тепла та швидкості вентилятора протягом першого періоду інкубації: 1–17 діб

На період 18-21 діб процедура інкубації вимагає додаткового зволоження. Протягом цього періоду оптимальний рівень температури залишається незмінним, а відповідно і тепловий потік. Відношення між

вхідними і вихідними параметрами зображено на наступному графіку (рис. 66).

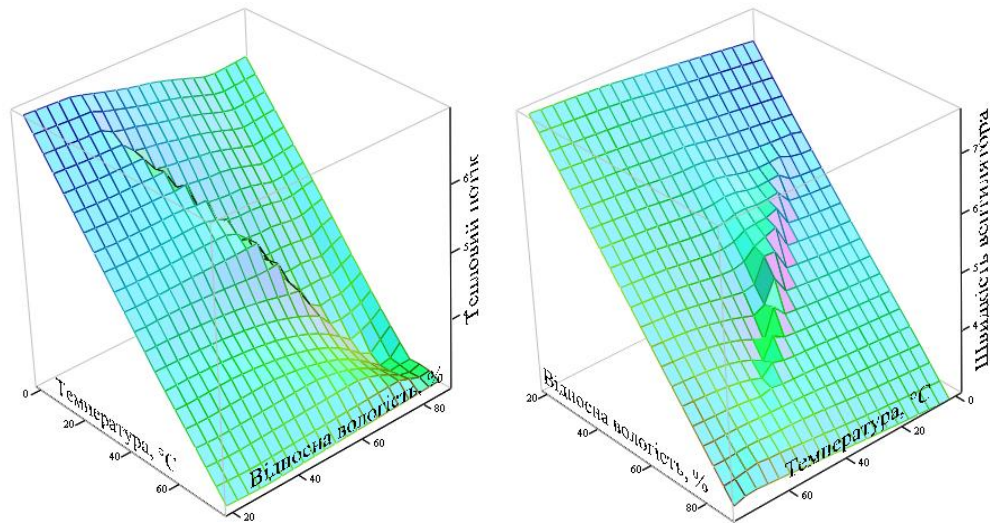


Рис. 66. Графік, що відображає зміни тепла та швидкості вентилятора протягом другого періоду інкубації: 18–21 діб

Запропонований принцип нечіткої логіки для автоматичного контролю інкубації пташиних яєць дозволяє чітко та плавно змінювати вихідні параметри об'єкта автоматизації: тепловий потік та швидкість вентилятора, що має прямі економічні наслідки, оскільки перевищення температури на 1–2 °C протягом періоду інкубації можуть призвести до раннього вилуплення з високим рівнем смертності та, навпаки, утримування теплового режиму інкубації з температурою нижче на 1–2 °C від необхідної призводить до пізнього та низького за рівнем вилуплення.

Система нечітких обмежень, що застосовується для системи автоматизованого керування за принципом нечіткої логіки для проектного інкубатора пташиних яєць ефективно контролює вхідні параметри, які змінюються непередбачувано та нелінійно за своєю природою. Враховуючи такі випадки, система виробляє стабілізовані рівні вихідних параметрів. Проектні рішення розроблені з метою зменшити вірогідні причини загибелі ембріонів і, зрештою, підвищити якість і ефективність виробництва птиці.

Одночасно, використання системи нейромережного моніторингу процесу інкубації дозволило значно покращити показники вилуплення кожного експериментального покоління пташиних яєць – рис. 67.

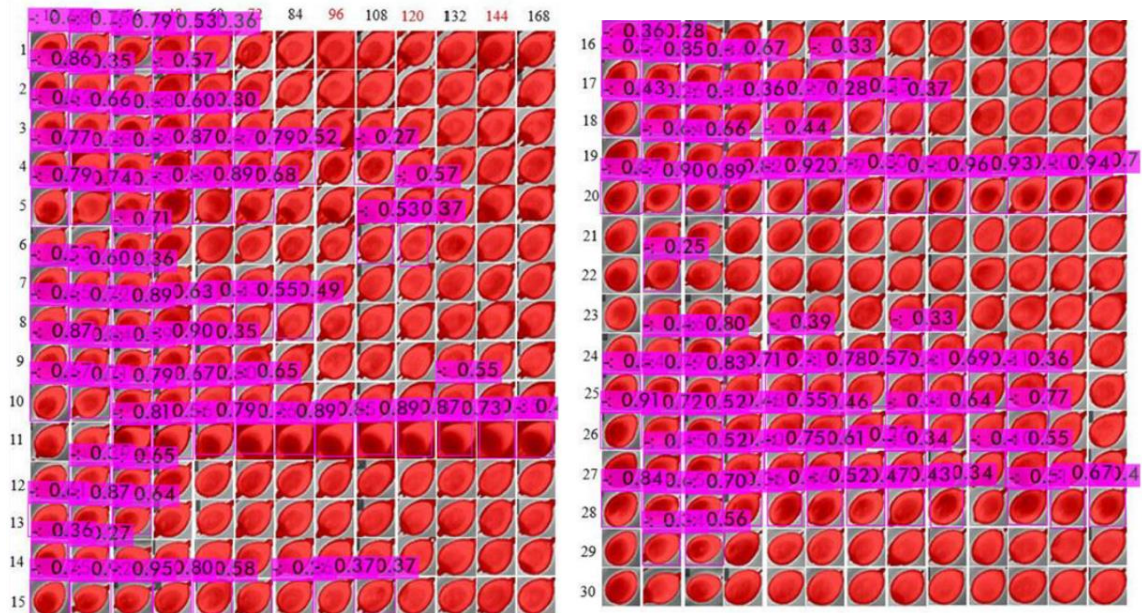


Рис. 67. Результати нейромережного моніторингу інкубації

Таким чином, застосування сучасних рішень автоматизованого контролю, сформовані з урахуванням адекватної математичної моделі та продуктами четвертої хвилі технологічного розвитку (системи нечіткої логіки та нейромережного моніторингу прийняття рішень) дозволяє значно покращити результативність інкубації пташиних яєць, зменшивши ймовірність завмирання пташиних ембріонів на різних етапах дозрівання, що призводить до високого рівні вилуплення, а відтак, має прямі економічні наслідки.

4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

Головний елемент проектної схеми автоматизації інкубатора пташиних яєць – контролерна плата – *Arduino Uno Rev3* [79].

Arduino Uno Rev3 [79] має наступні технічні особливості:

- процесор ATMega328P;
- модулі пам'яті:
 - a. процесор AVR до 16 МГц;
 - b. 32 КБ Flash;
 - c. 2 КБ SRAM;
 - d. 1 КБ EEPROM;
- індикатори безпеки:
 - a. скидання при включенні (POR);
 - b. індикація аварійних ситуацій (BOD);
- периферійні пристрої:
 - a. 2×8-бітний таймер/лічильник із спеціальним реєстром періодів і порівнянням каналів;
 - b. 1×16-розрядний таймер/лічильник із спеціальним регістром періоду, записом вхідних даних і каналами порівняння;
 - c. 1×USART з генератором дробової швидкості передачі даних і визначенням початку кадру;
 - d. 1×контролер/периферійний послідовний периферійний інтерфейс (SPI);
 - e. 1×дворежимний контролер/периферійний I2C;
 - f. 1×аналоговий компаратор (AC) з масштабованим опорним входом;
 - g. сторожовий таймер з окремим вбудованим генератором;
 - h. шість каналів ШІМ;
 - i. переривання та активація при зміні PIN-коду;

- процесор ATmega16U2: 8-розрядний мікроконтролер на базі AVR® RISC;
- модулі пам'яті:
 - a. 16 КБ ISP Flash
 - b. 512В EEPROM
 - c. 512В SRAM
 - d. інтерфейс debugWIRE для налагодження та програмування на чіпі
- параметри живлення: 2,7-5,5 В.

Топологічна схема *Arduino Uno Rev3* [79] позначена на рис. 68.

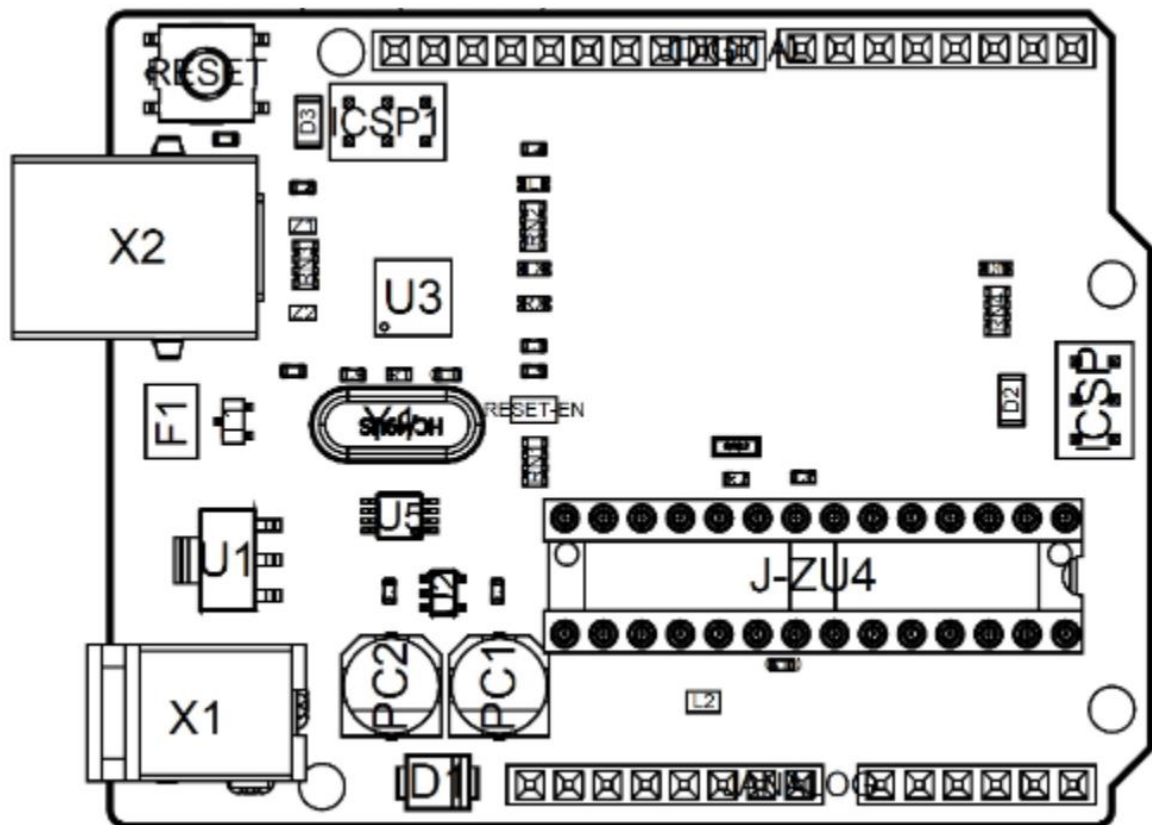


Рис. 68. Топологічна схема *Arduino Uno Rev3* [79]

Склад елементів, відповідно до топологічної схеми (рис. 68), наводиться в табл. 18.

Табл. 18. Складові топологічної схеми *Arduino Uno Rev3* [79] (рис. 68)

№ на схемі	Опис	№ на схемі	Опис
X1	Роз'єм живлення 2,1×5,5 мм	U1	Регулятор SPX1117M3-L-5
X2	Роз'єм USB B	U3	Модуль ATMEGA16U2
PC1	EEE-1EA470WP 25V SMD конденсатор	U5	LMV358LIST-A.9 IC
PC2	EEEEEE-1EA470WP 25V SMD конденсатор	F1	Конденсатор мікросхеми високої щільності
D1	Випрямляч CGRA4007-G	ICSP	Штифтовий роз'єм (через отвір б)
J-ZU4	Модуль ATMEGA328P	ICSP1	Штифтовий роз'єм (через отвір б)
Y1	Осцилятор ECS-160-20-4X-DU		

Основним процесором є ATmega328P, що працює на частоті до 20 МГц. Більшість його контактів підключено до зовнішніх роз'ємів, однак деякі зарезервовані для внутрішнього зв'язку з співпроцесором *USB Bridge*.

Схема живлення *Arduino Uno Rev3* [79] наводиться на рис. 69.

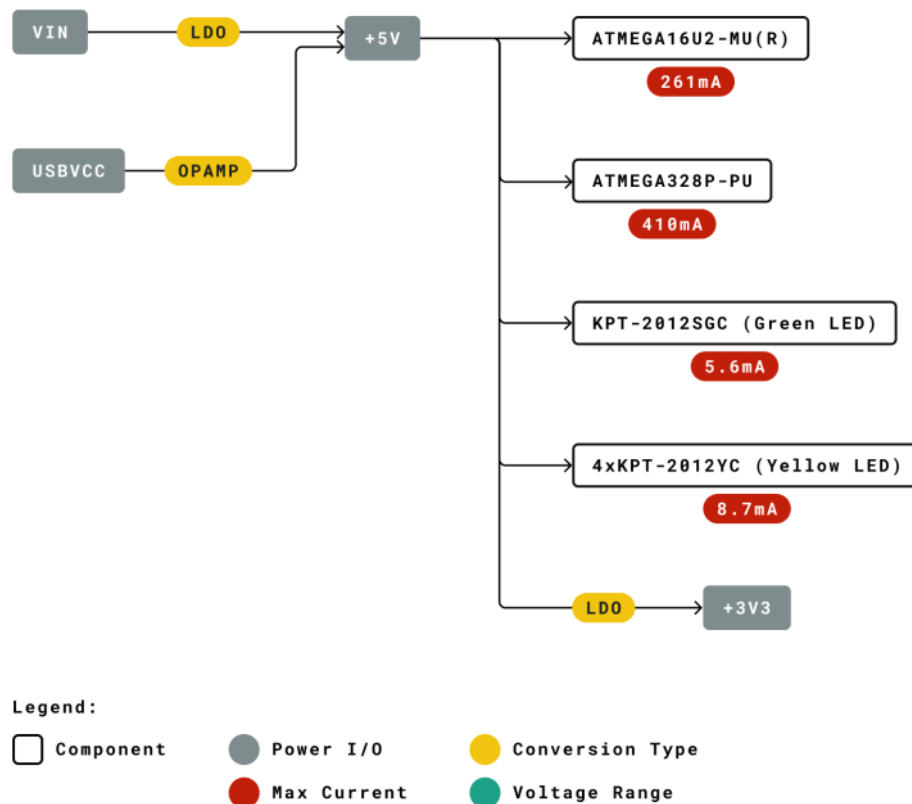
Рис. 69. Принципіальна схема живлення *Arduino Uno Rev3* [79]

Схема пінування мікропроцесорної плати *Arduino Uno Rev3* [79] наводиться на рис. 70.

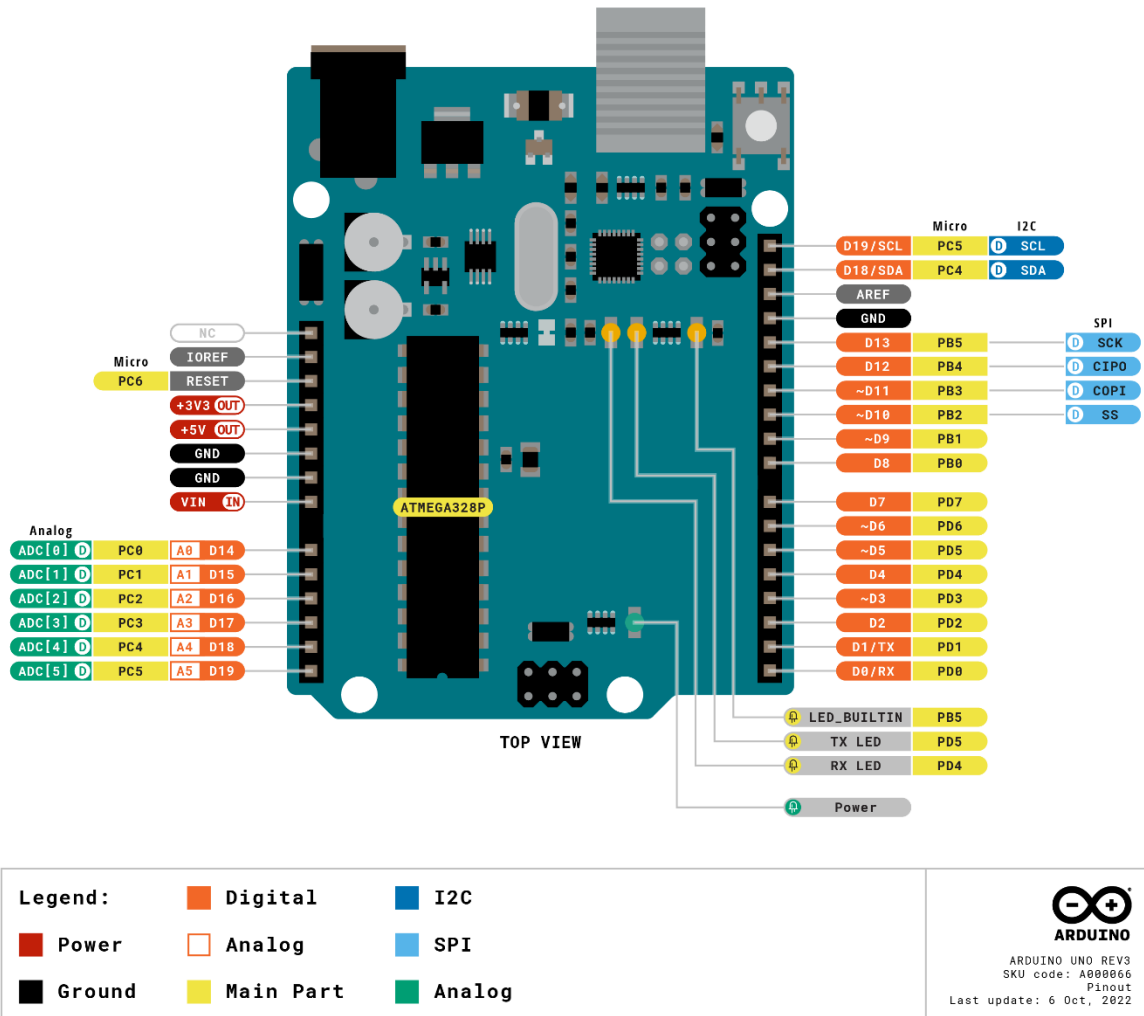


Рис. 70. Схема пінування мікропроцесорної плати *Arduino Uno Rev3* [79]

Позначення приєднань до мікропроцесорної плати *Arduino Uno Rev3* [79], згідно з схемою пінування (Рисунок 70) наводиться в табл. 19.

Табл. 19. Позначення приєднань до мікропроцесорної плати *Arduino Uno Rev3* [79], згідно з схемою пінування (рис. 70)

Пін	Функція	Тип	Опис
1	2	3	4
Аналогові приєднання			
1	NC	NC	Не під'єднано

1	2	3	4
2	IOREF	IOREF	Посилання на цифрову логіку V - 5В
3	Reset	Reset	Скидання
4	+3V3	Power	+3V3 Силовий ланюг
5	+5V	Power	+5V Силовий ланюг
6	GND	Power	Заземлення
7	GND	Power	Заземлення
8	VIN	Power	Вхід напруги
9	A0	Analog/GPIO	Аналоговий вхід 0 /GPIO
10	A1	Analog/GPIO	Аналоговий вхід 1 /GPIO
11	A2	Analog/GPIO	Аналоговий вхід 2 /GPIO
12	A3	Analog/GPIO	Аналоговий вхід 3 /GPIO
13	A4/SDA	Analog input/I2C	Аналоговий вхід 4/I2C Лінія даних
14	A5/SCL	Analog input/I2C	Аналоговий вхід 5/I2C Лінія таймера
Цифрове приєднання			
1	D0	Digital/GPIO	Цифровий пін 0/GPIO
2	D1	Digital/GPIO	Цифровий пін 1/GPIO
3	D2	Digital/GPIO	Цифровий пін 2/GPIO
4	D3	Digital/GPIO	Цифровий пін 3/GPIO
5	D4	Digital/GPIO	Цифровий пін 4/GPIO
6	D5	Digital/GPIO	Цифровий пін 5/GPIO
7	D6	Digital/GPIO	Цифровий пін 6/GPIO
8	D7	Digital/GPIO	Цифровий пін 7/GPIO
9	D8	Digital/GPIO	Цифровий пін 8/GPIO
10	D9	Digital/GPIO	Цифровий пін 9/GPIO
11	SS	Digital	SPI Вибір мікросхеми
12	MOSI	Digital	SPI Основний вихід вторинний вхід
13	MISO	Digital	SPI Головний вхід вторинний вихід
14	SCK	Digital	SPI послідовний вихід таймера
15	GND	Power	Заземлення
16	AREF	Digital	Аналогова опорна напруга
17	A4/SD4	Digital	Аналоговий вхід 4/I2C Лінія даних (дубльована)
18	A5/SD5	Digital	Аналоговий вхід 5/I2C Лінія таймера (дубльована)

З метою встановлення відповідності мікросхемної плати *Arduino Uno Rev3* [79] проектній схемі автоматизованого контролю технологічного процесу інкубації пташиних яєць, скориставшись профільними даними, наведеними в публікаціях [80 – 88], виконаємо відповідні перевірочні і повірочні розрахунки.

Масогабаритні показники мікропроцесорної плати визначаються за наступними параметрами [80 – 88]:

- сумарний об'єм встановлених на платі елементів – ф. (17):

$$V_{el} = \sum_{i=1}^n V_i ; \quad (17)$$

– сумарна маса встановлених на платі елементів – ф. (18):

$$m_{el} = \sum_{i=1}^n m_i ; \quad (18)$$

– сумарна площа встановлених на платі елементів – ф. (19):

$$S_{el} = q_s \sum_{i=1}^n S_i . \quad (19)$$

де q_s – коефіцієнт дезінтеграції по площі, що враховує недостатнє поле заповнення площі мікросхеми.

Arduino Uno Rev3 [79] налічує 53 елементи.

Відповідно до ф. (17):

$$V_{el} = 15 + 96 + 334 + 108,5 + 181,8 + 3 + \\ + 187,6 + 640 + 8,25 + 7,7 + 2,5 + 4192 + 7260 = 13036,5 \text{ мм}^3.$$

Відповідно до ф. (18):

$$m_{el} = 1,6 + 1,2 + 0,65 + 0,6 + 0,7 + 2,5 + \\ + 0,88 + 0,45 + 0,32 + 3,6 + 2,2 = 15,49 \text{ г.}$$

Відповідно до ф. (19):

$$S_{\text{эл}} = 2,5 \cdot (12,5 + 16 + 126 + 62 + 51,9 + \\ + 2,5 + 36,6 + 128 + 7,5 + 5,9 + 2,5 + 524 + 907,6) = 4708 \text{ мм}^2.$$

Для *Arduino Uno Rev3* [79] передбачена загальна кількість приєднань 78.

Сумарна споживана потужність визначається за ф. (20) [80 – 88]:

$$W_{\text{спож}} = \sum_{i=1}^n W_i. \quad (20)$$

Відповідно до ф. (20):

$$W_{\text{спож}} = 48 + 125 + 200 + 12,28 + \\ + 120 + 50 + 540 + 200 + 150 = 1445,28 \text{ мВт.}$$

Компонувальна схема мікропроцесорної плати *Arduino Uno Rev3* [79] визначається за топологічною схемою (рис. 68) з урахуванням монтажних параметрів – рис. 71.

На підставі компанувально-габартиної схеми (рис. 71) формуються відповідні рішення щодо улаштування друкованої плати, яка має задовольняти наступним умовам [80 – 88]:

- мінімальному діаметру перехідного отвору – ф. (21):

$$d_{\text{но}} \geq k_{\text{ом}} \times h_{\text{пл}}, \quad (21)$$

де $k_{\text{ом}}$ – відношення діаметра металізованого отвору до товщини плати;

$h_{\text{пл}}$ – товщина мікросхемної плати;

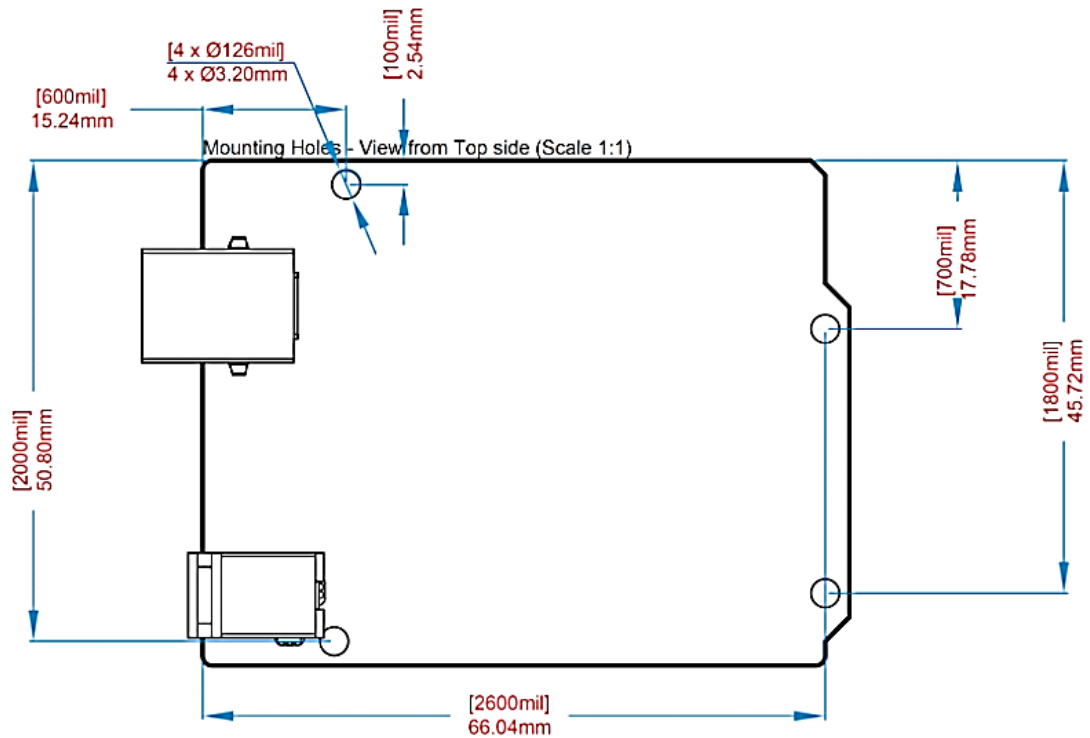


Рис. 71. Компонувальна схема мікропроцесорної плати *Arduino Uno*

- мінімальному діаметру монтажного отвору – ф. (22):

$$d_{mo} \geq d_e + \Delta + 2h_2 + \delta_o, \quad (22)$$

де d_e – діаметр виводу елемента проектної мікросхеми;

Δ – зазор між поверхнею виведення та поверхнею отвору;

h_2 – товщина міді, що гальванічно осаджується;

δ_o – похибка діаметра отвору;

- діаметру контактної майданчика – ф. (23):

$$D \geq d_{mo} + \Delta d_{es} + 2b + \Delta t_{es} + \sqrt{T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{ne}^2}, \quad (23)$$

де d_{mo} – діаметр монтажної металізованого отвору;

Δd_{68} – верхнє граничне відхилення діаметра металізованого отвору відповідно до класу точності плати;

b – гарантований поясок, відповідно до класу точності плати;

Δt_{68} – верхнє граничне відхилення ширини провідника, відповідно до класу точності плати;

T_d – позиційний допуск розташування осей металізованих отворів, відповідно до класу точності плати;

T_D – позиційний допуск, відповідно до класу точності плати;

$\Delta t_{нв}$ – нижнє граничне відхилення ширини провідника, відповідно до класу точності плати;

– мінімальній ширині провідника – ф. (24):

$$t = t_{\min D} + |\Delta t_{нв}|, \quad (24)$$

де $\Delta t_{нв}$ – нижнє граничне відхилення ширини провідника, відповідно до класу точності плати;

$t_{\min D}$ – мінімальна допустима ширина провідника, що розраховується за струмовим навантаженням – ф. (25):

$$t_{\min D} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{дон}} \times h}, \quad (25)$$

де I_{\max} – максимальний постійний струм, що протікає у провідниках;

$j_{\text{дон}}$ – допустима щільність струму, для мідної фольги;

h – товщина друкованого провідника;

– мінімальної відстані між елементами друкованої плати – ф. (26):

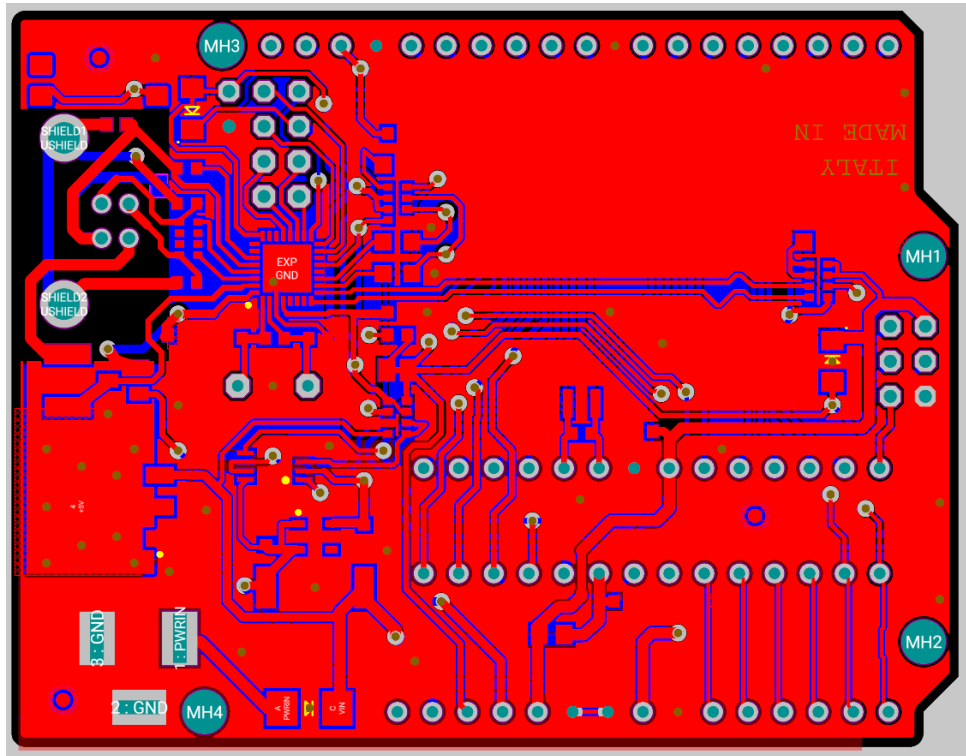


Рис. 73. Друкована плата *Arduino Uno Rev3* [79]

Наступним етапом повірногого розрахунку для вибраної мікропроцесорної плати *Arduino Uno Rev3* [79] є визначення якісних показників, відповідно до рекомендацій [80 – 88]:

- площа друкованої плати – ф. (27):

$$S_{nl} = l \times b = 68,6 \times 53,4 = 3663,24 \text{ мм}^2; \quad (27)$$

- маса друкованої плати – ф. (28):

$$m_{nl} = S_{nl} \times h_{nl} \times \rho_{\delta}, \quad (28)$$

де ρ_{δ} – густина діелектричного матеріалу мікропроцесорної плати;

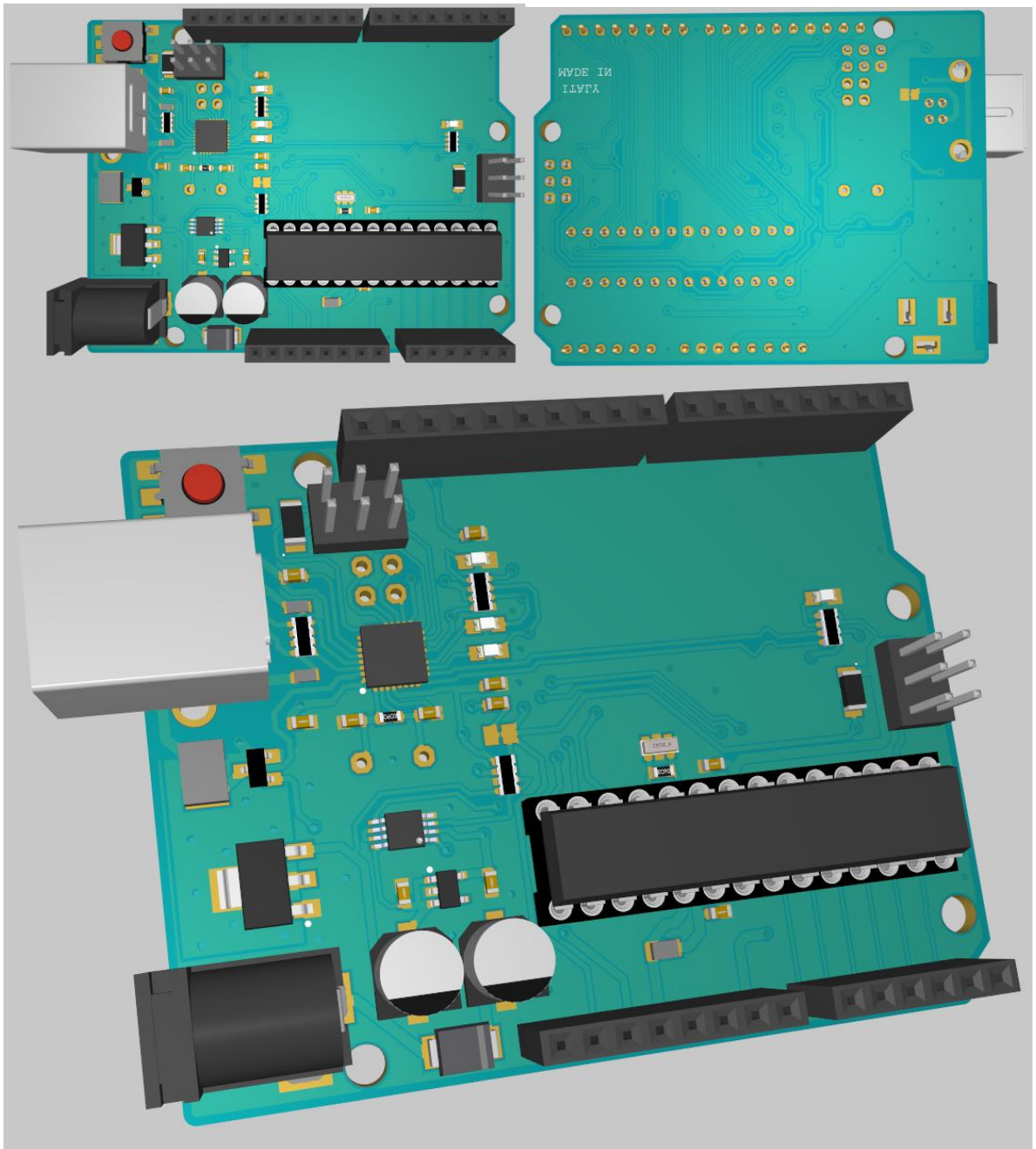


Рис. 74. Цифропрограмне моделювання плати *Arduino Uno Rev3* [79]

Відповідно до ф. (28):

$$m_{пл} = 0,0037 \times 0,0015 \times 1600 = 0,009 \text{ кг};$$

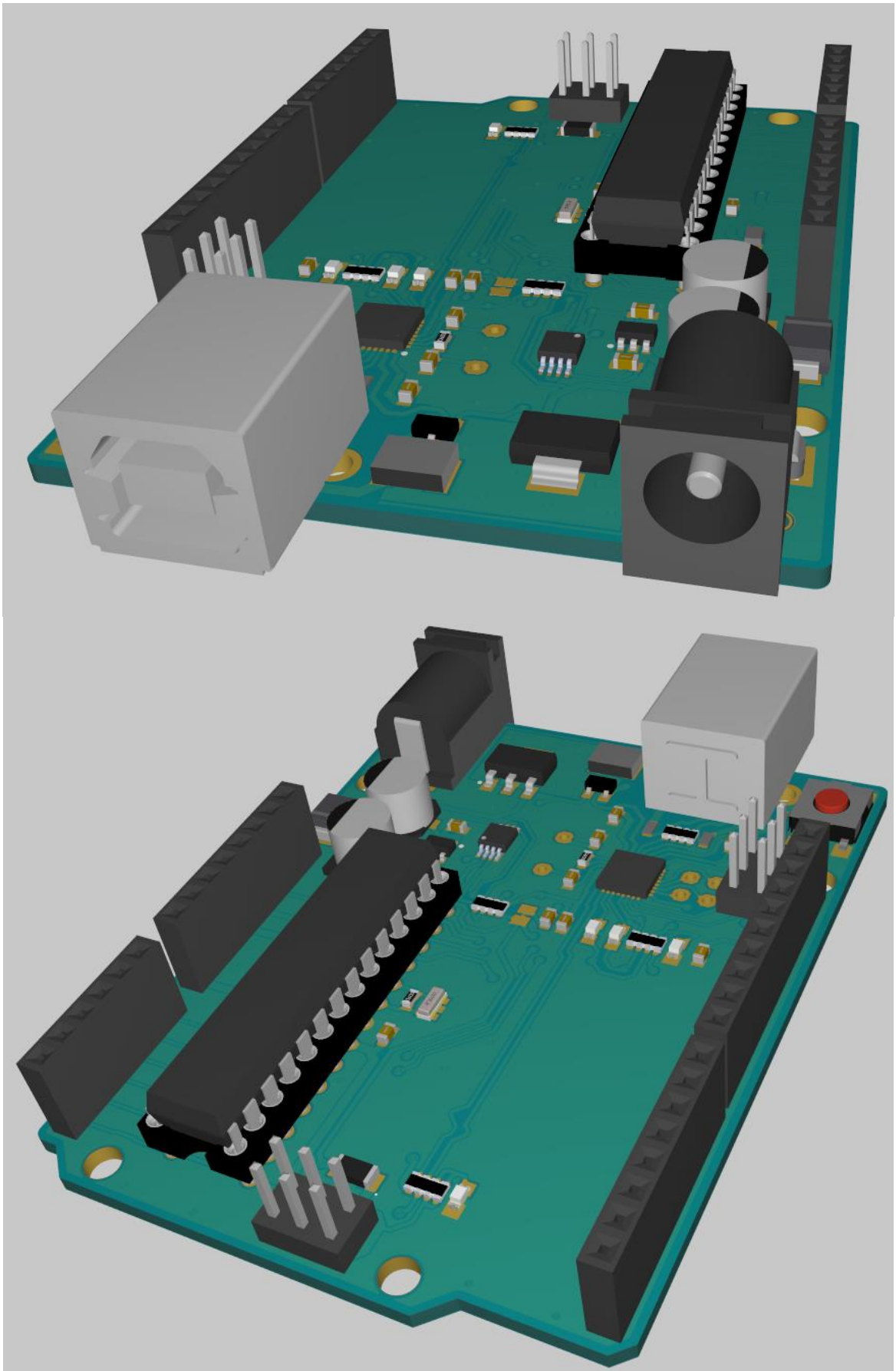


Рис. 75. Цифропрограмне моделювання плати *Arduino Uno Rev3* [79]

- загальна маса мікропроцесорного контролеру – ф. (29):

$$m_k = m_{nl} + m_e = 0,009 + 0,016 = 0,025 \text{ кг}. \quad (29)$$

Отримане значення співпадає з даними, декларованими виробником *Arduino Uno Rev3* [79]: вага плати – 25 г.

- приведена маса контролеру – ф. (30):

$$m_0 = \frac{m_k}{S_{nl}} = \frac{0,025}{0,0037} = 6,76 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}; \quad (30)$$

- циліндрична жорсткість пластини – ф. (31):

$$D = \frac{E \times h^3}{12 \times (1 - \varepsilon)^2} = \frac{16,9 \times 10^9 \times 1,5 \times 10^{-3}}{12 \times (1 - 0,22)^2} = 5 \text{ Н} \times \text{м}; \quad (31)$$

- коефіцієнт закріплення плати – ф. (32):

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \pi^2 \times \sqrt{\alpha \times \frac{L^2}{B^2} + \beta + \gamma \times \frac{B^2}{L^2}} = \\ &= \pi^2 \times \sqrt{1 \times \frac{0,007^2}{0,005^2} + 2 + 1 \times \frac{0,005^2}{0,007^2}} = 20,8; \end{aligned} \quad (32)$$

- власна частота коливань пластини – ф. (33):

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{\pi}{2 \times L^2} \times \left(1 + \frac{L^2}{B^2}\right) \times \sqrt{\frac{D}{m_k}} \times L \times B = \\ &= \frac{\pi}{2 \times 0,07^2} \times \left(1 + \frac{0,07^2}{0,05^2}\right) \times \sqrt{\frac{5}{0,025}} \times 0,07 \times 0,05 = \\ &= 79,3 \text{ Гц} \leq [80 \text{ Гц}]; \end{aligned} \quad (33)$$

- таким чином, для даної плати не виникне явище резонансу, однак при тривалих діях вібрацій може статися відмова через втому напруги плати або виводів елементів. Щоб плата мала достатню втомну довговічність (не менше 10 млн. циклів коливань) повинна виконуватися умова – ф. (34):

$$f_{0\min} \geq \sqrt[3]{\left(\frac{\gamma \times f_0 \times g \times n_e}{0,003 \times b}\right)^2} \geq \sqrt[3]{\left(\frac{2 \times 79,3 \times 9,81 \times 1,2}{0,003 \times 0,7}\right)^2} \geq 92,4 \text{ Гц}; \quad (34)$$

Умова виконується: конструкція плати – віброміцна.

- для випадку кінематичного збудження, коли джерело вібрації знаходиться поза платою, коефіцієнт динамічності визначається за формулюванням – ф. (35):

$$\mu = \frac{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \times \eta^2}}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \times \eta^2}} \rightarrow \eta = \frac{f_{\max}}{f_0} \rightarrow \quad (35)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{1 + 0,01^2 \times 0,11^2}}{\sqrt{(1 - 0,11^2)^2 + 0,01^2 \times 0,11^2}} = 1,03;$$

- амплітуда віброзміщення основи для максимальної частоти збудження резонансу – ф. (36):

$$\varepsilon_0 = \frac{\alpha_0}{4 \times \pi \times f_0^2} = \frac{22,2}{4 \times \pi \times 79,3^2} = 2 \times 10^{-6} \text{ м}; \quad (36)$$

- коефіцієнт передачі за прискоренням – ф. (37):

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{[1 + (k_1(x) \times k_1(y) - 1)]^2 + \varepsilon^2 \times \eta^2}}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \times \eta^2}} \quad (37)$$

$$\frac{\sqrt{[1 + (1,27 \times 1,21 - 1)]^2 + 0,01^2 \times 0,11^2}}{\sqrt{(1 - 0,11^2)^2 + 0,01^2 \times 0,11^2}} = 1,56;$$

– віброприскорення – ф. (38):

$$a_g = a_0(x, y) \times \gamma(x, y) = 22,2 \times 1,56 = 34,5 \frac{M}{c^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{a_g}{g} = \frac{34,5}{9,81} = 3,5g; \quad (38)$$

– вібропереміщення – ф. (39):

$$S_g = \varepsilon_0 \times \gamma(x, y) = 2 \times 10^{-6} \times 1,56 = 3,12 \times 10^{-6} \text{ м}; \quad (39)$$

– максимальний прогин – ф. (40):

$$\delta_g = |S_g - \varepsilon_0| = |3,12 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-6}| = 1,12 \times 10^{-6} \text{ м}; \quad (40)$$

– перевірка умови віброміцності – ф. (41):

$$0,003 \times b > \delta_g \Rightarrow 0,00021 \text{ м} > 0,00000112 \text{ м}; \quad (41)$$

Умова прогину виконується, оскільки максимальний прогин менше допустимого, отже конструкція плати – віброміцна.

Висновок: віброприскорення та максимальне відносне переміщення менше допустимих для плати *Arduino Uno Rev3* [79]. Отже, додаткових

конструкційних заходів щодо підвищення жорсткості *Arduino Uno Rev3* [79] не потрібно.

Керувати жорсткістю можна вибором способу закріплення мікропроцесорної плати, геометричними розмірами, співвідношенням сторін, застосуванням ребер жорсткості, рамок, тощо. Підвищення жорсткості мікропроцесорної плати веде до усунення частоти вільних коливань за верхню межу діапазону частот зовнішніх впливів і дозволяє виключити резонансні явища [80 – 88].

Параметри надійності мікропроцесорної плати визначаються у наступному порядку [80 – 88]:

- визначення коефіцієнтів електричного навантаження елементів мікропроцесорної плати (з урахуванням функціонально-конструкторського виконання) – ф. (42):

$$K_{HR} = \frac{E}{[E]} = \begin{cases} K_{HR}^p = \frac{P}{[P]}; \\ K_{HR}^c = \frac{U}{[U]}; \\ K_{HR}^m = \max\{K_H^U, K_H^I\}; \end{cases} \quad (42)$$

- експлуатаційна інтенсивність відмов – ф. (43):

$$\lambda_{iE} = K_{\Sigma i} \times \lambda_{i0}, \quad (43)$$

де $K_{\Sigma i}$ – добуток поправочних коефіцієнтів, що враховують коефіцієнт навантаження та температуру;

λ_{i0} – базова інтенсивність відмов.

- з урахуванням даних виробника *Arduino Uno Rev3* [79], інтенсивність відмов мікропроцесорної плати – ф. (44):

$$\lambda_{mn} = K_K \times \lambda_{zjE} = 16 \times 2 \times 1 \times 0,6413 \times 10^{-6} = 20,5 \times 10^{-6}; \quad (44)$$

- вірогідність безвідмовної роботи плати *Arduino Uno Rev3* [79] протягом 10 годин – ф. (45):

$$R_{\phi y}(10) = e^{-\lambda_{\phi y} \times t} = e^{-20,5 \times 10^{-6} \times 100} = 0,998; \quad (45)$$

- середній час напрацювання на відмову плати *Arduino Uno Rev3* [79] – ф. (46):

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{mn}} = \frac{1}{20,5 \times 10^{-6}} = 48781 \text{ год} \geq [40000 \text{ год}]. \quad (46)$$

Таким чином, мікропроцесорна плата *Arduino Uno Rev3* [79] задовольняє вимогам та параметрам конструктивної та технологічної надійності.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Економічна доцільність впровадження проектної системи автоматичного керування процесом інкубації пташиних яєць базується на зниженні ризику завмирання ембріона та, відповідно, псування яєць.

Проектна потужність інкубатора – ф. (47):

$$П = 90 \times \frac{365}{(21+1)} = 1493 \frac{\text{яєць}}{\text{рік}}. \quad (47)$$

Економічний ефект інтеграції проектної автоматизованої системи керування технологічним процесом інкубації пташиних яєць базується на порівнянні варіантів інкубатора без елементів автоматизації, для якого вірогідність настання ризику раннього та пізнього завмирання ембріону складає 43 % [50 – 56] (базовий варіант) та повністю автоматизованого інкубатору з ймовірністю успішного дозрівання та вилуплення зародку – 95 % [65 – 78] (проектний варіант).

Вартість проектної системи автоматизації, визначається відповідно до даних, декларованих виробниками [79] – табл. 20.

Табл. 20. Вартість елементів автоматизованої системи керування технологічним процесом інкубації пташиних яєць

Назва	Кількість, од.	Вартість, грн
NodeMCU ESP8266 Breakout Board	1	298,69
Arduino Uno Rev3	1	764,24
Servo MG995	1	104,25
DHT11 Temperature & Humidity Sensor	1	132,00
Засіб нейромережного моніторингу камера FLIR UAS	2	40 350,00
Вартість комутаційних та допоміжних матеріалів	–	712,25
Встановлення програмного забезпечення	–	536,25
Програмне забезпечення	–	Вільна ліцензія
Загальна вартість системи	–	42897,68

Порівняння базового і проектного варіанту системи автоматизованого інкубатору пташиних яєць – табл. 21.

Табл. 21. Порівняння базового і проектного варіанту системи автоматизованого інкубатору пташиних яєць

Порівнювальний параметр, од. вим.	Неавтоматизований інкубатор	Автоматизований інкубатор з засобами нейромережного моніторингу
Проектна потужність, яєць/рік	1493	
Ефективність інкубації, %	57	95
Збитки від невдалої інкубації (для курчат бройлерів за середньою вартістю фермерів на території України), грн/рік	$43\% \times 1493 \times 34 = 21827,66$	$5\% \times 1493 \times 34 = 2538,10$
Збитки від невдалої інкубації (для курячих яєць С0 за середньою вартістю реалізації в провідних торговельних мережах України), грн/рік	$43\% \times 1493 \times 7,39 = 4744,31$	$5\% \times 1493 \times 7,39 = 551,66$
Економічна продуктивність інкубації, грн/рік	$1493 \times 34 - 21827,66 - 4744,31 = 24190,03$	$1493 \times 34 - 2538,10 - 551,66 = 47672,24$
Витрати на енергопостачання та обслуговування інкубатора, грн/рік	7614,3	2538,10
Встановлення засобів автоматизації (Таблиця 20), грн	–	42897,68
Монтаж та налаштування системи автоматизованого керування, грн	–	2144,89
Загальні витрати на автоматизацію інкубатора, грн	–	$42897,68 + 2144,89 = 45042,57$
Річний економічний ефект, грн/рік	$24190,03 - 7614,3 = 16575,73$	$47672,24 - 2538,10 = 45134,14$
	–	$45134,14 - 16575,73 = 28558,41$
Строк окупності, років	–	$45042,57 / 28558,41 = 1,6 \leq [3]$

Таким чином, реалізація проектної системи автоматизованого керування технологічним процесом інкубації у порівнянні з інкубатором, неоснащеним засобами автоматизації має річний економічний ефект 28558,41 грн з відповідним строком окупності – 1,6 років.

ВИСНОВОК

Відповідно до поставлених мети та задач у поточному дослідженні щодо розробки рішень з автоматизації технологічного процесу інкубації пташиних яєць отримані наступні результати:

- встановлено, що дотримання температурно-вологісних параметрів інкубації значно впливає на процес дозрівання пташиного ембріону та, в подальшому, визначає показники здоров'я інкубованого покоління птиці;
- встановлені актуальні можливості реалізації системи автоматичного керування та моніторингу мікрокліматичних параметрів інкубатору, які пропонують застосовувати контролери та датчики в екосистемі *Arduino*;
- отримані логіко-структурні схеми автоматизованого керування процесом інкубації пташиних яєць, що застосовують сучасні засоби і технічні рішення, які дозволяють не лише організувати автоматизацію в заданих обмежуючих діапазонах виконавчих дій (Рисунок 19), а й дозволяти адміністратору, здійснювати опосередкований контроль за технологічним процесом, реагуючи лише на визначні події і фактори, які встановлює нейромережа;
- отримана математична модель проектного автоматизованого інкубатора, що базується на тепловому балансі технологічного процесу інкубації;
- встановлено, що для досліджуваного об'єкту автоматизації найбільш доцільним методом синтезу та закону керування є метод логічного нечіткого керування, що дозволяє контролеру приймати адекватні рішення, відповідно до індивідуальних потреб кожної партії інкубованих пташиних яєць;

- нейромережний засіб *YOLO* з термальною камерою *FLIR UAS* дозволяє удосконалити розроблену схему автоматизації процесу інкубації пташиних яєць в екосистемі *Arduino – CavyIoT* не лише за підтримки індивідуальних потокових значень параметрів мікроклімату, а й безпосереднім моніторингом стану пташиного зародку у яйці з розумною системою прийняття рішень щодо подальшого провадження інкубації. Модернізована схема автоматизації матиме кращі показники виводку пташенят, що відповідно покращить техніко-економічні показники проектної системи автоматичного контролю;
- порівняння теоретичних та експериментальних даних свідчить про те, що розроблена математична модель з високим ступенем достовірності описує тепловий режим автоматизованого інкубатора;
- застосування сучасних рішень автоматизованого контролю, сформованої з урахуванням адекватної математичної моделі та продуктами четвертої хвилі технологічного розвитку (системи нечіткої логіки та нейромержного моніторингу прийняття рішень) дозволяє значно покращити результативність інкубації пташиних яєць, зменшивши ймовірність завмирання пташиних ембріонів на різних етапах дозрівання, що призводить до високого рівні вилуплення, а відтак, має прямі економічні наслідки;
- внаслідок перевірного та повірного конструктивних розрахунків встановлено, що мікропроцесорна плата *Arduino Uno Rev3* [79] задовольняє вимогам та параметрам конструктивної та технологічної надійності;
- проект має економічні результати: річний економічний ефект 28558,41 грн з відповідним строком окупності – 1,6 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Тваринництво* (2022). Державна служба статистики України. ukrstat.gov.ua.
2. *Товарна структура зовнішньої торгівлі України* (2022). Державна служба статистики України. ukrstat.gov.ua.
3. Wu, D. [et al.] (2022). Information perception in modern poultry farming: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, 107131. doi.org/10.1016/j.compag.2022.107131.
4. Riswandha, D., Syuhada, A. (2022). Assess the Level of Temperature Uniformity in Intermediate Level Incubators Type Incandescent Lamp and Heater Plate. *In International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering*. Springer, Singapore, 287-298. doi.org/10.1007/978-981-19-3629-6_30.
5. Luo, B., Liang, J. (2022). Development of an egg incubator with PID closed-loop control. *In Energy Revolution and Chemical Research*. CRC Press, 206-215. cutt.ly/BNePLk4.
6. Mujčić, E., Drakulić, U. (2021). Design and implementation of fuzzy control system for egg incubator based on IoT technology. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 1208, 1, 012038. iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1208/1/012038/meta.
7. Trukhanska, O. (2021) Use of digitalization means in the formation of the microclimate of animal premises. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 4 (115), 136-140. cutt.ly/mNrtPoM.
8. Arct, A. [et al.] (2022). Effects of elevated nest box temperature on incubation behaviour and offspring fitness-related traits in the Collared Flycatcher *Ficedula albicollis*. *Journal of Ornithology*, 163(1), 263-272. doi.org/10.1007/s10336-021-01944-3.

9. Стратегія розвитку сфери інноваційної діяльності на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 10 липня 2019 р. № 526-р. zakon.rada.gov.ua/laws/show/526-2019-%D1%80#Text.

10. Peprah, F. [et al.] (2022). Design and construction of smart solar powered egg incubator based on GSM/IoT. *Scientific African*, 17, e01326. doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01326.

11. Komme, B. [et al.] (2022). A low-cost smart egg-incubator. *Sustainable Engineering and Innovation*, 4(1), 22-33. doi.org/10.37868/sei.v4i1.id152.

12. Ikpeseni, S. C. [et al.] (2022). Design and Fabrication of a Local Solar-Powered Poultry Egg Incubator for a Low-Income Country. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 1-12. doi.org/10.1007/s40031-021-00701-7.

13. Gaibnazarov, D. A., Mamanov, R., Mamatov, K. A. (2022). Level of incubation of eggs in different incubator cabinets. *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, 12(4), 252-255. doi.org/10.5958/2249-7137.2022.00268.3.

14. Vijayarangam, J., Sugumar, T. N. (2022). Performance Analysis of an Innovative Duct-Based Automatic Forced Air Chicken Egg Incubator Using Predictive Analytics. *ECS Transactions*, 107(1), 7239. iopscience.iop.org/article/10.1149/10701.7239ecst/meta.

15. Cruz, W. F. G. [et al.] (2022). Evaluation of a prototype of an artisanal incubator for quail eggs (*coturnix coturnix japonica*) implemented with Arduino technology. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 26(115), 117-125. doi.org/10.47460/uct.v26i115.624.

16. Hassan, S. A. [et al.] (2022). Thermochemical battery for poultry egg incubation. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 39(3), 475-492. cutt.ly/tNruu6e.

17. Lourençoni, D. [et al.] (2022). Fuzzy controller applied to temperature adjustment in incubation of free-range eggs. *Engenharia Agrícola*, 42. doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n4e20220050/2022.

18. Al-Zaidi, A. (2022). Optimum design calculation of eggs incubator: Case study. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 4(3), 1–10. doi.org/10.47577/technium.v4i3.6282.
19. Okur, N. [et al.] (2022). Effects of incubator oxygen and carbon dioxide concentrations on hatchability of fertile eggs, some blood parameters, and histopathological changes of broilers with different parental stock ages in high altitude. *Poultry science*, 101(2), 101609. doi.org/10.1016/j.psj.2021.101609.
20. Kumar, P. V., Obulesu, Y. P. (2021). Solar Incubator for Hatching of Eggs using Different Controllers: A Critical Review. *2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 1-8. doi.org/10.1109/i-PACT52855.2021.9696724.
21. Niranjana, L. [et al.] (2021). Design and implementation of chicken egg incubator for hatching using IoT. *International Journal of Computational Science and Engineering*, 24(4), 363-372. cutt.ly/tNruHTZ.
22. Zain, M. A. M., Yusop, Y. (2021). The Design of Poultry Egg Incubator Control and Monitoring System. *INOTEK 2021*, 1, 237-238. inotek.utem.edu.my/inotek/article/view/147.
23. Ahmadillo, S., Mamurjonogli, M. M., Ulugbekqizi, A. R. (2021). Care of Chickens in an Incubator. *European Journal of Life Safety and Stability* (2660-9630), 12, 421-423. cutt.ly/aNruNE1.
24. Hadoune, O., Benouaret, M., Guellati, M. F. (2021). Design and implementation of a fully automated system dedicated to the control of an egg incubator. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 368-374. doi.org/10.31590/ejosat.1000315.
25. Izadeen, G. Y., Kocher, I. S. H. (2022). Smart egg incubator based on microcontroller: a review. *Academic Journal of Nawroz University*, 11(4), 139-146. doi.org/10.25007/ajnu.v11n4a1401.
26. Zófoli, L. D. (2022). Chocadeira automatizada utilizando Arduino com monitoramento remoto. repositorio.ufsm.br/handle/1/26176.

27. Wardana, Y. A. W. (2022). *Detection of Temperature and Humidity in Iot-Based Egg Incubators* (Doctoral dissertation, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya). repository.untag-sby.ac.id/id/eprint/19222.
28. Dutta, P., Anjum, N. (2022). Optimization of Temperature and Relative Humidity in an Automatic Egg Incubator Using Mamdani Interference System. cutt.ly/mMqsl8z.
29. Rokhim, M. D. A. (2022). *Monitoring System for Temperature, Humidity, Motor Control Automatic Rotating Egg Incubator and Detection of Fertile or Infertile Eggs for Arab Chickens Using Blynk Android* (Doctoral dissertation, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya). repository.untag-sby.ac.id/id/eprint/15530.
30. Samokhin, P. [et al.] (2022). An Inexpensive Incubator for Mammalian Cell Culture Capable of Regulating O₂, CO₂, and Temperature. *Oxygen*, 2(1), 22-30. doi.org/10.3390/oxygen2010003.
31. Ткачов, В.В. [та інш.] (2022). *Мікропроцесорна техніка*. Дніпровська політехніка, Дніпро. cutt.ly/eMeKNnz.
32. Соколов, С. В., Соколов, О. С., Антоненко, С. С. (2020). Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах. Сумський державний університет, Суми. essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76309.
33. Baillieul, J., Samad, T. (2021). *Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, New York. cutt.ly/0MeL07d.
34. Gardner, R. F. (2021). *Introduction to Plant Automation and Controls*. CRC Press. doi.org/10.1201/9781003091134.
35. Lysenko, V. [et al.] (2022). Intelligent Algorithms for the Automation of Complex Biotechnical Objects. *In Advanced Control Systems*. River Publishers, 365-395. cutt.ly/Q1rQHvv.
36. Nakaguchi, V. M., Ahamed, T. (2022). Development of an Early Embryo Detection Methodology for Quail Eggs Using a Thermal Micro Camera and the YOLO Deep Learning Algorithm. *Sensors*, 22(15), 5820. doi.org/10.3390/s22155820.

37. Patel, H. [et al.] (2022). Role of Artificial Intelligence in Livestock and Poultry Farming. *Sinkron: jurnal dan penelitian teknik informatika*, 7(4), 2425-2429. doi.org/10.33395/sinkron.v7i4.11837.
38. Neethirajan, S. (2022). Automated tracking systems for the assessment of farmed poultry. *Animals*, 12(3), 232. doi.org/10.3390/ani12030232.
39. Alagun, T. Z., Afanou, D., Darayan, S. (2022). Automated Prototype Egg Conveyor and Separator. In *2006 GSW*. doi.org/10.18260/1-2-620-38818.
40. Park, M. [et al.] (2022). Artificial intelligence, sensors, robots, and transportation systems drive an innovative future for poultry broiler and breeder management. *Animal Frontiers*, 12(2), 40-48. doi.org/10.1093/af/vfac001.
41. Alagun, T. Z., Darayan, S. (2022). Fully Automated Prototype Chicken Farm. In *2005 GSW*. peer.asee.org/39774.
42. Bumanis, N. [et al.] (2022). Data Conceptual Model for Smart Poultry Farm Management System. *Procedia Computer Science*, 200, 517-526. doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.249.
43. Yaropud, V., Honcharuk, I. (2022). Development and justification of constructive-regime parameters of the automated system of microclimate provision in apc premises. *Publishing House "Baltija Publishing"*. cutt.ly/J1rYZ3d.
44. Rajakumar, G. [et al.] (2022). Design of an Efficient IoT System for Poultry Farm Management. In *Distributed Computing and Optimization Techniques*. Springer, Singapore, 325-335. doi.org/10.1007/978-981-19-2281-7_31.
45. Malika, N. Z. [et al.] (2022). Temperature & humidity monitoring for poultry farms using IOT. In *2022 IEEE 12th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, IEEE, 76-81. doi.org/10.1109/ISCAIE54458.2022.9794520.
46. White, V. (2022). Simplification and automation: the chicken and egg of contract design?. In *Research Handbook on Contract Design*. Edward Elgar Publishing, 383-400. doi.org/10.4337/9781839102288.00033.

47. So, J. H. [et al.] (2022). Current advances in detection of abnormal egg: a review. *Journal of Animal Science and Technology*, 64(5), 813-829. doi.org/10.5187/jast.2022.e56.
48. Nugroho, A. P. (2022). *Design and construction of chicken egg incubator based on fuzzy logic and IOT* (Doctoral dissertation, University of Technology). eprints.uty.ac.id/id/eprint/10562.
49. Bamidele, O. B., Igbadumhe, O. E., Stanley, A. A. (2022). Construction and testing of a locally made egg incubator. *International journal of applied & advanced engineering res*, 18 (5), 197 - 212. cutt.ly/11rA9q8.
50. Andoh, P. Y. [et al.] (2022). Performance assessment of a solar powered egg incubator with a backup heater. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 15(2), 113–121. cutt.ly/11rSIJc.
51. Liu, C. [et al.] (2022). Effect of elevated carbon dioxide on chicken eggs during the early and late incubation periods. *Animal*, 16(4), 100499. doi.org/10.1016/j.animal.2022.100499.
52. Andrieux, C. [et al.] (2022). Identification of different critical embryonic periods to modify egg incubation temperature in mule ducks. *Animal*, 16(1), 100416. doi.org/10.1016/j.animal.2021.100416.
53. Zhong, Z. (2022). Comparison of Computer-based Methods to Detect Fertilized Eggs. *2022 International Conference on Biotechnology, Life Science and Medical Engineering (BLSME 2022)*, 132 – 137. cutt.ly/41rGY54.
54. Shi, C. [et al.] (2022). Nondestructive Detection of Microcracks in Poultry Eggs Based on the Electrical Characteristics Model. *Agriculture*, 12(8), 1137. doi.org/10.3390/agriculture12081137.
55. Junaidi, A. [et al.] (2022). Image Classification for Egg Incubator Using Transfer Learning VGG16 and InceptionV3. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Biomedical Engineering, and Health Informatics*. Springer, Singapore, 85-95. doi.org/10.1007/978-981-19-1804-9_7.
56. Rodriguez, J., Marques, N. (2022). Influence of shape index, specific gravity, area-volume ratio and egg weight loss during incubation on the

hatchability of laying hen grandparents' brown eggs. repositorio.ufu.br/handle/123456789/34927.

57. Usturoi, M. G., [et al.] (2022). The influence of the incubation regime on the technical results of the incubation in gray guinea fowl eggs. *Animal & Food Sciences Journal Iasi*, 2022. cutt.ly/H1rJni7.

58. Çevik, K. K., Koçer, H. E., Boğa, M. (2022). Deep Learning Based Egg Fertility Detection. *Veterinary Sciences*, 9(10), 574. doi.org/10.3390/vetsci9100574.

59. Aditia, I., Ilham, R. (2022). Penetas telur otomatis berbasis arduino dengan menggunakan sensor DHT11. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kendali dan Listrik*, 3(1), 113-119. cutt.ly/Y1rL5qK.

60. Ningrum, A. A. (2022). Application of wireless sensor network for manufacturing automatic duck egg hatcher machine. *Jurnal Teknologi Informasi Universitas Lambung Mangkurat (JTIULM)*, 7(2), 157-166. doi.org/10.20527/jtiulm.v7i2.141.

61. Masrukin, S. M. [et al.] (2022). Rancang Bangun Inkubator Penetasan Otomatis Guna Penyetabilan Suhu Dan Keberhasilan Penetasan Maksimal Berbasis Arduino Uno Dan Sensor DHT 11. *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 11(1), 1-7. doi.org/10.26740/jte.v11n1.p1-7.

62. Haq, M. (2022). Rancang bangun incubator penetas telur berbasis mikrokontroler Arduino uno dilengkapi sensor DHT 22. *JURNAL ELEKTRO*, 10(1). cutt.ly/W1rXHqK.

63. Mindoro, J. N. [et al.] (2022). Automatic Visual Detection of Fresh Poultry Egg Quality Inspection using Image Processing. In *2022 IEEE 13th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, IEEE, 192-197. doi.org/10.1109/ICSGRC55096.2022.9845145.

64. Petkov, E. [et al.] (2022). Fault Tolerance Smart Incubator With IoT Control and Alerts. In *2022 International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, IEEE, 929-933. doi.org/10.1109/ISMSIT56059.2022.9932792.

65. Muttaqin, K., Ihsan, A., Irawan, H. (2022). Peningkatan produktivitas ternak ayam melalui teknologi inkubator mesin penetas telur berbasis internet of thing. *JMM (Jurnal Masyarakat Mandiri)*, 6(5). doi.org/10.31764/jmm.v6i5.10812.
66. Saifullah, S., Dreżewski, R. (2022). Non-Destructive Egg Fertility Detection in Incubation Using SVM Classifier Based on GLCM Parameters. *Procedia Computer Science*, 207, 3254-3263. doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.383.
67. Pires Junior, M. A. (2022). Monitoramento remoto da temperatura e umidade de uma chocadeira usando radiofrequência. repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/4415.
68. Espiritu Aranda, A. A., & Pastor Cananahuay, C. A. (2022). Tecnología arduino con Extreme Programing para la incubación artificial de huevos de pollos criollos con monitoreo web socket en la Cooperativa de Ahorro y Crédito Neuroventas, 2019. repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/5587.
69. Saifullah, S., Suryotomo, A. P. (2022). Identification of chicken egg fertility using SVM classifier based on first-order statistical feature extraction. *arXiv preprint arXiv:2201.04063*. doi.org/10.48550/arXiv.2201.04063.
70. Abd El-Hack, M. E. [et al.] (2022). Impact of environmental and incubation factors on hatchability of duck eggs. *Biological Rhythm Research*, 53(1), 79-88. doi.org/10.1080/09291016.2019.1628394.
71. Wang, Y. [et al.] (2022). The metaheuristic optimization of the mechanical properties of sustainable energies using artificial neural networks and genetic algorithm: A case study by eggshell fine waste. *International Journal of Energy Research*. doi.org/10.1002/er.8255.
72. Geng, L. [et al.] (2022). Photoplethysmographic waveform detection for determining hatching egg activity via deep neural network. *Signal, Image and Video Processing*, 16(4), 955-963. doi.org/10.1007/s11760-021-02040-y.

73. Sedghi, M., Ghaderi, M. (2022). Digital analysis of egg surface area and volume: Effects of longitudinal axis, maximum breadth and weight. *Information Processing in Agriculture*. doi.org/10.1016/j.inpa.2022.01.003.
74. Sehirli, E., Arslan, K. (2022). An Application for the Classification of Egg Quality and Haugh Unit Based on Characteristic Egg Features Using Machine Learning Models. *Expert Systems with Applications*, 117692. doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117692.
75. Nakaguchi, V. M., Ahamed, T. (2022). Fast and Non-Destructive Quail Egg Freshness Assessment Using a Thermal Camera and Deep Learning-Based Air Cell Detection Algorithms for the Revalidation of the Expiration Date of Eggs. *Sensors*, 22(20), 7703. doi.org/10.3390/s22207703.
76. te Pas, M. F. [et al.] (2022). Transcriptomic and epigenomic network analysis reveals chicken physiological reactions against heat stress. In *Transcriptome Profiling*, Academic Press, 333-359. doi.org/10.1016/B978-0-323-91810-7.00002-9.
77. Faihs, L. [et al.] (2022). A Novel Artificial Intelligence-Based Approach for Quantitative Assessment of Angiogenesis in the Ex Ovo CAM Model. *Cancers*, 14(17), 4273. doi.org/10.3390/cancers14174273.
78. Kim, T. H. [et al.] (2022). Egg Freshness Prediction Model Using Real-Time Cold Chain Storage Condition Based on Transfer Learning. *Foods*, 11(19), 3082. doi.org/10.3390/foods11193082.
79. *Arduino Uno Rev3* (2022). store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3.
80. Belous, A., Saladukha, V. (2022). *The Art and Science of Microelectronic Circuit Design*. New York: Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-89854-0.
81. Bernstein, H. (2022). *Measuring Electronics and Sensors: Basics of Measurement Technology, Sensors, Analog and Digital Signal Processing*. New York: Springer. doi.org/10.1007/978-3-658-35067-3.

82. Donzellini, G., Garavagno, A. M., Oneto, L. (2022). *Introduction to Microprocessor-Based Systems Design*. New York: Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-87344-8.
83. Gift, S. J. G., Maundy, B. (2022). *Electronic Circuit Design and Application*. New York: Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-79375-3.
84. Kuntman, H., Özenli, D. (2022). *Trends in Circuit Design for Analog Signal Processing*. New York: Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-96836-6.
85. Lakshmaiah, D., Ramarao, C. B., Kishan Rao, K. (2022). *Analog and Pulse Circuits*. Boca Raton: CRC Press. doi.org/10.1201/9781003274582.
86. Selvam, K. C. (2022). *Analog Function Circuits: Fundamentals, Principles, Design and Applications*. Boca Raton: CRC Press. doi.org/10.1201/9781003221449.
87. Singh, R., Gehlot, A. (2022). *Intelligent Circuits and Systems*. Boca Raton: CRC Press. doi.org/10.1201/9781003129103.
88. Taraate, V. (2022). *Digital Design Techniques and Exercises: A Practice Book for Digital Logic Design*. New York: Springer. doi.org/10.1007/978-981-16-5955-3.