

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра морського приладобудування

ДОПУЩЕНИЙ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри

Гайдай Г.Ю.

«17» 06 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему: **«Мікропроцесорна система автоматизованого управління
мікрокліматом теплиці»**

Виконав: студент групи 4651

(підпис)

Нікіфорчук В.С.

Керівник роботи:

викладач кафедри морського
приладобудування, PhD

(підпис)

Козлов М.О.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Інститут
Кафедра
Спеціальність

ННІАЕ
морського приладобудування
123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма

Комп'ютерні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

Гайдай Г.Ю.

« 17 » 06 2026 рік

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Студенту Нікіфорчуку Владиславу Сергійовичу
(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Мікропроцесорна система автоматизованого управління мікрокліматом теплиці»

Керівник роботи Козлов Максим Олегович, доктор філософії (PhD)
(Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № 286 ут від « 22 » 04 2026 року

2. Термін подання роботи: 15.06.26

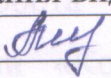
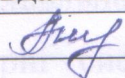
3. Вихідні дані по роботі: 8 розрядний контролер Arduino Nano

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

1. Аналіз предметної галузі та вибір апаратної бази;
2. Апаратна реалізація комплексу керування мікрокліматом теплиці;
3. Розробка алгоритмів та програмного забезпечення;
4. Охорона праці;

5. Перелік презентаційних матеріалів: Презентація по проектувальній збірці

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
06.01	Тудальов А.М.		

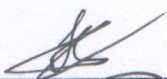
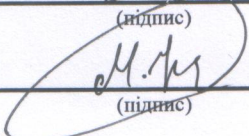
7. Дата видачі завдання « 9 » 02 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз предметної галузі та вибір апаратної бази	9.02 - 22.02	вик
2.	Апаратна реалізація комплексу керування мікрокліматом теплиці	22.02 - 11.03	вик
3.	Розробка алгоритмів та програмного забезпечення	11.03 - 29.04	вик
4.	Охорона праці	29.04 - 17.05	вик

Студент

Керівник роботи


(підпис)

(підпис)

Нікіфорчук В.С.

(прізвище та ініціали)

Козлов М.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Нікіфорчук В.С. «Мікропроцесорна система автоматизованого управління мікрокліматом теплиці». Кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія», освітньої програми «Комп'ютерні системи та мережі». Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова. 2026 рік. 80 сторінок.

У кваліфікаційній роботі розроблено автономний апаратно-програмний комплекс для автоматизації мікроклімату теплиці на базі мікроконтролера ATmega328P. Проведено системний аналіз наявних рішень мікроклімат-контролю, обґрунтовано вибір елементної бази та сенсорної підсистеми. Розроблено структурну та принципову електричну схеми пристрою і друковану плату, реалізовано алгоритми ПІД-регулювання та логіку керування виконавчими механізмами. Створено інтерфейс користувача для візуалізації телеметрії та налаштування параметрів системи в режимі реального часу. Отримані результати забезпечують ефективне підтримання заданих параметрів середовища (температури, вологості, освітлення), підвищуючи рівень автономності та продуктивності теплиці.

Ключові слова: Автоматизація мікроклімату; мікроконтролер ATmega328P; сенсорна підсистема; ПІД-регулятор; інтерфейс користувача; друкована плата; теплиця.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

Nikiforchuk V.S. «Microprocessor System for Automated Control of a Greenhouse Microclimate». Qualification work in specialty 123 «Computer Engineering», educational program «Computer Systems and Networks». – Mykolaiv: Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 2026, 80 pages.

In this qualification work, an autonomous hardware-software complex for greenhouse microclimate automation based on the ATmega328P microcontroller has been developed. A systemic analysis of existing microclimate control solutions was conducted, and the selection of the hardware components and sensor subsystem was justified. The structural and schematic diagrams of the device, as well as the printed circuit board, were developed; PID control algorithms and actuator control logic were implemented. A user interface was created for telemetry visualization and real-time configuration of system parameters. The obtained results ensure the effective maintenance of specified environmental parameters (temperature, humidity, lighting), thereby increasing the autonomy and productivity of the greenhouse.

Keywords: Microclimate automation; ATmega328P microcontroller; sensor subsystem; PID controller; user interface; printed circuit board (PCB); greenhouse.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ ТА ВИБІР АПАРАТНОЇ БАЗИ ..	13
1.1 Передумови та значення мікроклімату теплиці	14
1.2 Аналіз вимог до систем автоматизації тепличних господарств	15
1.3 Огляд існуючих рішень та систем мікроклімат-контролю	17
1.4 Обґрунтування вибору мікроконтролерної платформи ATmega328P	19
1.5 Вибір та обґрунтування сенсорної бази	22
1.5.1 Датчик температури та вологості BME280	22
1.5.2 Цифровий датчик температури DS18B20	24
1.5.3 Аналогові датчики вологості ґрунту	25
1.5.4 Модуль реального часу DS3231	26
Висновки за розділом 1	27
РОЗДІЛ 2. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСУ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЦІ	28
2.1 Структурна схема апаратно-програмного комплексу керування мікрокліматом теплиці	29
2.2 Проектування підсистеми збору даних	31
2.3 Проектування підсистеми керування виконавчими механізмами	32
2.3.1 Релейні модулі та розрахунок струму навантаження	32
2.3.2 Сервоприводи та канал лінійного привода	33
2.4 Захист мікроконтролера від електромагнітних завад при комутації індуктивних навантажень	34
2.5 Розробка електричної принципової схеми	35
2.6 Проектування друкованої плати	36
Висновки за розділом 2	38
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	40
3.1 Загальний алгоритм роботи мікропроцесорної системи	41

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

3.2 Ініціалізація апаратного забезпечення.....	42
3.3 Алгоритм навігації меню та обробки команд	43
3.4 Обробка сигналів енкодера.....	44
3.5 Інтерфейс користувача	45
3.5.1 Екран відладки	46
3.5.2 Екран сервісу	47
3.5.3 Екран налаштування каналу	47
3.5.4 Екран налаштування режиму	48
3.5.4 Екран графіків	48
3.6 Алгоритм планування завдань та автоматики	49
3.7 Реалізація ПД-регулятора	51
3.8 Алгоритм зчитування датчиків	53
3.9 Оптимізація використання флеш-пам'яті	54
Висновки за розділом 3	56
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	58
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці розробника	59
4.2 Вимоги безпеки та гігієни праці під час роботи з паяльним обладнанням ..	61
4.3 Електробезпека при роботі з мережею 220 В	63
4.4 Електробезпека під час роботи з низьковольтними колами	65
4.5 Пожежна безпека	66
Висновки за розділом 4	67
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71
ДОДАТОК А. Принципова електрична схема контролера мікроклімату теплиці	74
ДОДАТОК Б. Друкована плата контролера мікроклімату теплиці	75
ДОДАТОК В. Блок-схеми алгоритмів роботи програми	77
ДОДАТОК Г. Лістинг ключових модулів коду прошивки	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

БЖ – блок живлення;

ВМ – виконавчий механізм;

ДП – друкована плата;

ЕМЗ – електромагнітні завади;

ЕМС – електромагнітна сумісність;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференційний (регулятор); PID – англomовна абревіатура;

САК – система автоматичного керування;

САПР – система автоматизованого проектування;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

AVR – Alf and Vegard's RISC processor (сімейство мікроконтролерів Microchip/Atmel);

BME280 – цифровий датчик температури, атмосферного тиску та вологості повітря (Bosch Sensortec);

DHT22 – цифровий датчик температури та відносної вологості повітря;

DRC – Design Rules Check (перевірка дотримання правил проектування);

DS18B20 – цифровий датчик температури з інтерфейсом 1-Wire (Maxim Integrated);

DS3231 – модуль реального часу з температурною компенсацією генератора;

EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (електрично стираний програмований ПЗП);

ERC – Electrical Rules Check (перевірка електричних правил схеми);

Gerber – стандартний формат файлів для виготовлення друкованих плат;

HASL – Hot Air Solder Leveling (гаряче лудіння як фінішне покриття плати);

I²C – Inter-Integrated Circuit (двопровідний послідовний інтерфейс);

IDE – Integrated Development Environment (інтегроване середовище розробки);

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

LCD – Liquid Crystal Display (рідкокристалічний дисплей);

MCU – Microcontroller Unit (мікроконтролер);

MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (польовий транзистор);

NTC – Negative Temperature Coefficient (термістор з від'ємним температурним коефіцієнтом);

PCB – Printed Circuit Board (друкована плата);

PWM – Pulse-Width Modulation (широтно-імпульсна модуляція);

RISC – Reduced Instruction Set Computer (комп'ютер зі скороченим набором команд);

RTC – Real Time Clock (модуль реального часу);

SMD – Surface-Mount Device (компонент поверхневого монтажу);

SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (симулятор електронних схем);

SRAM – Static Random Access Memory (статична оперативна пам'ять);

SSR – Solid State Relay (твердотільне реле);

TCXO – Temperature-Compensated Crystal Oscillator (термокомпенсований кварцовий генератор);

1-Wire – однопровідний послідовний інтерфейс передачі даних.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Тепличне рослинництво є однією з найбільш інтенсивних та наукоємних галузей сучасного аграрного виробництва. Вирощування культур у захищеному ґрунті дозволяє нівелювати вплив сезонних кліматичних коливань, що є критично важливим для забезпечення продовольчої безпеки України. Проте закрите агросередовище позбавлене природних механізмів саморегуляції. З огляду на це, температура повітря і ґрунту, відносна вологість, інтенсивність освітлення та газовий склад потребують безперервного апаратного контролю та цілеспрямованого коригування [1].

Параметри мікроклімату безпосередньо визначають інтенсивність фотосинтезу, транспірації, кореневого живлення та загальний розвиток рослин. Навіть короточасні відхилення від агробіологічного оптимуму спричиняють фізіологічний стрес, уповільнення росту, зниження врожайності та підвищують ризик захворювань. Отже, прецизійне підтримання мікроклімату у вузькому діапазоні допустимих значень є не лише технічною задачею, а й ключовим фактором економічної рентабельності господарства.

Традиційне ручне керування процесами обігріву, поливу, освітлення та провітрювання є трудомістким, інерційним і не забезпечує належної точності. Регулювання за участю оператора часто відбувається із запізненням, що призводить до значного перерегулювання, погіршення умов вегетації та нерациональних витрат енергоносіїв. Об'єктивною потребою розвитку галузі є перехід до автоматизованих систем керування, які мінімізують вплив людського фактора та гарантують стабільне підтримання заданих режимів у реальному часі [2].

Сучасний ринок пропонує широкий спектр систем автоматизації теплиць – від масштабних промислових комплексів класу SCADA до компактних спеціалізованих контролерів. Проте промислові рішення провідних виробників (Priva, Ridder, Argus Controls) орієнтовані на великі тепличні комбінати, мають високу вартість володіння і потребують кваліфікованого обслуговування, що робить їх економічно недоцільними для приватних та малих фермерських

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

господарств. Спеціалізовані ж побутові контролери, навпаки, реалізують лише окремі функції і не дозволяють побудувати цілісну систему керування. Цю нішу ефективно заповнюють рішення на базі відкритих мікроконтролерних платформ, що поєднують широку функціональність із доступною вартістю компонентів [3].

Актуальність теми зумовлена зростанням потреби у доступних, надійних та енергоефективних засобах автоматизації захищеного ґрунту в умовах подорожчання енергоресурсів і дефіциту кваліфікованої робочої сили. Розроблення мікропроцесорної системи на базі загальнодоступного мікроконтролера ATmega328P та відкритого програмного забезпечення дозволяє отримати функціонально повноцінний автоматизований комплекс за вартістю, прийнятною для малого та середнього господарства, що визначає практичну значущість роботи.

Мета роботи – розроблення та проєктування апаратно-програмного комплексу на базі мікроконтролера ATmega328P для автономного автоматизованого управління параметрами мікроклімату теплиці.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено такі завдання:

1. проаналізувати агробіологічні вимоги до систем автоматизації тепличних господарств та виконати порівняльний огляд наявних рішень мікроклімат-контролю;
2. обґрунтувати вибір мікроконтролерної платформи та елементної бази сенсорної підсистеми за визначеними технічними критеріями;
3. розробити структурну та принципову електричну схеми апаратно-програмного комплексу;
4. спроектувати топологію двошарової друкованої плати у середовищі САПР із подальшою верифікацією за правилами проєктування;
5. спроектувати підсистему збору даних на основі цифрових інтерфейсів та аналогових ліній зв'язку;
6. розробити підсистему керування виконавчими механізмами із забезпеченням вимог електромагнітної сумісності;

7. реалізувати алгоритми планування завдань у реальному часі та ПІД регулювання;
8. розробити апаратно-програмний інтерфейс користувача для візуалізації телеметрії та налаштування параметрів системи;
9. провести комплексне тестування розробленої системи та оптимізувати використання обчислювальних ресурсів мікроконтролера;
10. проаналізувати вимоги охорони праці та техніки безпеки під час розроблення й експлуатації комплексу.

Об'єктом дослідження є процеси автоматичного контролю та регулювання параметрів навколишнього середовища (температури повітря і ґрунту, відносної вологості, освітлення, провітрювання) у замкнених тепличних умовах.

Предметом дослідження є апаратна архітектура та програмні алгоритми керування мікропроцесорної системи автоматизованого управління мікрокліматом теплиці на базі мікроконтролера ATmega328P.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні функціонально повноцінного, надійного та економічно доступного апаратно-програмного комплексу, придатного до безпосереднього застосування у приватних і малих фермерських тепличних господарствах.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Нікіфорчук В.С.			АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ ТА ВИБІР АПАРАТНОЇ БАЗИ		
Керівник		Козлов М.О.					
Консульт.							
Н. контроль		Грешнов А.Ю.					
Зав. каф.							
					Літ.	Арк.	Аркушів
					НУК ім. ам. Макарова		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ ТА ВИБІР АПАРАТНОЇ БАЗИ

1.1 Передумови та значення мікроклімату теплиці

Мікроклімат теплиці є сукупністю фізичних параметрів повітряного та ґрунтового середовища, що формуються у замкненому культиваційному просторі та безпосередньо визначають перебіг фізіологічних процесів рослин. До основних параметрів, які підлягають контролю та регулюванню, належать температура повітря, температура кореневого шару ґрунту, відносна вологість повітря, вологість ґрунту, інтенсивність та тривалість освітлення, а також концентрація вуглекислого газу. Кожен із цих чинників має власний агробіологічний оптимум, що залежить від виду культури, фази її розвитку та пори доби [1].

Температура повітря визначає швидкість усіх процесів у рослинному організмі. Для більшості овочевих культур денний оптимум перебуває в межах 22–26 °С, тоді як нічна температура має бути на 4–6 °С нижчою для забезпечення нормального балансу між фотосинтезом і диханням. Відхилення температури за межі 12–35 °С спричиняє пригнічення вегетації, а тривалий вплив екстремальних значень призводить до незворотних ушкоджень тканин. Інерційність теплового режиму теплиці є водночас перевагою та недоліком: значна теплоємність ґрунту й конструкцій згладжує короточасні коливання, проте ускладнює оперативне регулювання, що зумовлює доцільність застосування алгоритмів з прогнозувальною та інтегральною складовими.

Відносна вологість повітря впливає на інтенсивність випаровування води листям. Надмірно низька вологість (нижче 40 %) спричиняє надлишкову втрату вологи та в'янення, тоді як надмірно висока (вище 85 %) створює сприятливі умови для розвитку грибкових патогенів і ускладнює запилення. Оптимальний діапазон для більшості культур становить 60–80 %. Вологість ґрунту, у свою чергу, визначає доступність вологи та розчинених поживних речовин кореневій

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

системі, її підтримання реалізується системою автоматичного поливу за показаннями ґрунтових датчиків.

Світловий режим є визначальним для фотосинтезу. У зимовий період природного освітлення недостатньо, тому застосовується штучне досвічування з регульованим фотоперіодом. Сучасні системи реалізують режим імітації світанку та заходу сонця з плавною зміною інтенсивності, що наближає умови до природних і зменшує світловий стрес рослин. Концентрація вуглекислого газу, що є субстратом фотосинтезу, у щільно засаджених теплицях може знижуватися нижче атмосферної норми, що обмежує продуктивність, її контроль реалізується провітрюванням або штучним підживленням CO₂.

Із наведеного випливає, що теплиця як об'єкт керування є багатовимірною системою зі складними перехресними зв'язками між параметрами: провітрювання одночасно змінює температуру, вологість і газовий склад, а обігрів впливає на відносну вологість. Це обумовлює потребу в системі автоматичного керування, здатній незалежно обслуговувати декілька контурів регулювання, що й покладено в основу архітектури розроблюваного комплексу.

1.2 Аналіз вимог до систем автоматизації тепличних господарств

За характером автоматизованих процесів тепличні системи керування доцільно розділити на чотири функціональні підсистеми: полив, освітлення, провітрювання та обігрів. Кожна підсистема висуває власні вимоги до алгоритмів керування, типу виконавчих механізмів та сенсорного забезпечення, проте всі вони мають інтегруватися в єдину систему з узгодженим розкладом роботи.

Система поливу підтримує необхідний рівень вологості ґрунту. Найбільш поширеними підходами є: періодичний полив за таймером, полив за показниками датчиків вологості ґрунту та комбінований режим з прив'язкою до днів тижня. Датчик вологості ґрунту (рис. 1.1) підключається до аналогового входу АЦП і повертає значення 0–1023 (10-біт АЦП). Така роздільна здатність є

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

достатньою для якісного контролю вологості ґрунту, оскільки фізична точність самих ґрунтових датчиків значно нижча за роздільну здатність АЦП.

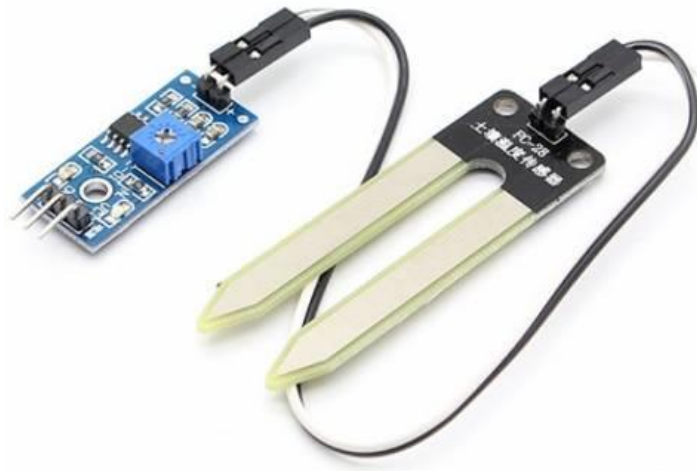


Рисунок 1.1 – Датчик вологості ґрунту (гігрометр)

Підсистема освітлення формує необхідний фотоперіод освітлення, найпростіша реалізація якого передбачає вмикання та вимикання штучного освітлення (рис. 1.2) за розкладом із прив'язкою до реального часу. Більш досконалі системи реалізують режим плавного світанку, за якого інтенсивність освітлення лінійно наростає протягом заданого інтервалу, а наприкінці світлового дня – плавно згасає. Технічно це досягається широтно-імпульсним керуванням потужністю світлодіодних світильників.



Рисунок 1.2 – Штучне освітлення для теплиць

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Система провітрювання відводить надлишкове тепло та CO₂. Вона може реалізовуватись через вентилятори (реле), фрамуги з лінійними приводами або поворотні заслінки з сервоприводами. Запускається при перевищенні порогів температури або вологості.

Підсистема обігріву підтримує мінімально допустиму температуру в холодний період. Найпростіше двопозиційне (релейне) регулювання спричиняє значні коливання температури навколо уставки та часті перемикання нагрівача. Натомість ПД регулювання забезпечує плавну зміну потужності нагрівача за широтно-імпульсним законом, утримуючи температуру в межах часток градуса, що особливо важливо для розсадних та теплолюбних культур.

Узагальнюючи, до системи автоматизації мікроклімату теплиці висуваються такі ключові вимоги: автономність функціонування без постійного нагляду оператора; енергонезалежне збереження конфігурації для автоматичного відновлення роботи після перебоїв живлення; наявність декількох незалежних каналів керування з індивідуальними налаштуваннями; підтримка прив'язки до реального часу для роботи за розкладом; захист від збоїв, спричинених комутацією потужних індуктивних навантажень; зручний інтерфейс налаштування; надійна робота в умовах підвищеної вологості [1, 2].

1.3 Огляд існуючих рішень та систем мікроклімат-контролю

Наявні на ринку рішення автоматизації теплиць доцільно класифікувати на три групи за рівнем складності, функціональністю та вартістю: промислові системи диспетчерського керування, спеціалізовані побутові контролери та рішення на базі відкритих мікроконтролерних платформ.

Промислові системи (Priva Compass [4], Ridder, Argus Controls) реалізують повний цикл автоматизації великих тепличних комбінатів із централізованим диспетчерським керуванням, інтеграцією з метеостанціями, кліматичними комп'ютерами та системами підживлення (рис. 1.4). Вони забезпечують найвищу якість регулювання та широкі можливості аналітики, проте їхня вартість починається від кількох тисяч доларів США, а впровадження потребує

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

проектування й кваліфікованого технічного супроводу [2]. Для приватних та малих фермерських господарств такі рішення є економічно недоцільними.



Рисунок 1.3 – Промислова система мікроклімат-контролю теплиці Priva Compass

Спеціалізовані побутові контролери (терморегулятори, контролери поливу (Рис. 1.4), реле часу) є недорогими та простими у використанні, проте реалізують лише окремі ізольовані функції. Побудова цілісної системи керування мікрокліматом на їх основі вимагає об'єднання кількох незалежних пристроїв, що ускладнює монтаж, унеможливорює узгоджене планування роботи підсистем і не забезпечує єдиного інтерфейсу налаштування.



Рисунок 1.4 – Контролер поливу Hunter X-CORE-401i-E

Рішення на базі відкритих мікроконтролерних платформ, таких як Arduino, ESP та Raspberry Pi, набули значного поширення завдяки високій доступності

апаратних компонентів, відкритій архітектурі програмного забезпечення та гнучкості конфігурування. Порівняльний аналіз наявних систем мікроклімат-контролю за критеріями функціональності, вартості, масштабованості та можливості прецизійного регулювання наведено в таблиці 1.1. На підставі результатів цього аналізу для подальшого розроблення обрано створення спеціалізованого апаратно-програмного комплексу на базі платформи Arduino. Такий підхід забезпечує оптимальне співвідношення функціональних можливостей та вартості реалізації, що найкраще відповідає сформульованим технічним вимогам до системи.

Проектований комплекс реалізується як універсальний багатоканальний контролер-таймер, що забезпечує незалежне керування виконавчими механізмами. Апаратна частина підтримує роботу з релейними, сервоприводними та приводними навантаженнями. Програмне забезпечення системи інтегрує кілька гнучких режимів роботи каналів, алгоритми пропорційно-інтегрально-диференційного регулювання, підсистему планування завдань із жорсткою прив'язкою до реального часу, а також розвинений інтерфейс користувача для локального моніторингу та налаштування параметрів.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика рішень для автоматизації теплиць

Рішення	Функціональність	Орієнтовна вартість	Відкритий код	ПД-регулятор
Priva Compass	Повна, промислова	понад 2000 \$	Ні	Так
Спеціалізований терморегулятор	Обмежена, одна функція	50–200 \$	Ні	Частково
Arduino DIY	Базова, потребує розробки	20–100 \$	Так	Так

1.4 Обґрунтування вибору мікроконтролерної платформи ATmega328P

Вибір обчислювального ядра є визначальним рішенням при проектуванні будь-якої вбудованої системи, оскільки він зумовлює доступні периферійні

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

інтерфейси, обсяг пам'яті, енергоспоживання, вартість та екосистему засобів розроблення. Для розв'язуваної задачі було розглянуто три кандидатні платформи: Arduino Nano на базі ATmega328P (архітектура AVR), плата на базі STM32 (архітектура ARM Cortex-M) та модуль ESP32 (архітектура Xtensa).

Arduino Nano побудовано на восьмибітному RISC-мікроконтролері ATmega328P виробництва Microchip Technology (рис. 1.5) [5].

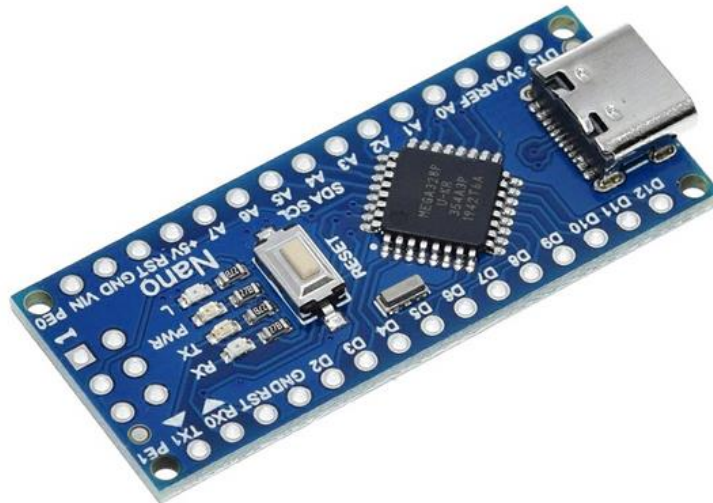


Рисунок 1.5 – Arduino Nano на восьмибітному мікроконтролері ATmega328P

Мікроконтролер працює на тактовій частоті 16 МГц і містить 32 КБ флеш-пам'яті програм, 2 КБ статичної оперативної пам'яті SRAM та 1 КБ електрично стираної енергонезалежної пам'яті EEPROM. До складу периферії входять восьмиканальний десятирозрядний АЦП, інтерфейси UART, SPI та I²C, шість каналів широтно-імпульсної модуляції та два зовнішні переривання. Архітектура AVR належить до класу RISC і виконує більшість інструкцій за один такт, завдяки чому продуктивність сягає близько 16 мільйонів операцій за секунду. Час одного циклу аналогово-цифрового перетворення визначається за виразом:

$$t = N \cdot k / f_{CPU} = 13 \cdot 128 / (16 \cdot 10^6) = 104 \text{ мкс}, \quad (1.1)$$

де $N = 13$ – кількість тактів АЦП на одне перетворення; $k = 128$ – коефіцієнт попереднього дільника частоти АЦП; $f_{CPU} = 16$ МГц – тактова частота ядра. Отриманий час перетворення повністю задовольняє вимоги задачі, оскільки

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

параметри мікроклімату змінюються повільно і не потребують високочастотного дискретного зчитування.

Платформа STM32 на базі ядра ARM Cortex-M (рис. 1.6,а) пропонує суттєво вищу обчислювальну продуктивність, більший обсяг пам'яті та розширений набір периферії. Однак для задачі керування повільними тепловими та вологісними процесами ці можливості є надлишковими, а вища складність інструментів розроблення й налагодження не виправдана. Модуль ESP32 (рис. 1.6,б) додатково містить інтерфейси Wi-Fi та Bluetooth, проте живиться напругою логіки 3,3 В, що ускладнює безпосереднє узгодження з п'ятивольтовими датчиками й релейними модулями та потребує додаткових перетворювачів рівнів.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Платформи а) STM32 та б) ESP32

Вирішальними чинниками на користь ATmega328P стали: повна підтримка платформи у середовищі розроблення Arduino IDE; розвинена екосистема перевірених бібліотек (DallasTemperature, LiquidCrystal_I2C, RTCLib, encMinim, ServoSmooth); логічний рівень 5 В, безпосередньо сумісний з типовими релейними модулями та датчиками; достатня кількість виводів для підключення семи реле, двох сервоприводів та чотирьох аналогових датчиків; низька вартість і поширеність. Узагальнені технічні характеристики обраної платформи наведено в таблиці 1.2.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики платформи Arduino Nano (ATmega328P)

Мікроконтролер	Microchip ATmega328P
Архітектура	AVR RISC, 8 розрядів
Тактова частота	16 МГц
Продуктивність	≈ 16 MIPS
Флеш-пам'ять програм	32 КБ (2 КБ – завантажувач)
Оперативна пам'ять SRAM	2 КБ
Енергонезалежна пам'ять EEPROM	1 КБ
Цифрові входи/виходи	14 (з них 6 з ШІМ)
Аналогові входи	8 (A0–A7)
Розрядність АЦП	10 біт
Логічний рівень	5 В
Максимальний струм виводу	40 мА
Габаритні розміри плати	18,5 × 43,2 мм

1.5 Вибір та обґрунтування сенсорної бази

Сенсорна підсистема є джерелом первинної інформації про стан керованого об'єкта, тому коректний вибір датчиків безпосередньо визначає якість регулювання. До сенсорів системи висуваються вимоги достатньої точності, стабільності характеристик у часі, стійкості до підвищеної вологості, помірної вартості та сумісності з інтерфейсами обраного мікроконтролера.

1.5.1 Датчик температури та вологості BME280

Основним джерелом даних про стан повітряного середовища обрано цифровий датчик BME280 виробництва Bosch Sensortec (рис. 1.7) [6]. Датчик інтегрує в єдиному корпусі три первинні перетворювачі – температури, відносної вологості та атмосферного тиску – і передає попередньо оброблені цифрові значення інтерфейсом I²C. Це усуває потребу в аналоговій обробці сигналу, мінімізує вплив завад і вивільняє аналогові входи мікроконтролера для ґрунтових датчиків.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22



Рисунок 1.7 – Датчик температури та вологості BME280 виробництва Bosch Sensortec

Діапазон вимірювання температури становить від -40 до $+85$ °C з точністю $\pm 0,5$ °C, відносної вологості – від 0 до 100 % з точністю ± 3 %, атмосферного тиску – від 300 до 1100 гПа з точністю ± 1 гПа. Споживаний струм у режимі періодичного вимірювання не перевищує одиниць мікроампер, що робить навантаження датчика на лінію живлення несуттєвим. Датчик підключається до спільної шини I²C і має адресу 0x76 (або 0x77 залежно від стану виводу SDO), розділяючи лінію з дисплеєм та модулем реального часу.

Коректна робота шини I²C потребує підтягувальних резисторів, що формують високий логічний рівень та забезпечують прийнятну тривалість фронтів сигналу. Максимальний опір підтягувального резистора визначається з умови забезпечення часу наростання фронту за виразом:

$$R_{max} = t_R / (0,8473 \cdot C_L) = 1000 \text{ нс} / (0,8473 \cdot 40 \text{ пФ}) \approx 29,5 \text{ кОм}, \quad (1.2)$$

де $t_R = 1000$ нс – максимально допустимий час наростання фронту для стандартного режиму I²C; $C_L \approx 40$ пФ – сумарна паразитна ємність шини. Зважаючи на підвищення робочої частоти шини до 400 кбіт/с, на практиці прийнято значно менше значення $R = 4,7$ кОм, що гарантує надійне формування фронтів із суттєвим запасом.

1.5.2 Цифровий датчик температури DS18B20

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Для вимірювання температури ґрунту та окремих зон теплиці обрано цифровий датчик DS18B20 виробництва Maxim Integrated (рис. 1.8) [7]. Датчик використовує однопровідний інтерфейс 1-Wire, що дозволяє підключити декілька приладів до єдиної сигнальної лінії мікроконтролера завдяки унікальному 64-бітному ідентифікатору кожного екземпляра. Це є важливою перевагою для розподіленого вимірювання температури в різних точках теплиці без витрачання додаткових виводів.



Рисунок 1.8 – Датчик температури та вологості BME280 виробництва Bosch Sensortec

Діапазон вимірювання DS18B20 становить від -55 до $+125$ °C з гарантованою точністю $\pm 0,5$ °C у діапазоні від -10 до $+85$ °C. Розрядність перетворення програмно конфігурується від 9 до 12 біт, чим визначається роздільна здатність за виразом:

$$R\Delta t = 0,0625 \cdot 2^{(4 - R)} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.3)$$

де $R \in \{0, 1, 2, 3\}$ відповідає розрядності 9, 10, 11 та 12 біт. За максимальної розрядності 12 біт ($R = 3$) роздільна здатність становить $0,0625$ °C, а час одного перетворення не перевищує 750 мс.

Герметичне виконання чутливого елемента в металевому корпусі або нержавіючому зонді робить датчик придатним для безпосереднього занурення у ґрунт чи воду, що відповідає умовам експлуатації в теплиці.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

1.5.3 Аналогові датчики вологості ґрунту

Контроль вологості ґрунту здійснюється аналоговими датчиками ємнісного або резистивного типу (рис. 1.9). Резистивні датчики простіші й дешевші, проте схильні до електрохімічної корозії електродів унаслідок постійного протікання струму та поступово втрачають точність. Ємнісні датчики вимірюють діелектричну проникність ґрунту і позбавлені цього недоліку. В обох випадках вихідний сигнал є аналоговим і подається на входи АЦП (А2, А3, А6, А7), де перетворюється у код 0–1023, який у прошивці нормується до діапазону 0–255.

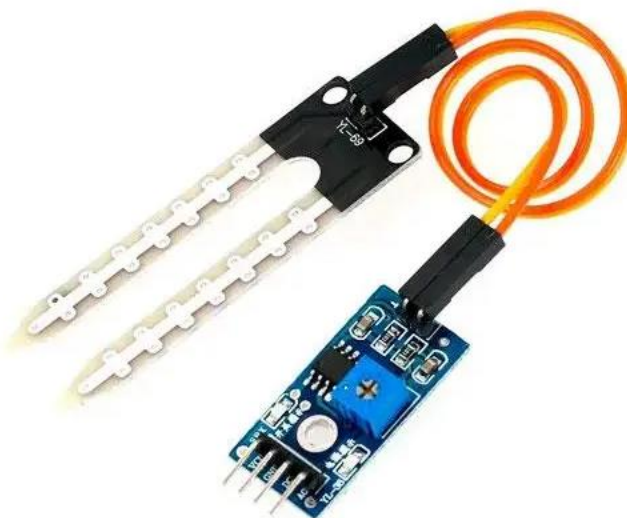


Рисунок 1.9 – Резистивний датчик вологості ґрунту FC-28-D

Важливим схемотехнічним рішенням є імпульсне живлення ґрунтових датчиків: напруга на них подається лише на короткий проміжок безпосередньо перед зчитуванням (за 50 мс до й упродовж 50 мс після опитування) через окремий керувальний вивід та транзисторний ключ. Це суттєво уповільнює електрохімічну деградацію електродів. Сумарний електричний заряд, що протікає через датчик за один цикл опитування, оцінюється за виразом:

$$Q = I \cdot t = (U_{CC} / R) \cdot t_{imp} = (5 / 10000) \cdot 0,1 = 50 \text{ мкКл}, \quad (1.4)$$

де $U_{CC} = 5 \text{ В}$ – напруга живлення; $R \approx 10 \text{ кОм}$ – еквівалентний опір кола датчика; $t_{imp} = 100 \text{ мс}$ – повна тривалість живлячого імпульсу. Зменшення часу

протікання струму прямо пропорційно зменшує перенесений заряд і, відповідно, інтенсивність корозії.

1.5.4 Модуль реального часу DS3231

Реалізація режимів роботи за розкладом і прив'язка подій до астрономічного часу потребують точного джерела реального часу. Для цього застосовано модуль DS3231 виробництва Maxim Integrated (рис. 1.10) [8]. На відміну від простих годинників реального часу, DS3231 містить вбудований термокомпенсований кварцовий генератор (TCXO), що забезпечує високу стабільність ходу за зміни температури навколишнього середовища.



Рисунок 1.10 – Модуль реального часу DS3231

Заявлена відносна похибка ходу становить ± 2 проміле за мільйон (ppm) у діапазоні температур від 0 до +40 °C. Накопичене відхилення за рік оцінюється за виразом:

$$\Delta\tau = \delta \cdot T_{\text{рік}} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 525600 \approx 1,05 \text{ хв/рік}, \quad (1.5)$$

де $\delta = 2 \cdot 10^{-6}$ – відносна похибка ходу; $T_{\text{рік}} = 525600$ хв – кількість хвилин у році.

Таке відхилення є цілком прийнятним для задач керування мікрокліматом. Модуль підключається до шини I²C за адресою 0x68 і комплектується автономним елементом живлення CR2032, що зберігає поточний час при відключенні основного живлення системи протягом кількох років.

Висновки за розділом 1

У першому розділі виконано системний аналіз предметної галузі та обґрунтовано вибір апаратної бази розроблюваного комплексу. Розглянуто біотехнічні передумови формування мікроклімату теплиці й показано, що теплиця є багатовимірним об'єктом керування зі складними перехресними зв'язками між параметрами, що зумовлює потребу в багатоканальній системі автоматичного керування.

Сформульовано вимоги до системи автоматизації, серед яких автономність, енергонезалежне збереження конфігурації, багатоканальність, прив'язка до реального часу та захист від комутаційних завад.

Обґрунтовано вибір мікроконтролера ATmega328P за критеріями достатньої продуктивності, периферійного забезпечення, сумісності за логічним рівнем та наявності екосистеми засобів розроблення. Обрано сенсорну базу: цифровий датчик BME280 для повітряного середовища, датчики DS18B20 для температури ґрунту, аналогові ґрунтові датчики з імпульсним живленням та модуль реального часу DS3231.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р2							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розробив		Нікіфорчук В.С.				АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСУ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЦІ	Літ.		Арк.		Аркушів	
Керівник		Козлов М.О.										
Консульт.							НУК ім. ам. Макарова					
Н. контроль		Грешнов А.Ю.										
Зав. каф.												

РОЗДІЛ 2. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСУ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЦІ

2.1 Структурна схема апаратно-програмного комплексу керування мікрокліматом теплиці

Апаратно-програмний комплекс системи управління мікрокліматом теплиці побудовано за централізованою архітектурою, у якій усі функціональні підсистеми об'єднано навколо центрального обчислювального вузла – мікроконтролера ATmega328P. Структурно комплекс поділяється на сім функціональних блоків: блок живлення, центральний обчислювальний блок, підсистему збору даних, підсистему керування виконавчими механізмами, підсистему відображення та взаємодії з користувачем, блок реального часу та блок енергонезалежного збереження конфігурації.

Блок живлення формує два рівні напруги. Напруга +12 В живить релейні модулі, сервоприводи та лінійний привод, а напруга +5 В, що формується інтегральним стабілізатором AMS1117-5.0, живить мікроконтролер, датчики та логічні кола. Окремий стабілізатор AMS1117-3.3 забезпечує напругу 3,3 В для додаткових модулів за потреби.

Центральний обчислювальний блок на базі Arduino Nano виконує всі алгоритми керування: циклічно опитує датчики, обробляє команди користувача з енкодера, реалізує логіку таймерів та ПІД-регуляторів і формує сигнали керування виконавчими механізмами.

Підсистема збору даних об'єднує цифровий датчик BME280, підключений шиною I²C, датчики температури DS18B20 на шині 1-Wire та чотири аналогові канали для ґрунтових датчиків чи термісторів з імпульсним живленням через окремий керувальний вивід. Підсистема керування виконавчими механізмами включає сім релейних каналів для комутації навантажень змінного та постійного струму, два канали сервоприводів та канал двонапрявленого лінійного привода з широтно-імпульсним керуванням швидкістю. Загальну схему електричних з'єднань усіх компонентів комплексу наведено на рис. 2.1.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

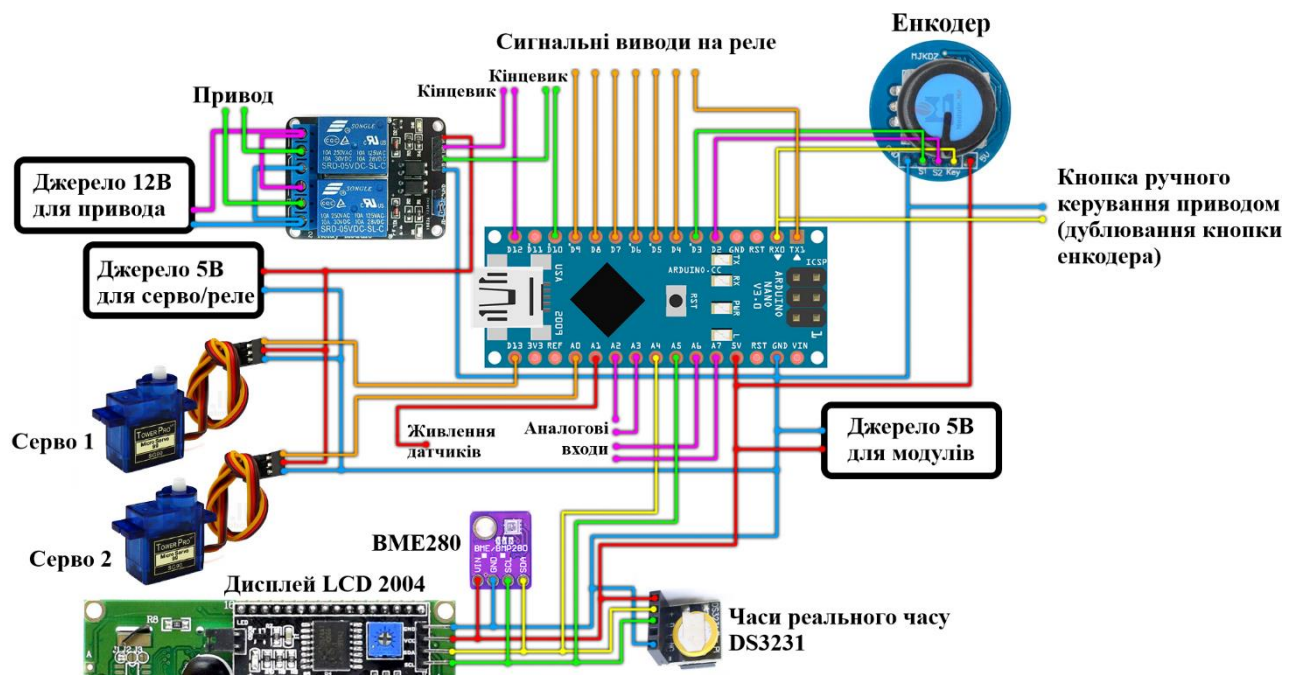


Рисунок 2.1 – Загальну схему електричних з'єднань усіх компонентів комплексу керування мікрокліматом теплиці

Підсистема відображення та взаємодії складається із символічного рідкокристалічного дисплея LCD2004 формату 20 символів на 4 рядки (рис. 2.2), підключеного через розширювач портів PCF8574 інтерфейсом I²C, та інкрементного енкодера з функцією кнопки.



Рисунок 2.2 – Рідкокристалічний дисплей LCD2004 формату 20 символів на 4 рядки

Блок реального часу реалізовано на модулі DS3231, а блок збереження конфігурації – на вбудованій енергонезалежній пам'яті EEPROM мікроконтролера обсягом 1 КБ. Така архітектура забезпечує повну автономність комплексу: після одноразового налаштування система самостійно відновлює конфігурацію та продовжує роботу після будь-якого перебою живлення.

2.2 Проектування підсистеми збору даних

Підсистема збору даних реалізує отримання первинної інформації від датчиків трьома різними інтерфейсами, кожен з яких обрано з урахуванням типу відповідного сенсора: двопровідною шиною I²C, однопровідною шиною 1-Wire та аналоговими лініями АЦП.

До I²C шини неї підключено три пристрої – датчик BME280, розширювач портів дисплея PCF8574 та модуль реального часу DS3231 – кожен зі своєю унікальною адресою, що дозволяє обслуговувати їх по черзі єдиною парою провідників. Лінії шини підтягнуто до напруги живлення резисторами 4,7 кОм. Для зменшення затримок опитування тактову частоту шини в прошивці підвищено до 400 кбіт/с. Тривалість передавання одного байта за такої частоти визначається виразом:

$$t_{byte} = (1 + 8 + 1) / f_{I2C} = 10 / (400 \cdot 10^3) = 25 \text{ мкс}, \quad (2.1)$$

де одиниці у чисельнику відповідають стартовому біту, восьми бітам даних та біту підтвердження. Сумарний час повного опитування трьох пристроїв шини є несуттєвим порівняно з періодом основного циклу програми.

Шина 1-Wire також потребує підтягувального резистора 4,7 кОм. Програмна обробка протоколу виконується бібліотекою microDS18B20, що підтримує одночасну роботу масиву датчиків з адресацією за унікальним ідентифікатором. У режимі кількох датчиків прошивка здатна обчислювати середнє, мінімальне або максимальне значення температури за всіма приладами, що корисно для усереднення температури по об'єму теплиці.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

2.3 Проектування підсистеми керування виконавчими механізмами

2.3.1 Релейні модулі та розрахунок струму навантаження

Комутація потужних навантажень – нагрівачів, насосів, вентиляторів та освітлення – здійснюється релейними модулями на основі електромеханічних реле SRD-05VDC-SL-C (рис. 2.3) або твердотільних реле SSR-40DA. Реле забезпечує гальванічну розв'язку низьковольтних кіл керування (5 В) від силових кіл навантаження (до 250 В змінного струму), що є обов'язковою вимогою електробезпеки [9].

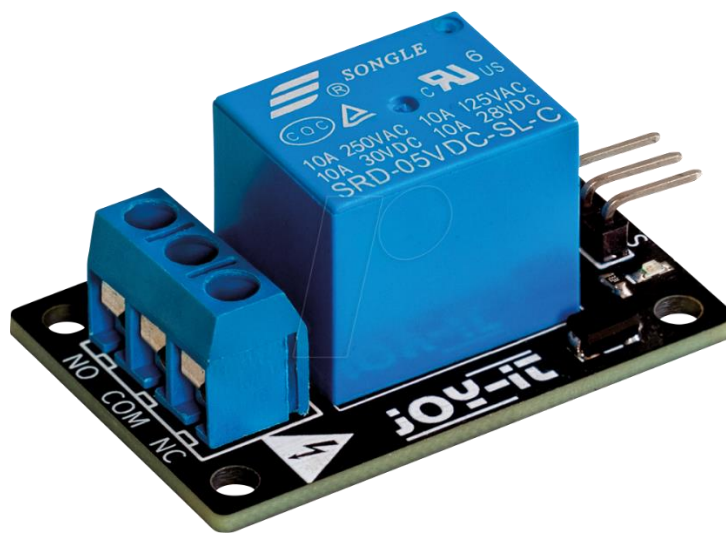


Рисунок 2.3 – Реле електромеханічне Songle SRD-05VDC-SL-C

Гранична комутаційна потужність електромеханічного реле SRD-05VDC-SL-C визначається добутком максимальних комутованих напруги та струму за виразом:

$$P_{max} = U_{max} \cdot I_{max} = 250 \cdot 10 = 2500 \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

Перевіримо придатність реле для керування типовим обігрівачем теплиці потужністю 1000 Вт. Струм, що протікає через контакти реле, обчислюється за виразом:

$$I_{\text{наван}} = P / U = 1000 / 220 \approx 4,55 \text{ А} < 10 \text{ А}, \quad (2.3)$$

тобто струм навантаження становить менш як половину граничного значення, що забезпечує надійну роботу контактів із достатнім запасом за струмом.

Струм спрацьовування котушки реле SRD-05VDC-SL-C за опору обмотки 71,4 Ом і напруги 5 В становить близько 70 мА, що перевищує допустимий струм одного виводу мікроконтролера (40 мА). Тому керування реле здійснюється через транзисторний ключ на біполярному транзисторі. Опір базового резистора ключа розраховується з умови насичення транзистора за виразом:

$$R_{\text{б}} = (U_{\text{вих}} - U_{\text{БЕ}}) \cdot \beta / I_{\text{к}} = (5 - 0,7) \cdot 100 / 0,07 \approx 6,1 \text{ кОм}, \quad (2.4)$$

де $U_{\text{вих}} = 5 \text{ В}$ – напруга логічного рівня мікроконтролера; $U_{\text{БЕ}} = 0,7 \text{ В}$ – напруга відмикання переходу база–емітер; $\beta \geq 100$ – коефіцієнт передавання струму; $I_{\text{к}} = 70 \text{ мА}$ – струм колектора (струм котушки). Для забезпечення гарантованого насичення з запасом приймається стандартне значення $R_{\text{б}} = 1 \text{ кОм}$.

2.3.2 Сервоприводи та канал лінійного привода

Сервоприводи застосовуються для керування вентиляційними заслінками та поворотними механізмами. Положення вала сервопривода задається тривалістю керувального імпульсу, що повторюється з частотою 50 Гц. Залежність кута повороту від тривалості імпульсу є лінійною та описується виразом:

$$\theta = (\tau - \tau_{\text{min}}) / (\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}}) \cdot \theta_{\text{max}}, \quad (2.5)$$

де τ – поточна тривалість імпульсу; $\tau_{\text{min}} = 544 \text{ мкс}$ відповідає куту 0° ; $\tau_{\text{max}} = 2400 \text{ мкс}$ відповідає куту 180° ; $\theta_{\text{max}} = 180^\circ$ – повний діапазон повороту.

Для усунення ривків та плавного переміщення заслінок прошивка використовує бібліотеку ServoSmooth, що формує трапецієподібний профіль швидкості з обмеженням прискорення та максимальної швидкості, параметри яких налаштовуються у меню системи.

Канал лінійного привода керує двигуном постійного струму через драйвер на основі Н-моста, що забезпечує реверсивне обертання. Швидкість обертання

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

регулюється широтно-імпульсною модуляцією. Частоту ШІМ обрано рівною 31,4 кГц шляхом перепрограмування дільника таймера Timer2 мікроконтролера; це значення перевищує верхню межу чутності людського вуха (близько 20 кГц), завдяки чому привод працює безшумно. Крайні положення механізму контролюються кінцевими вимикачами, а захист від заклинювання реалізовано обмеженням часу руху (тайм-аутом).

2.4 Захист мікроконтролера від електромагнітних завад при комутації індуктивних навантажень

Питання забезпечення електромагнітної сумісності є одним із найважливіших і водночас найчастіше недооцінюваних інженерних аспектів проектування систем керування виконавчими механізмами. Попри уявну простоту підключення реле, комутація індуктивних навантажень без належних захисних заходів спричиняє важко діагностовані збої роботи мікроконтролера, що проявляються як мимовільні перезавантаження, втрата зв'язку з датчиками по шині I²C, спотворення показань аналогових входів та некоректна поведінка дисплея [3].

Фізична природа явища полягає в накопиченні енергії в магнітному полі котушки індуктивного навантаження (двигуна, насоса, соленоїда) під час протікання струму. Накопичена енергія визначається за виразом:

$$W = L \cdot I^2 / 2, \quad (2.6)$$

де L – індуктивність навантаження; I – струм через котушку.

У момент розмикання кола струм не може змінитися стрибкоподібно, унаслідок чого на котушці виникає імпульс самоіндукції (зворотна електрорушійна сила), амплітуда якого визначається швидкістю зміни струму за виразом:

$$U_{\text{сплеск}} = L \cdot (dI / dt). \quad (2.7)$$

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Для кіл постійного струму основним захисним елементом є зворотний діод, увімкнений паралельно до обмотки навантаження у зворотній полярності. У робочому режимі діод закритий і не впливає на коло, а в момент розмикання відкривається та замикає накопичену енергію котушки на себе, гасячи сплеск. Застосовано кремнієвий діод 1N4007 з допустимою зворотною напругою 1000 В та прямим струмом 1 А. Критично важливим є мінімально можлива довжина виводів діода та його розміщення безпосередньо біля клем навантаження.

Універсальним засобом захисту для кіл як постійного, так і змінного струму є демпфувальне RC-коло (снабер), увімкнене паралельно до контактів реле. Воно поглинає енергію комутаційної дуги та обмежує швидкість наростання напруги. Номінали елементів снабера для мережі 220 В за струму навантаження 2 А розраховуються за виразами:

$$C = I^2 / 10 = 2^2 / 10 = 0,4 \text{ мкФ}; \quad (2.8)$$

$$R = U_0 / (10 \cdot I \cdot (1 + 50/U_0)) = 220 / (10 \cdot 2 \cdot (1 + 50/220)) \approx 10 \text{ Ом}. \quad (2.9)$$

Потужність, що розсіюється на резисторі снабера, перевіряється за виразом:

$$P_R = C \cdot U^2 \cdot f = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 220^2 \cdot 50 \approx 0,926 \text{ Вт}. \quad (2.10)$$

Окрім схемотехнічних заходів, застосовано конструктивні: рознесення силових і сигнальних провідників, установлення блокувальних конденсаторів 100 нФ та 10 мкФ безпосередньо біля виводів живлення мікроконтролера, а також заливання вільного простору друкованої плати полігоном спільного проводу для екранування.

2.5 Розробка електричної принципової схеми

Розробка принципової електричної схеми виконана у САПР EasyEDA [11]. Для компонентів, відсутніх у стандартних каталогах (модуль Arduino Nano, модуль DS3231, модуль BME280), розроблено власні схемні символи та

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

посадкові місця. Параметри посадкового місця для виводу зі скрізним отвором розраховано за виразом:

$$D_{\text{пад}} = D_{\text{свердла}} + 2 \cdot t_{\text{кільце}} = 0,9 + 2 \cdot 0,3 = 1,5 \text{ мм}, \quad (2.11)$$

де $t_{\text{кільце}} = 0,3 \text{ мм}$ – мінімальна ширина кільцевого пояса за IPC-2221 [14].

На схему винесено мікроконтролер Arduino Nano, датчик BME280, дисплей LCD2004 через розширювач портів, модуль реального часу DS3231, семиканальний релейний модуль, з'єднувачі сервоприводів та лінійного привода, чотири з'єднувачі аналогових датчиків, вузол живлення та енкодер. Після завершення компонування виконано перевірку електричних правил (ERC). Повну принципову схему наведено в додатку А (рис. А.1).

2.6 Проектування друкованої плати

Принципову схему перенесено в редактор плати командою оновлення, що автоматично імпортує посадкові місця всіх компонентів та список з'єднань. Першим етапом визначено прямокутний контур плати розміром 105×95 мм. Розміщення компонентів виконано вручну з урахуванням таких принципів: релейні модулі розташовано вздовж одного краю плати для зручного підведення силових кабелів навантаження; мікроконтролер розміщено в центральній частині; з'єднувачі датчиків та сервоприводів згруповано вздовж протилежного краю; вузол живлення винесено в кут плати. Мінімальну відстань між компонентами витримано не менше 1 мм для зручності ручного паяння.

Трасування провідників виконано на двох мідних шарах із застосуванням переходів між шарами через металізовані отвори. Прокладання доріжок здійснювалося під кутами, кратними 45°. Ширина доріжки визначається допустимим струмом та припустимим перегрівом провідника згідно зі стандартом IPC-2221 за виразом:

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$w = I / (k \cdot \Delta T^{0,44})^{(1/0,725)} / (t \cdot 1,378), \quad (2.12)$$

де I – струм провідника; ΔT – допустимий перегрів; t – товщина мідної фольги; $k = 0,048$ для зовнішніх шарів. Прийнято: сигнальні лінії – 0,25...0,5 мм; живлення 5 В – 1,0 мм; силові лінії реле – 3,5 мм.

Виконано суцільну заливку нижнього шару плати полігоном спільного проводу для зниження завад та покращення заземлення. Мінімальний зазор між силовими провідниками визначається умовою електричної міцності за виразом:

$$d_{min} = U_{max} / E_{\text{пробою}} = 220 / 150 \approx 1,5 \text{ мм}. \quad (2.13)$$

Друковану плату наведено на рис. 2.4. Детально, з розподіленням на шари наведено у додатку Б (Рис. Б.1, Б.2, Б.3). Технічні параметри спроектованої плати наведено в таблиці 2.1.

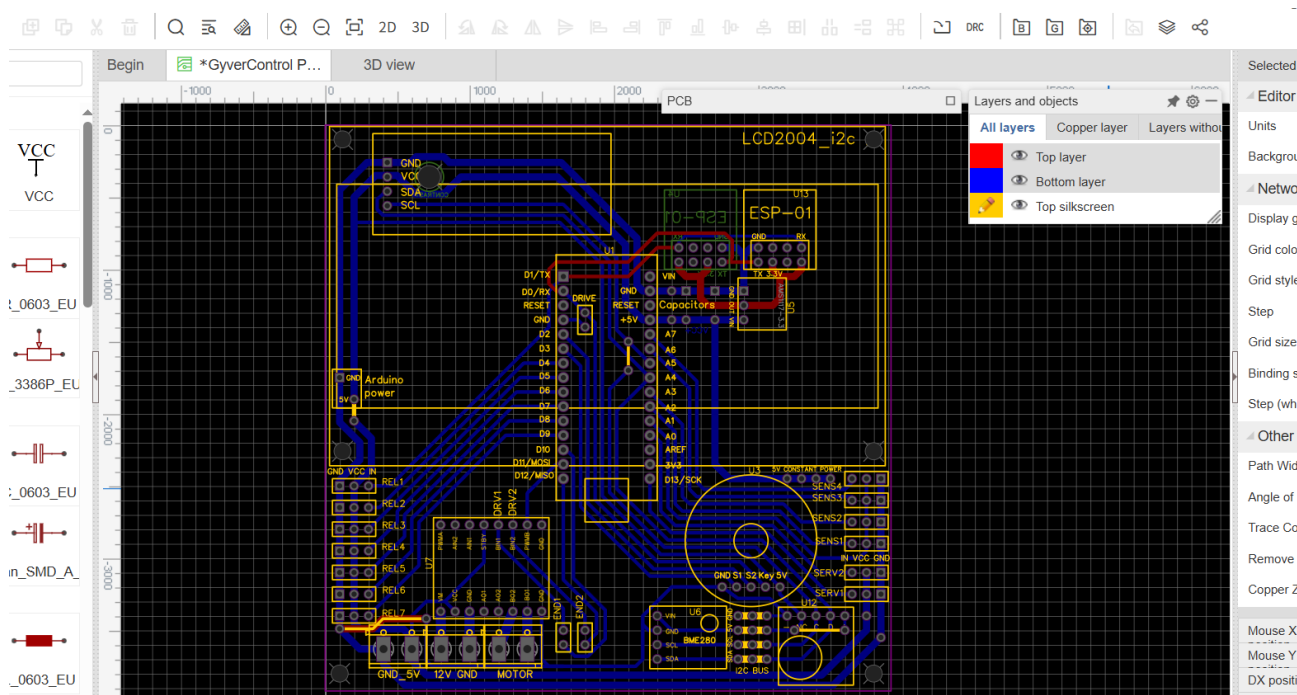


Рисунок 2.4 – Розроблена друкована плата в САПР EasyEDA

Таблиця 2.1 – Технічні параметри спроектованої друкованої плати

Габаритні розміри	105 × 95 мм
Кількість мідних шарів	2 (верхній та нижній)
Товщина плати	1,6 мм
Матеріал підкладки	FR4, $T_g \geq 130$ °C
Мін. ширина доріжки	0,25 мм (сигнал), 3,5 мм (силові)
Мін. зазор	0,3 мм (сигнал), 2,0 мм (220 В)
Фінішне покриття	HASL (гаряче лудіння)
Формат виробн. файлів	Gerber RS-274X

Висновки за розділом 2

У розділі розроблено апаратну частину комплексу керування мікрокліматом теплиці, побудовану за централізованою архітектурою на базі мікроконтролера ATmega328P. Спроектвана система об'єднує сім функціональних блоків, що забезпечують безперебійний збір даних, керування навантаженнями та взаємодію з користувачем. Завдяки інтеграції модуля реального часу та використанню енергонезалежної пам'яті досягнуто високого рівня автономності, що дозволяє комплексу самостійно відновлювати робочі параметри після перебоїв електроживлення без втручання оператора.

Для отримання об'єктивних даних про стан середовища спроектовано підсистему збору телеметрії, яка ефективно поєднує високошвидкісну цифрову шину I²C, однопровідний інтерфейс 1-Wire та аналогові лінії вимірювання. Підсистема керування виконавчими механізмами забезпечує безпечну та гнучку взаємодію з різнотипними навантаженнями: від надійної силової комутації нагрівальних елементів за допомогою релейних модулів із гальванічною розв'язкою до прецизійного керування вентиляційними заслінками через сервоприводи з програмним згладжуванням рухів і безшумним високочастотним ШІМ-регулюванням лінійного привода.

Особливу увагу приділено комплексному забезпеченню електромагнітної сумісності та апаратному захисту обчислювального ядра від кондуктивних та індуктивних завад. На основі математичних розрахунків упроваджено дієві заходи гасіння комутаційних викидів: застосовано зворотні діоди для індуктивних кіл постійного струму та розраховано параметри демпфувальних RC-снаберів для силової мережі змінного струму. Ці рішення в комплексі з рознесенням сигнальних і силових ліній та встановленням блокувальних конденсаторів гарантують відмовостійкість системи та усувають ризики мимовільних збоїв мікроконтролера.

Фінальним етапом апаратної реалізації стало проектування принципової електричної схеми та топології двошарової друкованої плати у системі автоматизованого проектування EasyEDA. Усі геометричні параметри провідників, включаючи ширину силових трас та ізоляційні зазори, розраховано згідно з міжнародним стандартом IPC-2221. Оптимальне компонування елементів із застосуванням суцільного полігона спільного проводу на нижньому шарі плати додатково посилило екранування пристрою, забезпечивши його технологічність та високу експлуатаційну надійність.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Нікіфорчук В.С.			РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ				Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Козлов М.О.									
Консульт.									НУК ім. ам. Макарова		
Н. контроль		Грешнов А.Ю.									
Зав. каф.											

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Загальний алгоритм роботи мікропроцесорної системи

Програмне забезпечення комплексу реалізовано як монолітну прошивку для платформи Arduino Nano у середовищі розроблення Arduino IDE мовою C++. Структура програми відповідає базовій моделі Arduino, у якій функція ініціалізації `setup()` виконується одноразово після ввімкнення або скидання, а функція `loop()` – циклічно та безперервно протягом усього часу роботи. Загальний алгоритм роботи системи наведено у вигляді блок-схеми (додаток В, рис. В.1).

Ключовою архітектурною особливістю прошивки є реалізація псевдобагатозадачності без застосування операційної системи реального часу. Оскільки восьмибітний мікроконтролер виконує єдиний потік інструкцій, паралельне обслуговування кількох незалежних процесів (опитування датчиків, обробка інтерфейсу, регулювання, ведення графіків) досягається через кооперативний розподіл часу на основі системного лічильника мілісекунд `millis()`. Кожна задача перевіряє, чи минув відведений їй інтервал від попереднього виконання, і лише за цієї умови виконує свою роботу, після чого негайно повертає керування. Такий підхід забезпечує своєчасне обслуговування всіх процесів за мінімальних витрат ресурсів. Структуру основного циклу подано у лістингу 3.1.

У наведеній структурі функції верхнього рівня викликаються щоразу для забезпечення мінімальної затримки реакції на дії користувача та зміни сигналів, тоді як обчислювально місткіша логіка таймерів і повне перемальовування дисплея виконуються із періодом одна секунда. Директиви умовної компіляції (`#if`) дозволяють виключати з прошивки невикористовувані модулі для економії пам'яті.

```

void loop() {
    customLoop();           // блок користувацьких функцій
    checkPID();             // перерахунок ПІД-регуляторів
    backlTick();            // таймер вимкнення підсвітки
    controlTick();          // обробка команд енкодера
    readAllSensors();       // опитування датчиків
    #if (USE_PLOTS == 1)
        plotTick();         // оновлення графіків
    #endif
    #if (USE_DRIVE == 1)
        driveTick();        // керування лінійним приводом
    #endif
    if (millis() - commonTimer >= 1000UL) {
        commonTimer += 1000UL;
        timersTick();       // логіка таймерів та автоматики
        redrawDebug();      // оновлення екрана відладки
    }
    #if (WDT_ENABLE == 1)
        wdt_reset();        // скидання сторожового таймера
    #endif
}

```

Лістинг 3.1 – Структура основного циклу програми loop()

Для забезпечення відмовостійкості застосовано сторожовий таймер (Watchdog Timer), налаштований на інтервал 8 секунд. У нормальному режимі функція wdt_reset() періодично скидає його лічильник; якщо ж унаслідок програмного збою чи зависання основний цикл припиняє виконуватися, лічильник переповнюється і мікроконтролер автоматично перезавантажується, відновлюючи працездатність системи без втручання оператора. Це є критично важливим для автономного пристрою, що працює без постійного нагляду.

3.2 Ініціалізація апаратного забезпечення

Функція initHardware() виконується першою в межах setup() і налаштовує всі апаратні ресурси мікроконтролера перед початком основного циклу. Послідовність ініціалізації охоплює: налаштування дисплея та створення користувацьких символів для побудови графіків; перевірку модуля реального часу та синхронізацію часу; ініціалізацію датчика BME280; підвищення тактової частоти шини I²C; перепрограмування таймера Timer2 для формування високочастотного ШІМ-сигналу приводу; конфігурування зовнішніх переривань

енкодера; встановлення режимів виводів реле та живлення датчиків. Фрагмент функції наведено у лістингу 3.2.

```
void initHardware() {
    lcd.init(); lcd.backlight();
    lcd.createChar(0, row8);          // символи для графіків
    if (rtc.lostPower())               // якщо живлення RTC втрачено
        rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
    bme.begin(BME_ADDRESS);
    Wire.setClock(400000);             // шина I2C 400 кбіт/с
    TCCR2A |= _BV(WGM20);              // ШІМ приводу
    TCCR2B = (TCCR2B & 0b11111000) | 0x01; // 31,4 кГц
    EICRA |= (1 << ISC00); bitSet(EIMSK, INT0); // енкодер DT
    EICRA |= (1 << ISC10); bitSet(EIMSK, INT1); // енкодер CLK
    pinMode(SENS_VCC, OUTPUT);         // живлення датчиків
    for (byte i = 0; i < 7; i++)
        pinMode(relayPins[i], OUTPUT); // канали реле
}
```

Лістинг 3.2 – Фрагмент функції ініціалізації апаратного забезпечення
initHardware()

Окремої уваги заслуговує перевірка стану модуля реального часу методом lostPower(): у разі повного розряду резервного елемента живлення або першого ввімкнення модуль автоматично ініціалізується часом компіляції прошивки, що гарантує коректний відлік від моменту запуску. Перепрограмування регістрів таймера Timer2 змінює стандартну частоту ШІМ для виводу приводу на 31,4 кГц, виводячи її за межу чутності.

3.3 Алгоритм навігації меню та обробки команд

Логіка інтерфейсу користувача реалізується функцією controlTick(), яка викликається на кожній ітерації основного циклу та обробляє події енкодера. Стан інтерфейсу описується трьома змінними: типом поточного екрана, номером поточного каналу та позицією курсора в межах екрана. Алгоритм навігації побудовано на основі скінченного автомата, що реалізується конструкцією множинного вибору switch за типом поточного екрана, а спрощений фрагмент реалізації наведено у лістингу 3.3.

```

switch (curPage) {
    case PAGE_DEBUG:                // головний екран
        if (state == ENC_LEFT)  curChannel--;
        if (state == ENC_RIGHT) curChannel++;
        curChannel = constrain(curChannel, 0, MAX_CHANNEL);
        if (state == ENC_CLICK) curPage = PAGE_CHANNEL;
        break;
    case PAGE_CHANNEL:              // налаштування каналу
        if (state == ENC_LEFT || state == ENC_RIGHT)
            moveCursor(state);
        if (state == ENC_CLICK && curPos == POS_MODE)
            curPage = PAGE_MODE;
        if (state == ENC_CLICK && curPos == POS_BACK)
            curPage = PAGE_DEBUG;
        break;
    case PAGE_MODE:                // налаштування режиму
        if (state == ENC_HOLD_LEFT)  changeParam(-1);
        if (state == ENC_HOLD_RIGHT) changeParam(+1);
        if (state == ENC_CLICK && curPos == POS_BACK) {
            saveChannel(curChannel);    // зберегти в EEPROM
            curPage = PAGE_CHANNEL;
        }
        break;
}
redrawScreen();                    // перемалювати дисплей
}

```

Лістинг 3.3 – Фрагмент алгоритму навігації меню (функція controlTick)

Перехід між екранами здійснюється зміною змінної стану curPage, після чого функція redrawScreen() перебудовує вміст дисплея відповідно до нового стану. Відображення кожного типу екрана винесено в окрему функцію – redrawDebug(), redrawService(), redrawChannel(), redrawMode() та redrawSettings() – що забезпечує чіткий поділ між логікою керування та логікою візуалізації й полегшує супровід коду. Зміна параметрів у режимі редагування супроводжується відкладеним збереженням у незалежну пам'ять, що розглянуто далі.

3.4 Обробка сигналів енкодера

Інкrementний енкодер формує два зсунуті за фазою імпульсні сигнали (квадратурний код), за послідовністю фронтів яких визначається напрям обертання. Механічні контакти енкодера схильні до брязкоту (дребезгу), що без фільтрації спричиняє хибну реєстрацію кількох кроків замість одного. Обробка

сигналів реалізована бібліотекою encMinim з апаратною реєстрацією подій через зовнішні переривання INT0 та INT1, що гарантує захоплення кожного кроку незалежно від завантаженості процесора.

Напрямок обертання визначається за станом сигналу DT у момент фронту сигналу CLK: за умовою $CLK \uparrow \wedge DT = 1$ фіксується обертання в один бік, за $CLK \uparrow \wedge DT = 0$ – у протилежний. Придушення брязкоту виконується програмним часовим фільтром із порогом 5 мс. Додатково реалізовано режим прискореного перебору: за частоти кроків, що перевищує поріг (інтервал між кроками менший за 30 мс), крок зміни параметра збільшується, що значно прискорює налаштування величин з широким діапазоном значень.

3.5 Інтерфейс користувача

Інтерфейс користувача забезпечує налаштування системи, відображення поточного стану та ручне керування виконавчими механізмами. Він реалізований на символьному дисплеї LCD2004 формату 20×4 символи, побудованому на контролері HD44780 та підключеному через розширювач портів PCF8574 інтерфейсом I²C [10]. Єдиним органом керування є інкрементний енкодер з вбудованою кнопкою, підключений до виводів CLK (D3), DT (D2) та SW (D0), з обробкою через апаратні переривання INT0 та INT1.

Структуру меню організовано ієрархічно. Головний рівень утворює горизонтальний ланцюг екранів: Service → Settings → Debug → Channel 0...6 → Servo 1–2 → Drive. Повну структурну схему меню наведено у додатку (Додаток В, рис. В.2).

Взаємодія побудована на трьох базових жестах: обертання – вибір пункту; клік – підтвердження або вхід у підменю; утримання з обертанням – зміна значення параметра. Ввімкнення з утримуваною кнопкою виконує повне скидання конфігурації до заводських значень.

3.5.1 Екран відладки

Екран відладки є стартовим і відображає повну картину стану системи у реальному часі (рис. 3.1). У першому рядку – заголовок DEBUG та положення сервоприводів (S1, S2). У другому – вологість повітря та показання SENS1–SENS4. У третьому – температура, бітовий стан реле (R:1010101) та привод (D). У четвертому – час, день тижня та час безперервної роботи (U). Альтернативний варіант компоновки наведено на рис. 3.2.

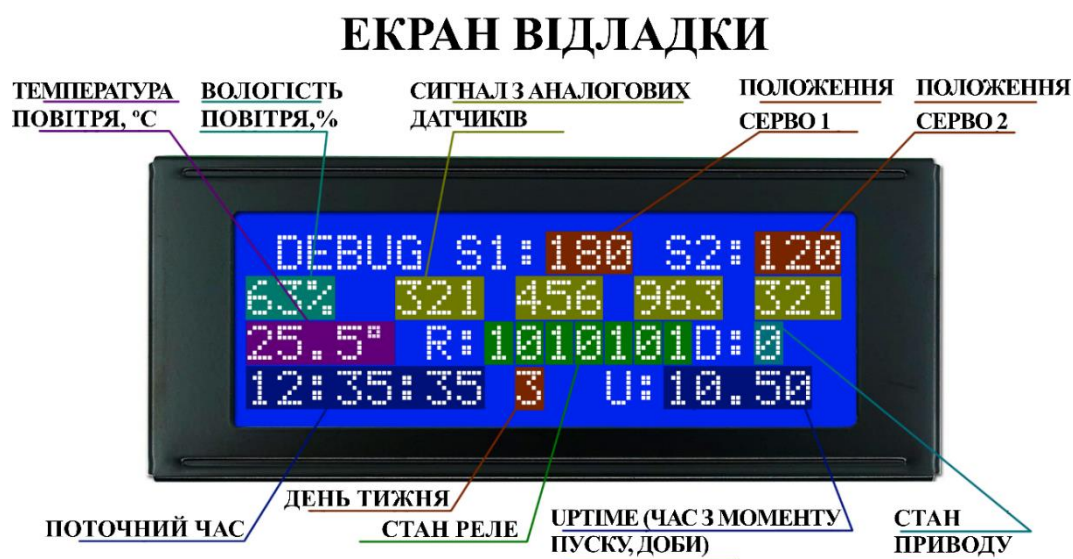


Рисунок 3.1 – Екран відладки (DEBUG): показання датчиків та стан виконавчих механізмів



Рисунок 3.2 – Екран відладки: варіант з роздільним відображенням Н/Т

3.5.2 Екран сервісу

Екран сервісу (рис. 3.3) дозволяє вручну змінювати стан будь-якого виконавчого механізму незалежно від автоматики. При активному екрані сервісу автоматика призупиняється. Оператор обертанням обирає канал, утриманням з обертанням змінює його стан.

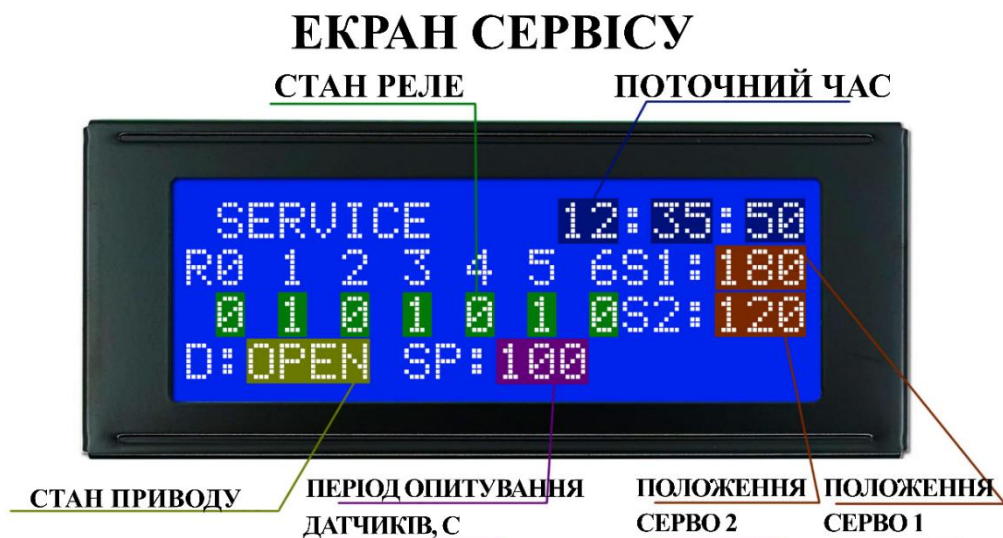


Рисунок 3.3 – Екран сервісу (SERVICE): ручне керування виходами

3.5.3 Екран налаштування каналу

Клік на каналі відкриває екран налаштування його параметрів (рис. 3.4). Рядок 1: назва та стан On/Off. Рядок 2: режим Mode (клік – підменю). Рядок 3: напрям Direction. Рядок 4: тип (Relay/Valve/Common) для реле, межі кутів для серво або тайм-аут для привода.

ЕКРАН ВИБОРУ КАНАЛУ



Рисунок 3.4 – Екран налаштування каналу: стан, режим, напрям, тип

3.5.4 Екран налаштування режиму

Клік на Mode відкриває екран детального налаштування параметрів режиму (рис. 3.5). Для режиму Day: Start та Stop (години). Для Timer: Period, Work. Для Sensor: Period, Sensor, Threshold. Для PID: Set, Sensor, kP/kI/kD, min/max.

ЕКРАН НАЛАШТУВАННЯ РЕЖИМУ



Рисунок 3.5 – Екран налаштування режиму Day: час початку та завершення

3.5.5 Екран графіків

З екрана відладки доступний графічний перегляд динаміки показань (рис. 3.6). Три масштаби: хвилинний (15 хв), годинний (15 год) та добовий (15 діб). Зліва – мін/макс/поточне значення, справа – стовпчикова діаграма. Графіки зберігаються в EEPROM.

ГРАФІК

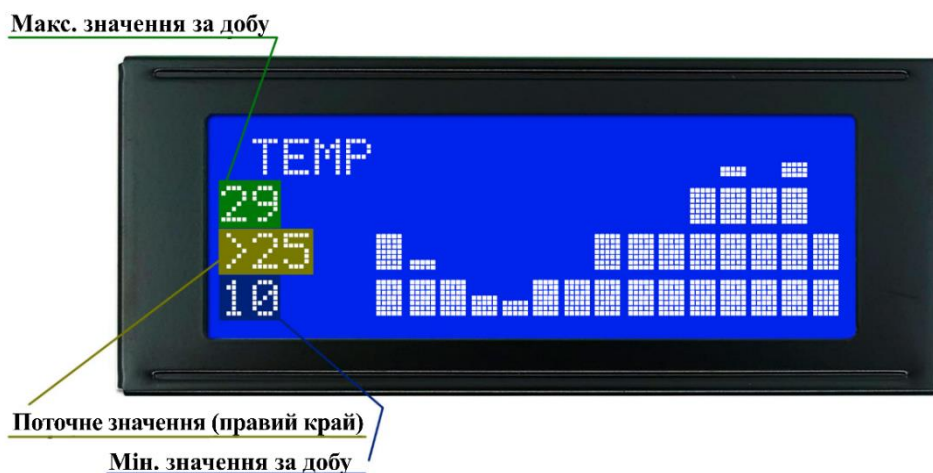


Рисунок 3.6 – Екран графіка температури (TEMP): мін/макс/поточне

3.6 Алгоритм планування завдань та автоматики

Центральним елементом автоматики є функція `timersTick()`, що викликається із періодом одна секунда та реалізує логіку всіх десяти каналів керування. Для кожного активного каналу залежно від обраного режиму обчислюється потрібний стан виходу. Прошивка підтримує шість режимів роботи, що охоплюють типові сценарії автоматизації теплиці.

Режим `Timer` (простий таймер) реалізує періодичне спрацьовування без прив'язки до реального часу: канал вмикається на час `Work` із періодом `Period`. Режим `Timer RTC` доповнює простий таймер прив'язкою до годинника реального часу, завдяки чому спрацьовування відбуваються у фіксовані моменти доби. Режим `Week` забезпечує роботу за тижневим розкладом із заданням часу початку, часу завершення та активних днів тижня. Спрощену реалізацію перших двох режимів наведено у лістингу 3.4.

```
void timersTick() {
    realTime = rtc.now();           // поточний час
    for (byte ch = 0; ch < 10; ch++) {
        activeChannel = loadChannel(ch); // конфігурація з RAM
        if (!activeChannel.state) continue;
        switch (activeChannel.mode) {
            case MODE_TIMER:
                if (millis() - tmr[ch] >= period_ms(ch))
                    { tmr[ch] = millis(); chState[ch] = activeChannel.dir; }
                if (millis() - tmr[ch] >= work_ms(ch))
                    chState[ch] = !activeChannel.dir;
                break;
            case MODE_TIMER_RTC:
                if (realTime.second() == 0 &&
                    isPeriodHit(ch, realTime.minute(), realTime.hour()))
                    { tmr[ch] = millis(); chState[ch] = activeChannel.dir; }
                break;
            // MODE_WEEK, MODE_SENSOR, MODE_PID, MODE_DAWN ...
        }
        applyChannel(ch, chState[ch]); // вивід на реле/серво
    }
}
```

Лістинг 3.4 – Фрагмент функції обробки таймерів `timersTick()`

Режим Sensor реалізує двопозиційне регулювання за показаннями обраного датчика із заданою зоною нечутливості (гістерезисом), що запобігає частим перемиканням навколо порогу. Логіка вмикання та вимикання описується умовами:

$$y(t) > V_{max} \rightarrow \text{канал вмикається;} \quad (3.1)$$

$$y(t) < V_{min} \rightarrow \text{канал вимикається,} \quad (3.2)$$

де $y(t)$ – поточне значення датчика; V_{max} та V_{min} – верхній та нижній пороги.

Ширина зони гістерезису визначається виразом:

$$\Delta H = V_{max} - V_{min}. \quad (3.3)$$

Збільшення ширини гістерезису зменшує частоту перемикань виконавчого механізму, продовжуючи ресурс контактів реле, проте водночас збільшує амплітуду коливань регульованої величини. Для температурного регулювання раціональним є компроміс $\Delta H \approx 1...2$ °C. Прошивка допускає інверсну логіку ($V_{min} > V_{max}$), що дозволяє реалізувати як нагрів, так і охолодження одним універсальним алгоритмом.

Збереження конфігурації в енергонезалежній пам'яті EEPROM є критичним для автономності системи. Оскільки EEPROM має обмежений ресурс перезапису (близько 100 000 циклів на комірку), застосовано стратегію відкладеного запису: зміни параметрів спочатку накопичуються в оперативній пам'яті, а фактичний запис виконується лише після завершення взаємодії користувача з меню. Розрахунковий ресурс пам'яті за такого підходу за двох сеансів налаштування на добу оцінюється виразом:

$$T_{\text{ресурс}} = N_{\text{цикл}} / f_{\text{зап}} = 100000 / (2 \cdot 365) \approx 137 \text{ років,} \quad (3.4)$$

що багаторазово перевищує термін експлуатації пристрою.

Структуру розподілу пам'яті EEPROM подано в таблиці 3.1.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Розподіл енергонезалежної пам'яті EEPROM

Адреса (байт)	Призначення	Розмір (байт)
0	Налаштування 10 каналів керування	320
320	Коефіцієнти ПІД-регуляторів	100
460	Параметри режиму світанку (Dawn)	24
502	Загальні налаштування системи	22
524	Збережені графіки (годинні, добові)	~480
1022	Ключ-ознака ініціалізації (значення 121)	2

3.7 Реалізація ПІД-регулятора

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор є класичним і найпоширенішим алгоритмом у системах автоматичного керування. На відміну від двопозиційного регулювання, що спричиняє коливання регульованої величини, ПІД-регулятор формує неперервний керувальний вплив, пропорційний величині та динаміці відхилення, завдяки чому забезпечує плавне й точне підтримання уставки. Для теплових процесів теплиці це дозволяє утримувати температуру з точністю до часток градуса без різких перемикачів нагрівача.

Закон керування ПІД-регулятора у неперервній формі визначається виразом:

$$u(t) = k_P \cdot e(t) + k_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + k_D \cdot de(t)/dt, \quad (3.5)$$

де $e(t) = SP - y(t)$ – похибка регулювання як різниця між уставкою SP та поточним значенням $y(t)$; k_P , k_I , k_D – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складових відповідно.

Пропорційна складова забезпечує базову реакцію, пропорційну поточному відхиленню; інтегральна – усуває статичну похибку шляхом накопичення відхилення в часі; диференційна – реагує на швидкість зміни похибки, демпфуючи коливання та зменшуючи перерегулювання.

Для реалізації на мікроконтролері неперервний закон дискретизується за фіксованого кроку обчислення T . Інтеграл замінюється сумою, а похідна – скінченною різницею, унаслідок чого отримується рекурентний вираз:

$$u[k] = k_P \cdot e[k] + k_I \cdot \sum e[i] + k_D \cdot (y[k-1] - y[k]), \quad (3.6)$$

де k – номер поточного кроку обчислення; $\sum e[i]$ – накопичена сума похибок; $(y[k-1] - y[k])$ – диференційна складова, обчислена за зміною вимірюваної величини, що зменшує чутливість до стрибків уставки.

Програмну реалізацію алгоритму наведено у лістингу 3.5.

```
void computePID(byte ch) {
    input[ch] = sensorVals[activePID.sensor];
    float error = activePID.setpoint - input[ch];
    float dInput = prevInput[ch] - input[ch];
    prevInput[ch] = input[ch];
    output[ch] = error * activePID.kP;           // P-складова
    output[ch] += dInput * activePID.kD;         // D-складова
    integralSum[ch] += error * activePID.kI;     // I-складова
    integralSum[ch] = constrain(integralSum[ch],
                                activePID.minOut, activePID.maxOut);
    output[ch] += integralSum[ch];
    output[ch] = constrain(output[ch],
                            activePID.minOut, activePID.maxOut);
}
```

Лістинг 3.5 – Реалізація дискретного ПІД-регулятора (функція computePID)

Обмеження накопиченої інтегральної суми (constrain) реалізує захист від інтегрального насичення (anti-windup) – явища, за якого тривале відхилення спричиняє надмірне накопичення інтегральної складової та затримку реакції регулятора при поверненні до уставки. Вихідний сигнал також обмежується робочим діапазоном: для ШІМ-каналів це 0–255, для сервоприводів – 0–180°. Виклик регулятора виконується із заданим кроком T функцією checkPID().

Правильне налаштування коефіцієнтів є визначальним для якості регулювання. Прошивка підтримує як ручне, так і автоматичне налаштування. За ручного налаштування спершу за нульових інтегральної та диференційної

складових збільшують пропорційний коефіцієнт до значення, за якого регульована величина впевнено наближається до уставки, залишаючись трохи нижчою (для теплових процесів практичний діапазон k_P становить 12...25); далі поступово збільшують інтегральний коефіцієнт (зазвичай 0,1...0,7) до усунення статичної похибки; диференційну складову для повільних теплових процесів зазвичай залишають нульовою.

Автоматичне налаштування реалізує метод релейного зворотного зв'язку Зіглера–Нікольса. Регулятор тимчасово замінюється релейним елементом, що збуджує в системі стійкі автоколивання, за амплітудою A та періодом T_u яких визначають критичний коефіцієнт підсилення та обчислюють шукані коефіцієнти за виразами:

$$k_P = 0,6 \cdot K_u, \text{ де } K_u = 4 \cdot d / (\pi \cdot A); \quad (3.7)$$

$$k_I = 1,2 \cdot K_u / T_u; \quad (3.8)$$

$$k_D = 0,075 \cdot K_u \cdot T_u, \quad (3.9)$$

де d – амплітуда релейного впливу; A – амплітуда автоколивань; T_u – період автоколивань; K_u – критичний коефіцієнт підсилення.

Автоматичне налаштування суттєво спрощує введення системи в експлуатацію, звільняючи оператора від трудомісткого ручного підбору параметрів.

3.8 Алгоритм зчитування датчиків

Зчитування всіх датчиків виконується функцією `getAllData()`, що заповнює масив поточних значень `sensorVals`, який далі використовується режимами `Sensor` і `PID` та для відображення. Функція послідовно опитує датчик `BME280` (температура й вологість повітря), аналогові датчики `SENS1–SENS4` з усередненням, а за відповідної конфігурації – цифрові датчики `DS18B20` або термістори. Фрагмент функції наведено у лістингу 3.6.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		


```

void getAllData() {
    sensorVals[0] = bme.readTemperature();           // t повітря
    sensorVals[1] = constrain(bme.readHumidity(), 0, 99);
    sensorVals[2] = analogReadAverage(SENS_1) / 4;
    sensorVals[3] = analogReadAverage(SENS_2) / 4;
    sensorVals[4] = analogReadAverage(SENS_3) / 4;
    sensorVals[5] = analogReadAverage(SENS_4) / 4;
    #if (DALLAS_SENS1 == 1)
        sensorVals[2] = dallas.getTemp();           // t ґрунту
        dallas.requestTemp();
    #endif
    #if (THERM1 == 1)
        sensorVals[2] = getThermTemp(analogReadAverage(SENS_1), BETA1);
    #endif
}

```

Лістинг 3.6 – Фрагмент функції зчитування датчиків getAllData()

Для аналогового вимірювання температури термістором із від'ємним температурним коефіцієнтом застосовується рівняння Стейнхарта–Харта, що описує нелінійну залежність опору від температури. У спрощеній двопараметричній формі температура визначається виразами:

$$1/T = 1/T_0 + (1/B) \cdot \ln(R/R_0); \quad (3.10)$$

$$t = 1 / (1/T_0 + (1/B) \cdot \ln(R/R_0)) - 273,15, \quad (3.11)$$

де T – абсолютна температура, К; $T_0 = 298,15$ К – температура калібрування (25 °С); B – коефіцієнт термістора (типово 3000...4000 К); R – виміряний опір термістора; $R_0 = 10$ кОм – опір за температури калібрування. Опір термістора R обчислюється за показанням АЦП через співвідношення подільника напруги.

3.9 Оптимізація використання флеш-пам'яті

Повна збірка прошивки з усіма ввімкненими функціями займає близько 30 КБ флеш-пам'яті з наявних 32 КБ, з яких 2 КБ зайнято завантажувачем. Це залишає обмежений резерв, тому передбачено механізми оптимізації використання пам'яті. Першим є модульна конфігурація: невикористовувані функції вимикаються директивами умовної компіляції на початку коду, причому кожен вимкнений модуль вивільняє від кількох сотень до двох тисяч байтів

пам'яті програм. Перелік основних конфігурованих модулів та обсяг вивільнюваної пам'яті наведено в таблиці 3.2.

Другим механізмом є застосування полегшеного завантажувача OptiBoot, що займає лише 512 байтів замість 2048 байтів стандартного завантажувача Arduino, вивільняючи додаткові 1,5 КБ флеш-пам'яті (близько 4,7 % загального обсягу). Третім засобом є розміщення константних текстових рядків інтерфейсу безпосередньо у флеш-пам'яті за допомогою макроса F(), що економить дефіцитну оперативну пам'ять SRAM, не завантажуючи рядки до неї під час виконання.

Таблиця 3.2 – Модулі прошивки, що вимикаються для економії пам'яті

Модуль	Директива	Вивільнення (байт)
Підтримка графіків	USE_PLOTS 0	≈ 2000
ПІД-регулятор	USE_PID 0	≈ 1500
Плавність сервоприводів	SMOOTH_SERVO 0	≈ 500
Режим світанку	USE_DAWN 0	≈ 400
Датчик BME280	USE_BME 0	≈ 600
Датчик DS18B20	DALLAS_SENS1 0	≈ 400
Датчик DHT11/DHT22	DHT_SENS2 0	≈ 300

Тестування системи проводилося у два етапи. На першому етапі коректність алгоритмів перевірялася в онлайн-симуляторі схем на базі Arduino, що дозволило відлагодити логіку без фізичного обладнання. На другому етапі систему зібрано на макетній платі та послідовно перевірено: достовірність показань датчиків, коректність роботи таймерних режимів, якість ПІД-регулювання за графіками на дисплеї, а також збереження й відновлення конфігурації після перезавантаження. Результати тестування підтвердили відповідність системи поставленим вимогам.

Висновки за розділом 3

У третьому розділі розроблено та оптимізовано програмне забезпечення мікропроцесорної системи керування на базі платформи Arduino Nano. В основу

архітектури прошивки покладено принцип псевдобагатозадачності з кооперативним розподілом обчислювального часу. Це дозволило реалізувати паралельне виконання критичних процесів – безперервного опитування датчиків, обробки інтерфейсу та керування навантаженнями – без використання складних операційних систем і блокування основного циклу програми. Для гарантування високої відмовостійкості та тривалої автономної роботи без нагляду оператора впроваджено систему автоматичного відновлення на базі апаратного сторожового таймера (Watchdog Timer).

Спроектовано інтуїтивно зрозумілий та функціональний людино-машинний інтерфейс (НМІ), логіку якого побудовано за моделлю скінченного автомата. Завдяки обробці сигналів інкрементного енкодера через апаратні переривання з програмним фільтром брязкоту контактів досягнуто миттєвої реакції на команди. Ієрархічна структура меню дозволяє здійснювати глибоке налаштування системи, переглядати графіки телеметрії та виконувати ручне керування механізмами безпосередньо з пристроєм.

Особливу увагу приділено розробці математичного апарату та алгоритмів керування. Програмно реалізовано шість режимів роботи каналів, серед яких базові таймерні алгоритми, двопозиційне регулювання із налаштуванням гістерезисом та складний пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор. Дискретна реалізація ПІД-закону доповнена механізмом захисту від інтегрального насичення (anti-windup) та алгоритмом автоматичного підбору коефіцієнтів (автотюнінгом) за методом Зіглера–Нікольса, що дозволяє прецизійно підтримувати задані параметри мікроклімату в умовах значної теплової інерційності теплиці.

Успішно вирішено комплекс задач із програмної обробки сигналів із цифрових і аналогових сенсорів, зокрема реалізовано нелінійний перерахунок показань NTC-термісторів. Для забезпечення максимального ресурсу енергонезалежної пам'яті (EEPROM) застосовано алгоритм відкладеного запису. Завдяки використанню оптимізованого завантажувача OptiBoot, модульної умовної компіляції та перенесенню константних даних у пам'ять програм

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

удалося вмістити розширений функціонал у жорстко обмежений обсяг флеш-пам'яті (32 КБ). Комплексне тестування на етапах симуляції та апаратного макетування підтвердило повну працездатність і стабільність розробленого програмного забезпечення.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Нікіфорчук В.С.			ОХОРОНА ПРАЦІ	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Козлов М.О.						
Консульт.								
Н. контроль		Грешнов А.Ю.				НУК ім. ам. Макарова		
Зав. каф.								

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є системою правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності людини у процесі трудової діяльності. Правовою основою організації охорони праці в Україні є Закон України «Про охорону праці» [21], а також чинна система державних стандартів та санітарних норм. Цей розділ присвячено аналізу умов праці й розробленню заходів безпеки під час проектування, складання та налагодження мікропроцесорної системи керування мікрокліматом теплиці.

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці розробника

Робоче місце розробника має комбінований характер, оскільки поєднує розумову працю за персональним комп'ютером (написання програмного коду, проектування електричних схем та топології друкованих плат) із монтажно-складальними операціями (паяння компонентів, механічне складання прототипу) та роботою з мережевою напругою 220 В під час стендового налагодження виконавчих механізмів.

Відповідно до класифікації шкідливих та небезпечних виробничих чинників згідно з ГОСТ 12.0.003-74 (ДСТУ 12.0.003-74), на розробника під час виконання кваліфікаційної роботи впливають чинники трьох основних груп:

1. Фізичні небезпечні та шкідливі чинники:

- Небезпека ураження електричним струмом: виникає під час роботи з лабораторними блоками живлення, тестування релейних модулів та підключення навантажень до мережі змінного струму 220 В.
- Термічна небезпека: ризик отримання опіків шкірного покриву під час роботи з паяльним обладнанням (температура жала паяльника становить 250...380 °С) та при випадковому торканні нагрітих елементів або розплавленого припою.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Електромагнітне випромінювання: тривалий вплив неіонізуючого випромінювання від монітора, системного блока комп'ютера та вимірювальних приладів.
- Недостатня освітленість робочої зони: робота з дрібними електронними компонентами типу SMD вимагає підвищеної точності, тому брак світла може призвести до помилок монтажу та погіршення зору.

2. Хімічні шкідливі чинники:

- Забруднення повітря робочої зони: під час паяльних робіт у повітря виділяються токсичні аерозолі, що містять пари свинцю (у разі використання свинцевмісних припоїв типу ПОС-61), а також продукти термодеструкції каніфолі та активних флюсів, які можуть подразнювати дихальні шляхи та слизові оболонки.

3. Психофізіологічні шкідливі чинники:

- Перенапруження зорового аналізатора: виникає внаслідок тривалої безперервної концентрації уваги на екрані монітора під час написання коду або трасування плати, а також при фокусуванні на дрібних деталях під час паяння.
- Статичне робоче навантаження (гіподинамія): тривале перебування у вимушеній сидячій позі призводить до застою крові в органах малого таза, перенапруження м'язів спини та шийного відділу хребта.
- Нервово-емоційне напруження: зумовлене високим рівнем відповідальності за працездатність системи, необхідністю пошуку та усунення складних програмних і апаратних помилок.

Вимоги до мікроклімату та освітлення:

Для мінімізації впливу зазначених чинників робоче місце має відповідати санітарним нормам. Робота розробника належить до категорії Ia (легка фізична праця). Згідно з ДСН 3.3.6.042-99, параметри мікроклімату в приміщенні мають бути такими:

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Температура повітря: 22...24 °C у холодний період року та 23...25 °C у теплий.
- Відносна вологість повітря: в межах 40...60 %.
- Швидкість руху повітря: не більше ніж 0,1 м/с.

Освітленість робочої поверхні відіграє критичну роль. Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 для робіт високої точності (розмір об'єктів розрізнення 0,3...0,5 мм) комбіноване освітлення має забезпечувати не менше 300 лк (люкс) на поверхні столу, при цьому рекомендовано використання місцевого безтіньового освітлення робочої зони.

4.2 Вимоги безпеки та гігієни праці під час роботи з паяльним обладнанням

Паяльні роботи є ключовим і водночас найбільш травмонебезпечним етапом фізичного макетування та складання апаратної частини комплексу. Виконання монтажу електронних компонентів на друковану плату вимагає суворого дотримання інструкцій з охорони праці, оскільки супроводжується комплексним впливом небезпечних чинників: високих температур, шкідливих хімічних випарів та електричного струму. Комплекс заходів безпеки поділяється на такі організаційно-технічні етапи:

1. Підготовка робочого місця та обладнання

- Перед початком монтажних робіт необхідно провести візуальний огляд паяльної станції: перевірити цілісність мережевого кабелю, штепсельної вилки, корпусу блоку керування та термостійкої ізоляції низьковольтного проводу самого паяльника.
- Робоча зона має бути повністю звільнена від сторонніх предметів, особливо від горючих матеріалів, паперу та відкритих ємностей із розчинниками (наприклад, ізопропіловим спиртом чи ацетоном, що використовуються для промивання плат).

- Паяльник під час нагрівання та в перервах між операціями повинен розміщуватися виключно на спеціальній вогнетривкій підставці. Забороняється залишати ввімкнене обладнання без нагляду.

2. Захист від статичної електрики (ESD-захист)

- Оскільки мікроконтролер ATmega328P та інші КМОП-структури (CMOS) комплексу є вкрай чутливими до електростатичного розряду (ESD), паяльна станція повинна мати надійне заземлення корпусу та самого жала.
- Розробнику рекомендовано використовувати антистатичний браслет, підключений до контуру заземлення через струмообмежувальний резистор номіналом 1 МОм (для запобігання ураженню мережевим струмом), а всі операції з мікросхемами виконувати на струмопровідному антистатичному килимку.

3. Температурні режими та правила монтажу

- Температуру жала встановлюють чітко відповідно до фізико-хімічних властивостей застосовуваного припою: для екологічних безсвинцевих сплавів (наприклад, SAC305) робоча температура становить 350...380 °C, для традиційних свинцевмісних (ПОС-61) – 280...320 °C.
- Неприпустимим є надмірне перегрівання жала, оскільки це призводить до інтенсивного розбризкування металу, термічного розкладання флюсу з виділенням підвищеної кількості їдкого диму, а також до пошкодження (відшарування) мідних полігонів друкованої плати.
- Категорично забороняється струшувати надлишки розплавленого припою з жала рухом руки; для очищення слід використовувати лише спеціальну целюлозну губку, змочену водою, або губку з латунної стружки.

4. Хімічна безпека, вентиляція та засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

- Паяння виконують виключно в приміщенні з увімкненою ефективною загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією. Для локального відведення шкідливих аерозолів та парів флюсу безпосередньо із зони

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

паяння обов'язковим є застосування місцевого витяжного пристрою (дим-абсорбера з вугільним фільтром).

- Перевагу слід надавати сучасним безпечним безвідмивним флюсам (класу No-Clean) із нульовим або низьким вмістом активних галогенів.
- Для запобігання термічним та хімічним опікам очей мікрокраплями киплячого флюсу розробник має використовувати захисні окуляри.

5. Санітарно-гігієнічні вимоги

- Під час виконання робіт забороняється вживати їжу, напої або палити на робочому місці, оскільки це створює прямий ризик потрапляння токсичних сполук (особливо солей важких металів) до шлунково-кишкового тракту.
- Після завершення сеансу радіомонтажних робіт необхідно знеструмити обладнання, прибрати робоче місце, ретельно вимити руки та обличчя теплою водою з милом, а приміщення лабораторії – додатково провітрити.

4.3 Електробезпека при роботі з мережею 220 В

Налагодження силової частини комплексу керування мікрокліматом, зокрема підключення нагрівальних елементів, вентиляторів та систем освітлення, передбачає безпосередню роботу з мережевою напругою 220 В змінного струму. Робота з такими параметрами становить підвищену загрозу для життя та здоров'я розробника. Згідно з фізіологічною дією на організм людини, змінний струм промислової частоти 50 Гц є найбільш небезпечним: струм силою 10–15 мА вже є невідпускаючим і викликає непереборні судоми м'язів, а струм понад 100 мА призводить до фібриляції серця та є летальним. Ситуація ускладнюється тим, що цільовим об'єктом впровадження є теплиця – приміщення з підвищеною вологістю, що за класифікацією Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) належить до особливо небезпечних. Тому навіть на етапі лабораторного стендового макетування дотримання правил електробезпеки є критично важливим.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комплекс організаційно-технічних заходів безпеки розпочинається з безумовного правила: перед будь-яким під'єднанням, від'єднанням чи зміною конфігурації силових кіл необхідно гарантовано зняти напругу живлення. Для цього забезпечується видимий розрив електричного кола шляхом витягування штепсельної вилки з розетки. Категорично забороняється виконувати будь-які монтажні операції або торкатися елементів друкованої плати під напругою. Перед початком контактних робіт обов'язковою є перевірка відсутності фазної напруги на струмопровідних частинах за допомогою справного показчика напруги або цифрового мультиметра, оскільки після вимкнення можливе залишкове збереження небезпечного заряду на конденсаторах.

Під час фізичного монтажу пристрою застосовуються суворі вимоги до ізоляції та просторового розміщення провідників. Усі силові лінії надійно ізолюються та прокладаються окремими трасами, просторово віддаленими від низьковольтних сигнальних кіл. Для підключення багатодротових гнучких кабелів до релейних модулів в обов'язковому порядку використовуються трубчасті кабельні наконечники (НШВІ), які опресовуються спеціальним інструментом. Це запобігає відшаруванню окремих мідних жил, які можуть спричинити коротке замикання або пробій на сусідні низьковольтні контакти мікроконтролера. Будь-які з'єднання мережевих дротів виконуються виключно за допомогою гвинтових або пружинних клемних колодок із належним ступенем захисту оболонки; використання неізольованих скруток є категорично неприпустимим.

Особлива увага приділяється топології самої друкованої плати розроблюваного пристрою. Відповідно до стандартів проєктування та наведених раніше розрахунків, мінімальна відстань (кліренс) між провідниками з напругою 220 В та слабкострумовими сигнальними колами становить не менше 2 мм. Крім того, під електромеханічними реле на платі передбачено фрезерування ізоляційних щілин. Це технологічне рішення додатково збільшує шлях струму витоку поверхнею діелектрика та гарантує надійну гальванічну розв'язку силової та керувальної частин навіть за умов можливого осідання конденсату. У разі

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виникнення аварійної ситуації або ураження струмом необхідно негайно знеструмити електроустановку загальним вимикачем лабораторії, після чого надати постраждалому першу долікарську допомогу.

4.4 Електробезпека під час роботи з низьковольтними колами

Хоча кола живлення логічної частини мікропроцесорної системи напругою 5 В та керування виконавчими механізмами напругою 12 В постійного струму не становлять безпосередньої загрози життю людини через ураження електричним струмом, нехтування правилами безпеки при роботі з ними є неприпустимим. Основна небезпека низьковольтних кіл полягає у можливості виникнення коротких замикань, оскільки сучасні імпульсні блоки живлення здатні віддавати значні струми. У разі короткого замикання енергія миттєво виділяється у вигляді тепла, що може спричинити термічне руйнування електронних компонентів, розплавлення ізоляції провідників та, як наслідок, стати джерелом займання і пожежі. Крім того, недотримання полярності підключення або випадкова подача підвищеної напруги на входи мікроконтролера гарантовано призводять до виходу з ладу вартісної елементної бази.

Для запобігання аварійним ситуаціям під час складання та відлагодження системи застосовується комплекс профілактичних заходів відповідно до вимог державних стандартів, зокрема ДСТУ 7237:2011. Обов'язковою умовою є надійне захисне заземлення металевих корпусів лабораторних джерел живлення, осцилографів та паяльного обладнання для відведення наведених потенціалів і статичних зарядів. Перед кожним поданням живлення на макетну чи розроблену друковану плату проводиться ретельний візуальний огляд на предмет відсутності замикань між сусідніми струмопровідними доріжками, перевіряється цілісність ізоляції з'єднувальних провідників. Будь-які маніпуляції з під'єднання або від'єднання периферійних модулів, сенсорів на шинах I²C та 1-Wire, а також перекомутація сигнальних ліній виконуються виключно за повністю знеструмленого пристрою. Це виключає ризик виникнення небезпечних

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перехідних процесів та так званого тиристорного ефекту (latch-up) у мікросхемах.

Лабораторне приміщення, у якому проводиться розроблення комплексу, за умовами електробезпеки класифікується як приміщення без підвищеної небезпеки, оскільки характеризується наявністю сухої неструмопровідної підлоги, нормальним рівнем вологості та відсутністю хімічно активного середовища. Однак, зважаючи на те, що низьковольтна частина комплексу конструктивно та схемотехнічно поєднана з блоком релейної комутації мережевої напруги 220 В, загальний рівень небезпеки робочого місця суттєво зростає. У зв'язку з цим дотримання загальних правил електробезпеки, використання інструменту з ізольованими ручками та забезпечення надійної гальванічної розв'язки між високовольтною і низьковольтною частинами схеми є категорично обов'язковим незалежно від початкової категорії приміщення.

4.5 Пожежна безпека

Пожежна безпека під час розроблення, макетування та стендового налагодження електронних систем є одним із пріоритетних напрямів охорони праці. Основні причини виникнення пожежонебезпечних ситуацій у лабораторії радіоелектроніки включають: струми короткого замикання в силовій або слабкострумівій частинах схеми, теплове перевантаження електронних компонентів та друкованих провідників плати внаслідок перевищення допустимих струмів, перегрів електромеханічних реле через неякісний контакт у клемниках, а також порушення правил експлуатації термоінструменту. Додатковим фактором ризику є інтенсивне використання легкозаймистих рідин, зокрема ізопропілового спирту або спеціальних хімічних очисників, що застосовуються для змивання залишків флюсу з поверхонь друкованих плат.

Для мінімізації пожежних ризиків на етапі проєктування та фізичного складання апаратно-програмного комплексу впроваджено суворий комплекс превентивних заходів. Усі силові з'єднання кіл 220 В виконуються виключно за допомогою надійних гвинтових клем із обов'язковим попереднім опресуванням

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багатодротових жил трубчастими наконечниками, що радикально знижує перехідний опір та запобігає іскрінню чи перегріванню контактів. Робоче місце розробника утримується в чистоті, систематично звільняється від паперового сміття та обрізків полімерної ізоляції. Легкозаймисті речовини зберігаються в мінімально необхідних об'ємах у щільно закритій, стійкій до перекидання тарі на безпечній відстані від джерел тепла. Увімкнене паяльне обладнання під час пауз у роботі розміщується виключно на спеціальних термостійких металевих підставках, що унеможлиблює його контакт із горючими поверхнями.

Відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України та Правил пожежної безпеки в Україні, лабораторне приміщення в обов'язковому порядку оснащується сертифікованими первинними засобами пожежогашіння. Для ліквідації локальних загорянь електронного обладнання, що перебуває під напругою до 1000 В, дозволяється застосовувати виключно вуглекислотні (наприклад, ВВК-2, ВВК-5) або спеціальні порошкові вогнегасники. Використання води, хімічно-пінних чи повітряно-пінних вогнегасників є категорично забороненим через високу електропровідність вогнегасної речовини та пряму загрозу смертельного ураження розробника струмом. У разі виникнення пожежі алгоритм дій вимагає негайно знеструмити обладнання за допомогою загального лабораторного автомата захисту, викликати пожежно-рятувальну службу за номером 101, сповістити керівництво та розпочати гасіння наявними засобами. За неможливості швидкої локалізації осередку займання розробник зобов'язаний негайно евакуюватися з приміщення згідно із затвердженим планом евакуації будівлі.

Висновки за розділом 4

У четвертому розділі виконано аналіз умов праці та розроблено комплекс заходів з охорони праці, техніки безпеки й пожежної безпеки під час проєктування, монтажу та налагодження мікропроцесорної системи керування мікрокліматом теплиці.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ідентифіковано основні шкідливі та небезпечні виробничі чинники: ризик ураження струмом (220 В), термічні опіки, токсичний вплив парів флюсу, а також зорове й психофізіологічне перенапруження. Для мінімізації їх впливу визначено необхідні санітарно-гігієнічні параметри робочого місця згідно з ДСН 3.3.6.042-99 (мікроклімат) та ДБН В.2.5-28:2018 (освітлення).

Сформовано організаційно-технічні вимоги для безпечного виконання монтажних робіт, зокрема щодо вентиляції та антистатичного захисту. Головний акцент зроблено на електробезпеці (ДСТУ 7237:2011) під час роботи з мережею 220 В: обґрунтовано обов'язкове фізичне знеструмлення обладнання перед комутацією, використання кабельних наконечників, а також надійне просторове розділення силових і сигнальних ліній на рівні топології друкованої плати.

Визначено базові заходи пожежної безпеки, що включають профілактику коротких замикань, безпечне поводження з термоінструментом і легкозаймистими речовинами, а також регламентують використання виключно вуглекислотних або порошкових вогнегасників.

Дотримання розробленого комплексу заходів, який спирається на Закон України «Про охорону праці», гарантує безпеку життєдіяльності розробника, зберігає його працездатність та зводить до мінімуму ризики виникнення аварійних ситуацій.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ.РЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне прикладне завдання – розроблено автономну мікропроцесорну систему управління мікрокліматом теплиці на базі мікроконтролера ATmega328P. Робота охоплює повний цикл проєктування: від аналізу предметної галузі до програмної реалізації та розробки друкованої плати. За результатами виконання роботи зроблено такі висновки:

1. На основі аналізу агробіологічних вимог задачу декомпоновано на чотири контури регулювання (полив, освітлення, провітрювання, обігрів). Огляд наявних рішень підтвердив доцільність створення власного апаратно-програмного комплексу, що забезпечує оптимальний баланс широкої функціональності та доступної вартості для малих господарств.

2. Обґрунтовано та сформовано сенсорну базу: цифровий датчик BME280 (параметри повітря), датчики DS18B20 (температура ґрунту), аналогові ємнісні вологоміри з імпульсним живленням (для захисту від корозії) та високоточний модуль реального часу DS3231.

3. Спроектовано апаратну архітектуру, яка керує сімома релейними каналами, двома сервоприводами та лінійним приводом. Розраховано та впроваджено апаратний захист від комутаційних завад (RC-снабери, зворотні діоди). У середовищі EasyEDA розроблено принципову схему та двошарову друковану плату згідно зі стандартами IPC-2221.

4. Створено програмне забезпечення на основі кооперативної псевдобагатозадачності. Реалізовано шість режимів керування, дискретний ПІД-регулятор із функцією автоналаштування за Зіглером–Нікольсом та алгоритм відкладеного збереження конфігурації в EEPROM, що гарантує відновлення роботи після перебоїв живлення.

5. Розроблено багаторівневий людино-машинний інтерфейс на базі дисплея LCD2004. Керування здійснюється єдиним інкрементним енкодером, що

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє виконувати глибоке налаштування, моніторинг телеметрії та ручне керування всіма механізмами безпосередньо з пристрою.

6. Виконано аналіз умов праці та розроблено комплекс заходів з охорони праці, електробезпеки (зокрема під час роботи з мережею 220 В) і пожежної безпеки, дотримання яких зводить до мінімуму ризику травматизму й аварійних ситуацій.

Практична цінність одержаних результатів полягає у створенні надійного, автономного та економічно ефективного комплексу, готового до експлуатації. Перспективними напрямками розвитку системи є інтеграція бездротового модуля для дистанційного диспетчерського моніторингу та підключення датчиків CO₂ для керування газовим складом середовища.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гіль Л. С., Пашковський А.І., Суліма Л.Т. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Ч.1. Закритий ґрунт. Навчальний посібник. – Вінниця: Нова Книга 2008 – 368 с. ISBN 978–966–382–203–7.
2. Болтянська Н.І., Шокарев О.М. Напрями автоматизації технологічних процесів в АПК // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2020. – Вип. 20. – С. 45–58.
3. Гайвер О. GyverControl: універсальний контролер для теплиці. Документація та вихідний код [Електронний ресурс] – 2023. <https://alexgyver.ru/gyvercontrol>
4. Priva Compass Greenhouse Process Computer : Product Documentation [Електронний ресурс]– Режим доступу: <https://www.priva.com/>
5. ATmega328P : 8-bit AVR Microcontroller. Datasheet [Електронний ресурс] / Microchip Technology Inc. – 2020. – URL: <https://ww1.microchip.com>
6. BME280 : Combined humidity and pressure sensor. Datasheet [Електронний ресурс] / Bosch Sensortec GmbH. – 2020. – URL: <https://www.bosch-sensortec.com>
7. DS18B20 : Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Datasheet [Електронний ресурс] / Maxim Integrated. – 2019. – URL: <https://www.analog.com>
8. DS3231 : Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal. Datasheet [Електронний ресурс] / Maxim Integrated. – 2015. – URL: <https://www.analog.com>
9. SRD-05VDC-SL-C : Subminiature Power Relay. Datasheet [Електронний ресурс] / Songle Relay Co. – URL: <http://www.songle.com>
10. HD44780U : Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver. Datasheet [Електронний ресурс] / Hitachi, Ltd. – 1999. – URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. EasyEDA Standard Edition : User Documentation [Електронний ресурс] / EasyEDA Ltd. – 2023. – URL: <https://easyeda.com/Doc/Tutorial>
12. Altium Designer Documentation [Електронний ресурс] / Altium LLC. – 2023. – URL: <https://www.altium.com/documentation>
13. KiCad EDA : Official Documentation [Електронний ресурс] / KiCad. – 2023. – URL: <https://docs.kicad.org>
14. IPC-2221B. Generic Standard on Printed Board Design. – Bannockburn : IPC, 2012. – 100 p.
15. Схемотехніка електронних систем : у 3 кн. Кн. 3. Мікропроцесори та мікроконтролери : підручник / В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін. – 2-ге вид., допов. і переробл. – Київ : Вища шк., 2004. – 399 с. : іл.
16. Åström K. J. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers / K. J. Åström, R. M. Murray. – Princeton : Princeton University Press, 2008. – 408 p.
17. Arduino Language Reference [Електронний ресурс] / Arduino S.r.l. – 2023. – URL: <https://www.arduino.cc/reference>
18. Wokwi : Online Simulator for Arduino and ESP32 [Електронний ресурс]. – 2023. – URL: <https://wokwi.com>
19. PCF8574 : Remote 8-Bit I/O Expander for I²C Bus. Datasheet [Електронний ресурс] / Texas Instruments. – 2015. – URL: <https://www.ti.com>
20. Ziegler J. G. Optimum Settings for Automatic Controllers / J. G. Ziegler, N. B. Nichols // Transactions of the ASME. – 1942. – Vol. 64. – P. 759–768.
21. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII // Відомості Верховної Ради України. – 1992. – № 49. – Ст. 668.
22. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. – Київ : Держспоживстандарт України, 2012. – 18 с.
23. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 133 с.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Правила улаштування електроустановок. – 5-те вид., переробл. і допов. – Харків : Форт, 2017. – 760 с.
25. Gimenez T. Greenhouse Microclimate Automation Using Low-Cost Microcontrollers / T. Gimenez, A. Ferreira // International Journal of Smart Agriculture. – 2021. – Vol. 3, № 2. – P. 45–58.
26. Steinhart J. S. Calibration curves for thermistors / J. S. Steinhart, S. R. Hart // Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts. – 1968. – Vol. 15, № 4. – P. 497–503.

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А. Принципова електрична схема контролера мікроклімату теплиці

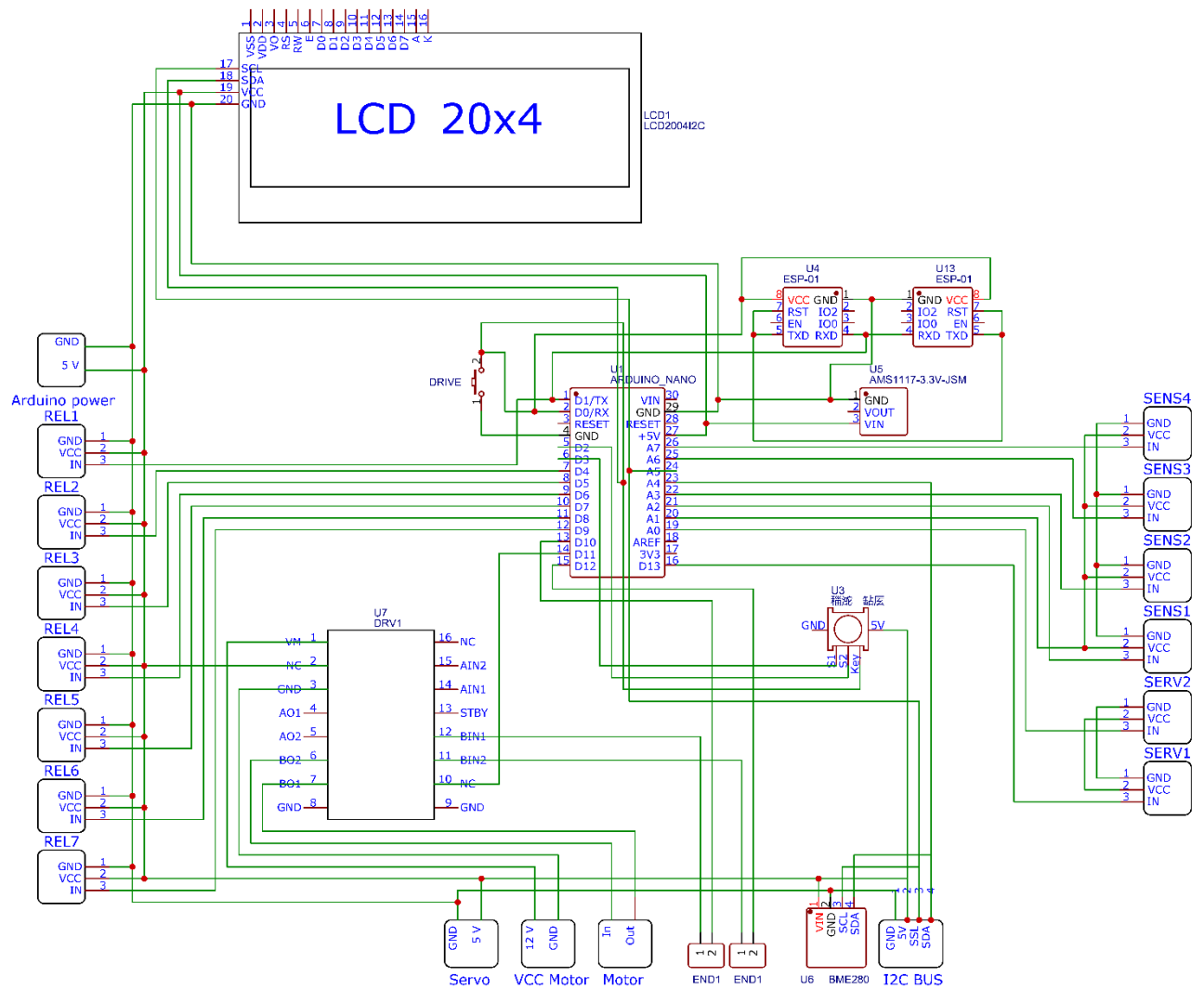


Рисунок А.1 – Принципова електрична схема контролера мікроклімату теплиці

ДОДАТОК Б. Друкована плата контролера мікроклімату теплиці

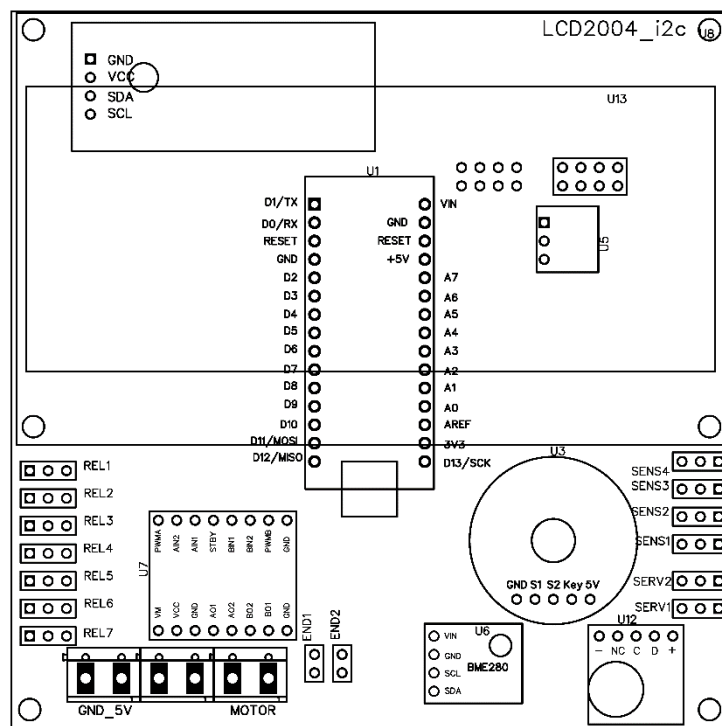


Рисунок Б.1 – Розміщення компонентів на друкованій платі

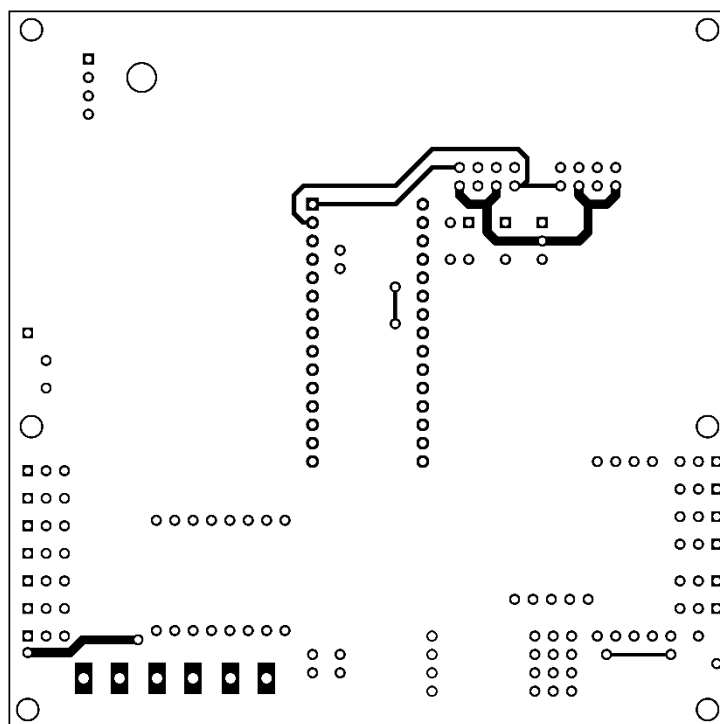


Рисунок Б.2 – Трасування провідників верхнього шару друкованої плати

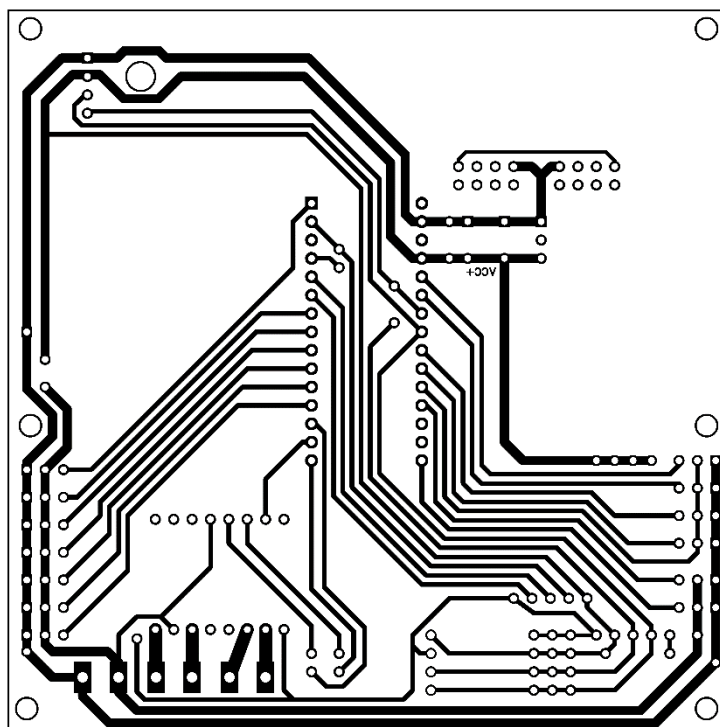


Рисунок Б.3 – Трасування провідників нижнього шару друкованої плати

					13.ДР.123.4651.06.ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК В. Блок-схеми алгоритмів роботи програми

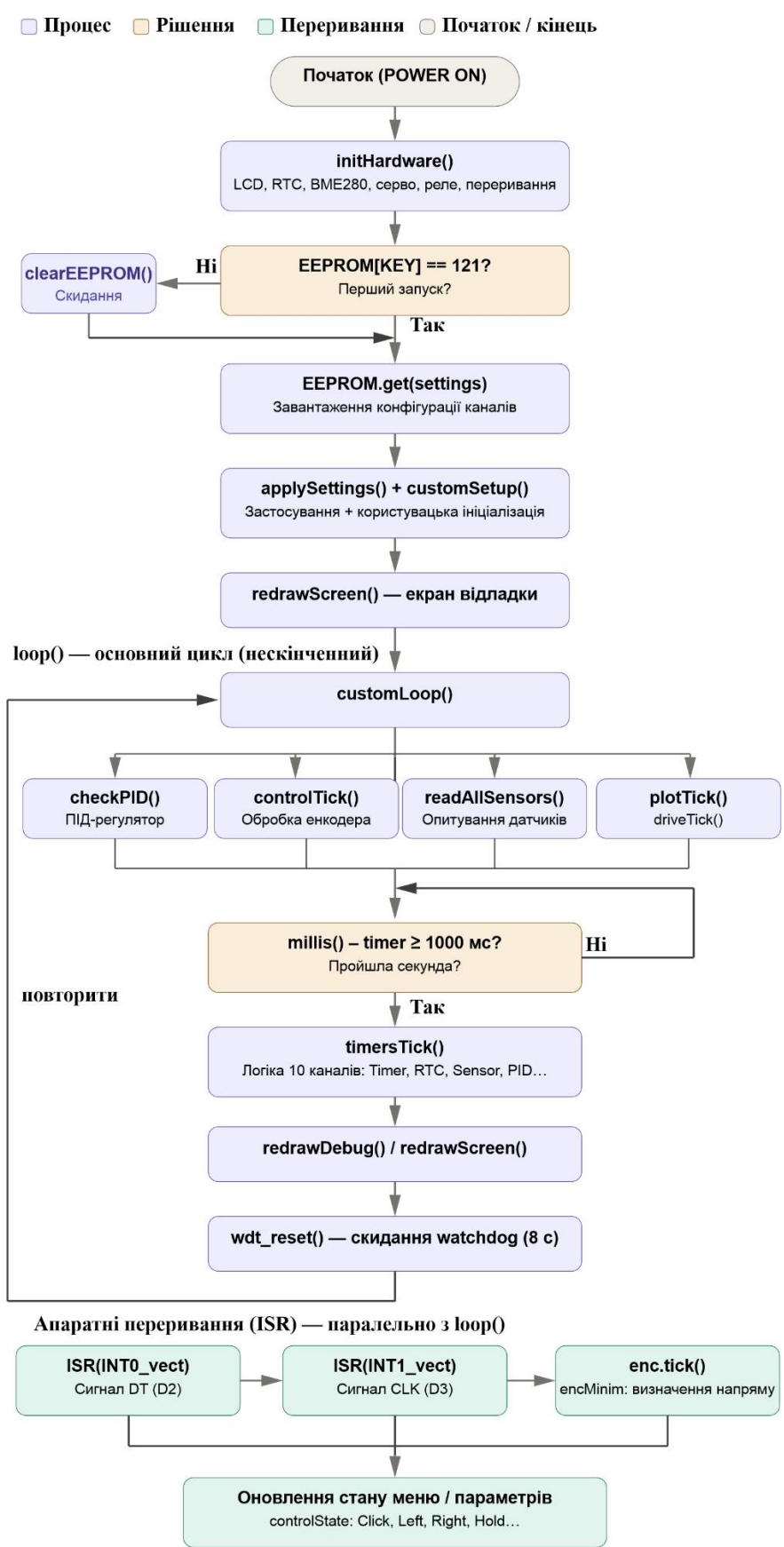


Рисунок В.1 – Блок-схема загального алгоритму роботи програми

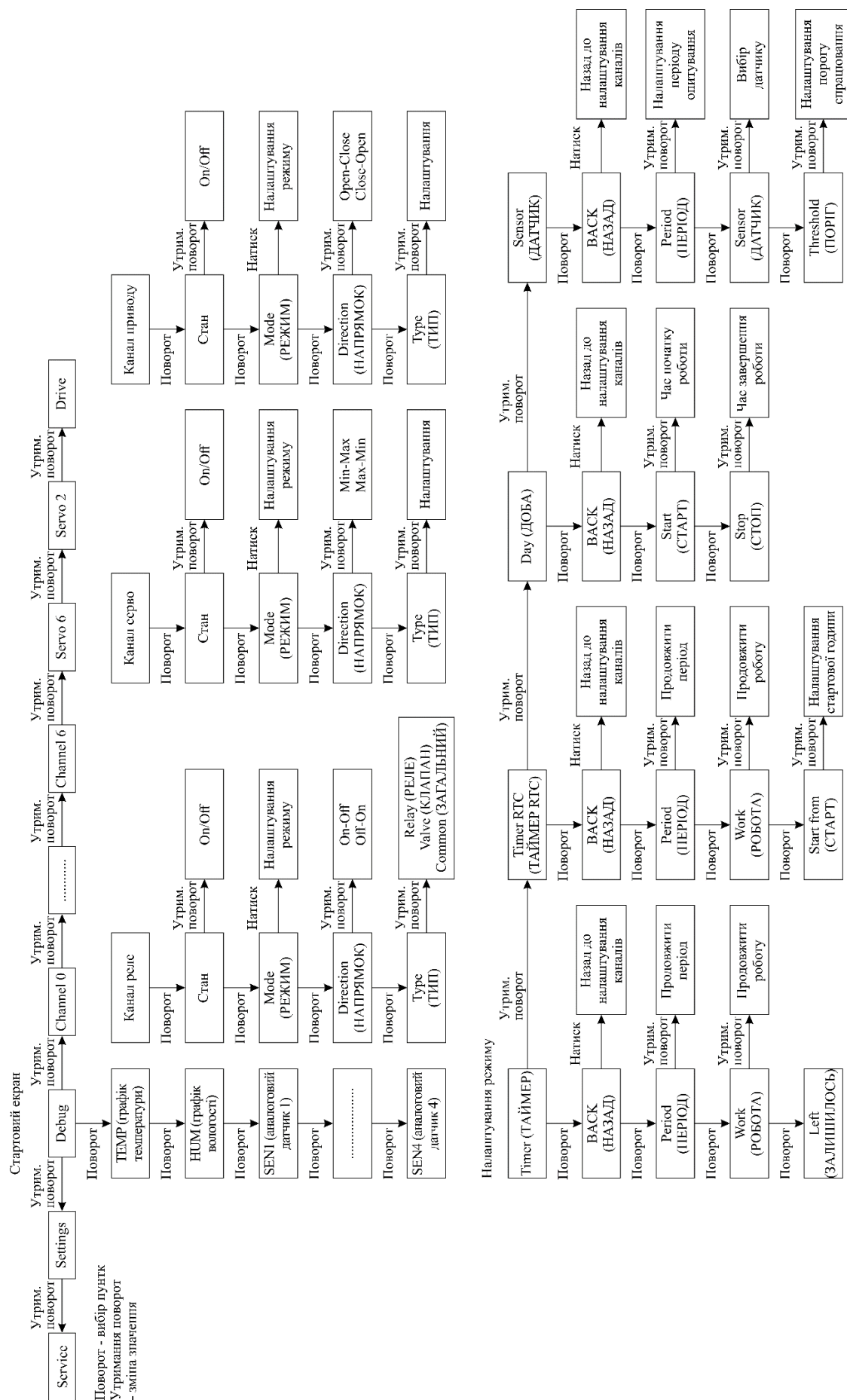


Рисунок В.2 – Блок-схема алгоритму навігації меню

ДОДАТОК Г. Лістинг ключових модулів коду прошивки

Г.1. Визначення призначення виводів та карта енергонезалежної пам'яті (файл a1_data.h):

```
#define SW          0    // кнопка енкодера
#define RELAY_0     1    // реле 0 (ШИМ-реле)
#define DT          2    // еncoder DT (INT0)
#define CLK         3    // еncoder CLK (INT1)
#define RELAY_1     4    // реле 1 (ШИМ-реле)
#define RELAY_2     5    // реле 2 (ШИМ)
#define RELAY_3     6    // реле 3 (ШИМ)
#define RELAY_4     7    // реле 4
#define RELAY_5     8    // реле 5
#define RELAY_6     9    // реле 6
#define DRV_SIGNAL1 10   // напрям приводу 1
#define DRV_PWM     11   // ШИМ приводу (31,4 кГц)
#define DRV_SIGNAL2 12   // напрям приводу 2
#define SERVO_0     13   // сервопривод 1
#define SERVO_1     A0   // сервопривод 2
#define SENS_VCC    A1   // живлення датчиків
#define SENS_1      A2   // аналог / Dallas / термістор
#define SENS_2      A3   // аналог / термістор
#define SENS_3      A6   // аналог / термістор
#define SENS_4      A7   // аналог / термістор

#define EEPR_KEY_ADDR 1022 // адреса ключа ініціалізації
#define EEPR_KEY     121   // значення ключа
#define EEPR_CH       0    // канали (320 байт)
#define EEPR_PID      320   // ПІД (100 байт)
#define EEPR_SETTINGS 502   // налаштування системи
#define EEPR_PLOT     524   // збережені графіки
```

Г.2. Зчитування аналогового датчика з усередненням:

```
int analogReadAverage(byte pin) {
    for (byte i = 0; i < 10; i++) analogRead(pin); // стабілізація
    int sum = 0;
    for (byte i = 0; i < 8; i++) sum += analogRead(pin);
    return sum / 8;
}
```

Г.3. Перетворення сигналу термістора за рівнянням Стейнхарта–Харта:

```
float getThermTemp(int raw, int B) {
    float R = RESIST_10K / ((float)1024 / raw - 1.0);
    R = R / RESIST_BASE; // R / R0
    R = log(R) / B; // (1/B)*ln(R/R0)
    R += 1.0 / (TEMP_BASE + 273.15); // + 1/T0
    return 1.0 / R - 273.15; // T(K) - 273.15
}
```

Г.4. Реалізація дискретного ПІД-регулятора:

```
void computePID(byte ch) {
    input[ch] = sensorVals[activePID.sensor];
    float error = activePID.setpoint - input[ch];
    float dInput = prevInput[ch] - input[ch];
    prevInput[ch] = input[ch];
    output[ch] = error * activePID.kP;           // P
    output[ch] += dInput * activePID.kD;         // D
    integralSum[ch] += error * activePID.kI;     // I
    integralSum[ch] = constrain(integralSum[ch],
                                activePID.minOut, activePID.maxOut);
    output[ch] += integralSum[ch];
    output[ch] = constrain(output[ch],
                            activePID.minOut, activePID.maxOut);
}
```

Г.5. Робота лінійного привода (driveTick):

```
#if (USE_DRIVE == 1)
void driveTick() {
    channelsStruct temp = loadChannel(9); // канал привода
    if (temp.state || serviceFlag || manualControl) {
        if (driveState == 1) {
            driveState = 2;
            driveTimer = millis();
            boolean thisDirection;
            if (temp.mode != 4) {
                thisDirection = channelStates[9];
            } else {
                // ПІД режим: напрям залежить від знаку виходу
                thisDirection = (pwmVal[6] > 0) ?
                    temp.direction : !temp.direction;
            }
            // виставляємо напрям H-моста
            if (thisDirection) {
                digitalWrite(DRV_SIGNAL1, !DRIVER_LEVEL);
                digitalWrite(DRV_SIGNAL2, DRIVER_LEVEL);
            } else {
                digitalWrite(DRV_SIGNAL1, DRIVER_LEVEL);
                digitalWrite(DRV_SIGNAL2, !DRIVER_LEVEL);
            }
        }
        // зупинка після закінчення таймауту
        if (driveState == 2 &&
            millis() - driveTimer >= settings.driveTimeout * 100L) {
            driveState = 0;
            // зупинка мотора
            digitalWrite(DRV_SIGNAL1, DRIVER_LEVEL);
            digitalWrite(DRV_SIGNAL2, DRIVER_LEVEL);
        }
    }
}
#endif
```