

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ЦИФРОВІ УНІВЕРСАЛЬНІ РЕГУЛЯТОРИ ТЕМПЕРАТУРИ:
ПРОГРАМУВАННЯ ТА СХЕМНІ РІШЕННЯ**

спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр. ЕП.м-12

О.О. Панчошний

Науковий керівник

канд. фіз.-мат. наук, доцент

І.М. Пазуха

Завідувач кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Суми 2022

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ
І.Ю. Проценко
«05» грудня 2022 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Панчошного Олександра Олеговича

Тема роботи **Цифрові універсальні регулятори температури:
програмування та схемні рішення**

затверджена наказом по університету від «14» листопада 2022 р., № 1067-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 20 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета) Електронні інформаційні системи зараз не є чимось особливим чи невідомим. Вони з кожним роком інтегруються в людське повсякденне життя у вигляді різноманітних корисних дрібничок. Зручне дистанційне вмикання електроприладів, щоб коли приходив додому, на тебе чекала смачна кава, чи гаряча їжа. Розумне керування світлом, розетками, іншими периферійними пристроями, тощо. Все це підвищує комфорт та дозволяє заощадити деякий час на більш важливі речі, ніж витратити його на очікування. Одним із прикладів використання таких систем є кліматичний або температурний контроль всередині приміщення. Мета даної роботи полягає у розробці універсальної моделі пристрою для регулювання та підтримання температури у межах заданої точки з додатковим введенням гнучкого налаштування щодо можливих відхилень значення від абсолютного, а також визначенні можливих альтернативних рішень щодо виконання й програмування пристроїв даного типу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Фізичні основи передачі тепла при нагріванні об'єкта.
 2. Застосування та схемні рішення цифрових універсальних регуляторів температури.
 3. Принцип вимірювання температури. Розробка виробу й огляд альтернативних рішень.
 4. Програмування універсального регулятора.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
- Слайди № 1-2. Актуальність роботи, мета.
- Слайди № 3-5. Цифрові універсальні регулятори температури.
- Слайди № 7-8. Проєктування універсального регулятора.
- Слайди № 9-12. Програмування універсального регулятора.
- Слайди №13, 14. Висновки, публікації.
6. Дата видачі завдання 02.05.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 09.12.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Проєктування та програмування універсального регулятора температури	до 16.12.2022 р.	<i>вик.</i>
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 20.12.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	21.12.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	28.12.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Панчошний О.О.

Науковий керівник

Пазуха І.М.

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи пристрої, що виконують функції терморегуляторів, застосування й переваги їх використання.

Мета роботи полягає у виготовленні проекту універсального терморегуляційного пристрою, програмуванню мікроконтролерів в якості основного керуючого елемента й огляді альтернативних варіантів виконання приладу.

При виконанні роботи для розробки та створення проектної документації, схем й програм було застосовано програмні середовища SPlan 7.0, Sprint Layout 6, CodeVisionAVR.

У результаті проведених досліджень було проаналізовано можливості застосування приладів та їх вплив на продуктивність й самопочуття людей, ефективність технічних процесів. Виконано схему електричну принципову, блок схему, розводку друкованої плати, прошивку мікроконтролера та складальні креслення друкованих плат.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. У першому розділі наведено фізичні основи передачі тепла й деякі схеми використання приладів. У другому розділі описано види, застосування термостатів, принцип вимірювання й процес розробки приладу. У третьому розділі було розглянуто програмні середовища для створення й програмування лістингу програми для мікроконтролера, а також наведено фрагмент створеного коду.

Робота викладена на 39 сторінках, у тому числі включає 17 рисунків, список цитованої літератури із 27 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕРМОРЕГУЛЯТОР, СХЕМА, РОЗРОБКА, УНІВЕРСАЛЬНИЙ, CodeVisionAVR.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ЦИФРОВІ УНІВЕРСАЛЬНІ РЕГУЛЯТОРИ ТЕМПЕРАТУРИ	6
1.1 Фізичні основи передачі тепла при нагріванні об'єкта	6
1.2 Застосування та схемні рішення цифрових універсальних регуляторів температури	9
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА	17
2.1 Огляд застосування термостатів	17
2.2 Принцип вимірювання температури.....	18
2.3 Розробка виробу й огляд альтернативних рішень.....	21
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМУВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА	28
3.1 Середовище CVAVR	28
3.2 Альтернативні виконання програм.....	33
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	37

ВСТУП

Наразі людство продовжує відкривати нові горизонти щодо потенціалу розвитку сучасних технологій та можливостей реалізації використання плодів технічного прогресу у майже всіх сферах. І хоча базові знання прийнято вважати непорушними, вчені й дослідники знов і знов руйнують стереотипи щодо досягнення піку людських можливостей.

Електронні інформаційні системи зараз не є чимось особливим чи невідомим. Вони з кожним роком інтегруються в людське повсякденне життя у вигляді різноманітних корисних дрібничок. Зручне дистанційне вмикання електроприладів, щоб коли приходив додому, на тебе чекала смачна кава, чи гаряча їжа. Розумне керування світлом, розетками, іншими периферійними пристроями, тощо. Все це підвищує комфорт та дозволяє заощадити деякий час на більш важливі речі, ніж витратити його на очікування. Одним із прикладів використання таких систем є кліматичний або температурний контроль всередині приміщення.

Перспективи вдосконалення даних систем в майбутньому залежать від рівню доступності штучного інтелекту, оскільки сучасні найдосконаліші не мають змоги швидко підлаштовуватись під зміни розпорядку дня користувача, інтуїтивно, не кажучи вже про певні форс-мажорні обставини чи випадки. Також слід зазначити, що оптимізація процесів підтримання комфортного середовища є досить непростю задачею і включає в себе не лише постійне використання нагрівачів або охолоджувачів. Важливо досягти при цьому найбільш можливого рівня енергоефективності й зменшити ризики системи вийти з ладу через постійне використання.

Мета даної роботи полягала у розробці універсальної моделі пристрою для регулювання та підтримання температури у межах заданої точки з додатковим введенням гнучкого налаштування щодо можливих відхилень значення від абсолютного, а також визначенні можливих альтернативних рішень щодо виконання й програмування пристроїв даного типу.

РОЗДІЛ 1

ЦИФРОВІ УНІВЕРСАЛЬНІ РЕГУЛЯТОРИ ТЕМПЕРАТУРИ

1.1 Фізичні основи передачі тепла при нагріванні об'єкта

Перш ніж перейти до аналізу безпосередньо цифрових універсальних регуляторів температури, розглянемо фізичні основи передачі тепла при нагріванні об'єкта. Отже, у процесі нагрівання об'єкту відбувається передача тепла Q_{in} , одна частина якого Q_L , викликає збільшення внутрішньої та температури об'єкта, інша частина Q_D втрачається при обміні із зовнішнім середовищем (рис 1.1) [1]. Підтримка постійної температури об'єкта здійснюється безперервним додаванням (компенсацією) теплової енергії Q_D , якою об'єкт обмінюється з навколишнім середовищем. Якщо необхідно змінити температуру об'єкта та підтримувати його при новій температурі, процедура дещо інша. А саме, необхідно змінити внутрішню енергію об'єкта дискретним підведенням тепла до величини, що відповідає бажаній зміні температури. Паралельно з цим дискретним процесом необхідно постійно компенсувати теплообмін з навколишнім середовищем при новій температурі. Зміна внутрішньої енергії Q_L після зміна температури визначається як

$$Q_L = \Delta T m c_v, \quad (1)$$

де ΔT - зміна температури, m - маса об'єкта та c_v - питома теплоємність об'єкта.

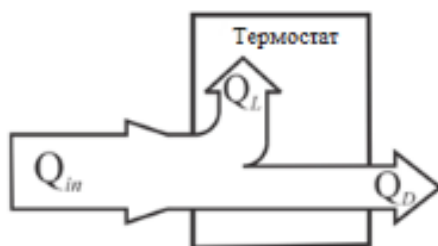


Рисунок 1.1 – Схема передачі тепла при нагріванні об'єкту [1]

З іншого боку, зміну внутрішньої енергії можна записати у вигляді співвідношення:

$$Q_L = \int_t^{t+\Delta t} P(t) dt \quad (2)$$

де $P(t)$ – потужність як функція часу, Δt - тривалості імпульсу.

Найшвидшим способом зміни температури об'єкта була б подача імпульсу потужності з формою δ -функції Дірака, що неможливо реалізувати в реальних умовах. Замість δ -функції можна використовувати прямокутний імпульс обмеженої потужності та обмеженої тривалості. Збільшення амплітуди імпульсу потужності призводить до зменшення тривалості імпульсу та наближення до ідеальної форми, тобто δ -функції Дірака.

На рисунку 1.2 наведено графічні зображення гіпотетичних процесів зміни температури. На позиції (а) представлена теоретична модель з δ -функцією Дірака нескінченної амплітуди та нескінченно малої тривалості. Заштриховані поверхні на позиціях (б) та (в) відповідають додаванню енергії необхідної для підвищення температури об'єкта від T_1 до температури T_2 . Амплітуду імпульсу і його тривалість можна вільно змінювати, але площа заштрихованої поверхні повинна залишатися незмінною. Отже можна впливати та контролювати загальний час нагрівання, необхідний для підвищення температури до значення T_2 .

Керуючою функцією системи контролю температури є функція $I_T(t)$, у той час відповідь термостата це температура як функція часу $T(t)$, що визначаються за співвідношеннями:

$$I_T = U(t) \cdot I_0, \quad (3)$$

$$T(t) = T_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_s}} \right), \quad (4)$$

де $U(t)$ має вигляд ступінчастої функції Хевісайда, I_0 – значення максимального струму, τ_s – характерний постійний час системи, термостат.

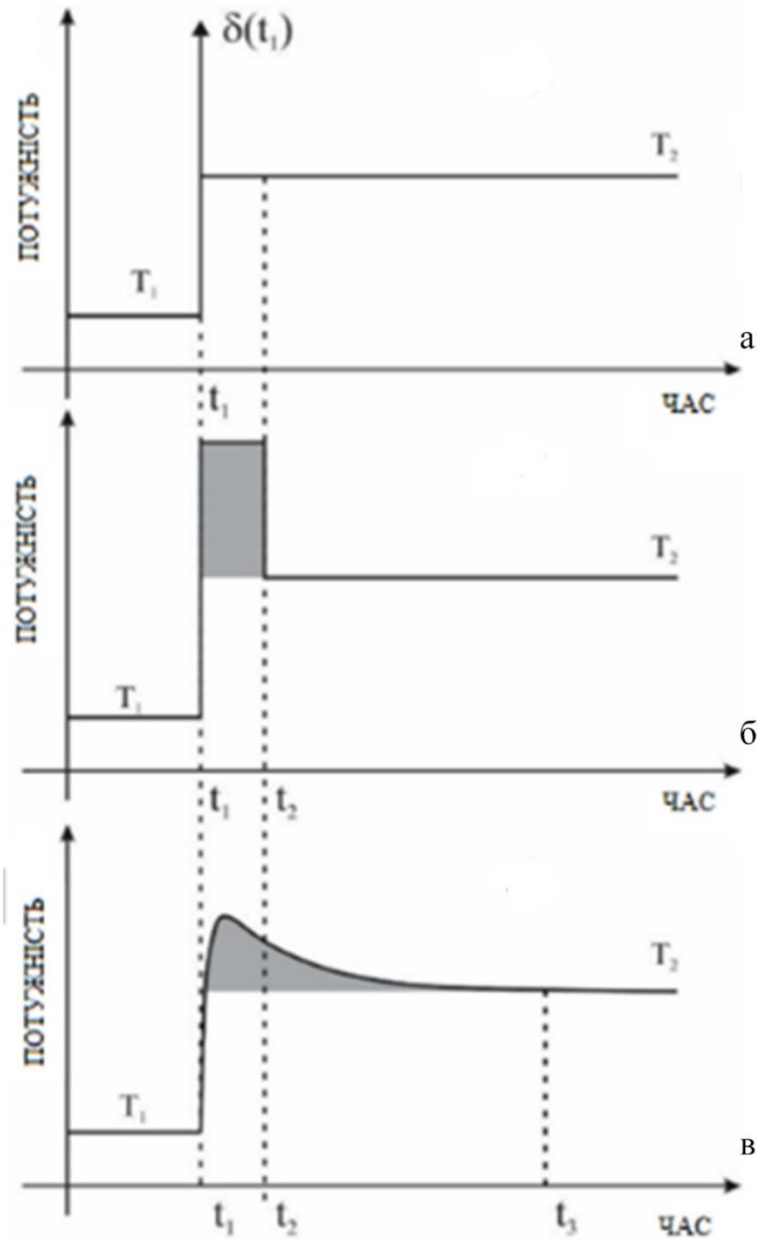


Рисунок 1.2 – Потужність як функція часу на випадки: δ -функції Дірака (а), прямокутного імпульсу з обмеженою потужністю (б) та тривалістю (в) [1]

1.2 Застосування та схемні рішення цифрові універсальні регулятори температури

У складі об'єднаних систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) є багато окремих компонентів, пов'язаних один з одним в структурні блоки. Серед таких компонентів є датчики, елементи управління, автоматизовані схеми керування периферійними пристроями, тощо. Точність отриманих даних багато в чому залежить від точності вимірювання величин датчиками. Але всі пристрої та елементи мають свої переваги та недоліки, котрі стосуються й приладів для вимірювання. Дані недоліки впливають на величину похибки в робочому процесі систем, а також можуть викликати помилки або неузгодженість в процесах нормальної роботи. Через незначну похибку вимірювання може статися критична ситуація, що призведе, в кращому випадку, до тимчасового дискомфорту, а в гіршому – до аварійних випадків.

Задля дослідження впливу похибок або несправностей датчиків у складі систем HVAC та подальшого можливого зміщення нормального режиму роботи, в якості прикладу було взято помилку зміщення термостату. Похибку зміщення термостату було введено в системи HVAC з амплітудним діапазоном від 5 °C до -5 °C в інтервалі 1 °C [2]. Імітаційні моделі для даного проекту було розроблено згідно даних з досліджень Wang [3], Yoon [4] та файлів з даними використання моделі EnergyPlus [5]. Спираючись на дані, отримані з термостату, задана максимальна температура в приміщенні становила 26 °C для робочих годин, а мінімальна температура 20 °C. При досягненні системою даних значень – подавався сигнал органами керування на включення систем охолодження або нагрівання, відповідно до поточної кліматичної ситуації. Схема системи керування температурою повітря представлена на рисунку 1.3.

Задля спрощення імітації, моделі використовували водяні насоси та вентилятори з фіксованою швидкістю. В таких умовах пристрої менш схильні до плавного регулювання загальних параметрів системи, але є більш стійкими до впливу окремих разових похибок вимірювання. Також на роботу подібних



Рисунок 1.3 - Схема системи керування температурою повітря [2]

систем клімат контролю приміщень має значний вплив зовнішня кліматична ситуація, оскільки в залежності від поточних умов надворі, буде змінюватись режим роботи системи всередині.

На основі досліджень серед подібних систем кліматичного контролю авторами роботи [6] було проаналізовано дані щодо впливу різних типів несправностей на стабільність роботи системи. Серед визначених негативних факторів, як приклад, було зазначено негативний зсув вимірюваних даних з датчика температури повітря на нагрівальну спіраль і поєднання позитивного зсуву заданої температурної точки термостата із повністю відкритою заслінкою вентиляційної системи. Несправності такого типу призводили до найбільших енергетичних втрат та збільшення споживання енергосистеми на 34,3 ГДж і 35,3 ГДж відповідно, з поточного періоду до 2050-х років. Отримані дані є корисними з точки зору використання при подальшій розробці із можливістю вдосконалення існуючих системних моделей, запобігання й діагностики несправностей та поломок, аналізу отриманих гілок даних й привнесенню корегувальних поправок в діючу систему, задля оптимізації робочого процесу в реальному часі. Загальні рейтинги впливу несправностей на роботу кліматичних

систем поділяють на енергетичні й теплові, а також степінь вологості повітря [6].

З точки зору впливу теплового комфорту, більшість несправностей пов'язані з виведенням з ладу нагрівальних елементів або ж зміщення точки температурної стабільності клімату, контрольованою змішувачами. Значна кількість поодиноких несправностей демонструють досить великі розбіжності в споживанні електроенергії при незначних впливах на комплексні показники комфорту роботи в приміщенні, за винятком клину припливного повітряного вентилятора, що забезпечує живлення киснем усю будівлю. Дана несправність найбільше впливала на самопочуття й продуктивність співробітників, а також на підтримання інших показників на визначеному рівні. Про довгостроковому продовженні роботи системи із такою несправністю, суттєво зростала концентрація шкідливих речовин в повітряній циркуляційній системі будівлі.

У роботі [7] було проведено аналітичний аналіз даних щодо ефективності системи прогнозованого контролю простору системи опалення будівлі. Такі системи можуть виконувати корегування опалювальних елементів та оптимізувати втрати теплової енергії як в якості внутрішніх систем, так і в якості компонентів централізованих систем тепlopостачання. Однак наразі бракує даних щодо сприйняття та суб'єктивних вражень від дії пристроїв безпосередньо від власників даних систем. Також дані системи можуть корегувати лише певні носії тепла, такі як електроенергія, вода або пара, поки вони знаходяться в контурі опалювальних систем. Системи не можуть контролювати показники температури повітря, вологості, тощо, а працюють лише з температурою теплоносіїв або ж нагрівальних елементів. Експеримент проводився на базі приватних одноповерхових будинків мешканців Данії [7].

Будинки власників подібних систем з використанням термостатів, у якості елементів керування, мали більш гнучкі можливості з налаштування допустимого температурного режиму. Найбільш типовими показниками для керування прийнято вважати температури радіаторних елементів, теплоносія всередині зворотнього контуру системи, нагрівачів теплоносіїв та зовнішньої температури всередині приміщення (рис. 1.4).

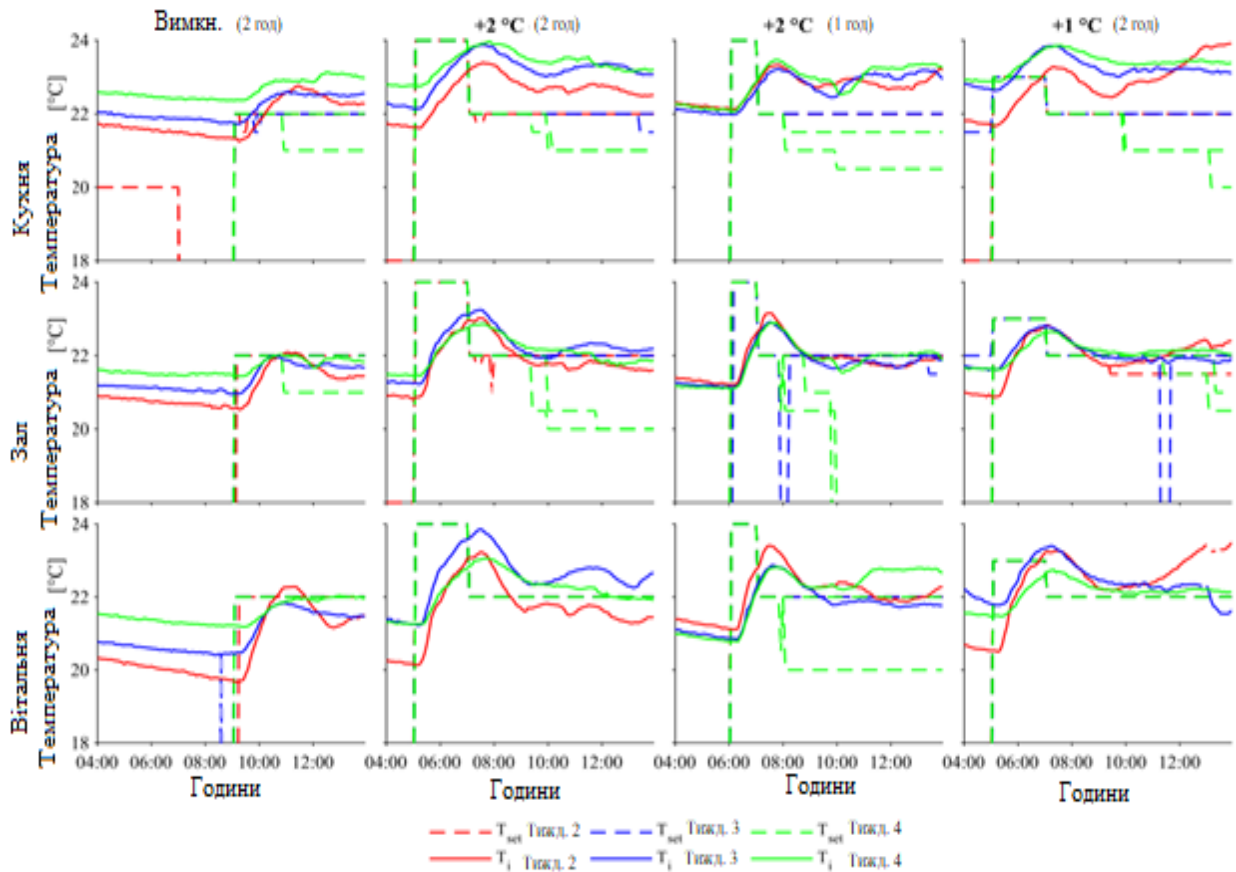


Рисунок 1.4 - Температура в приміщенні та задані значення в кожній з контрольованих зон за кожний тиждень у будинку. Задані значення для кожного радіатора відображаються однаковим кольором [7]

У роботі [8] розглядається можливість покращення процесу теплообміну під час видобування біогазу, що є важливим аспектом у оптимізації газових виробництв. Основним компонентом для біогазу є гній, котрий за певних умов продукує значну кількість випаровувань. Задля підтримання процесу анаеробного бродіння значним аспектом є підтримання кліматичних умов на станції на визначеному рівні. Також, системи кліматичного контролю мають бути додатково облаштовані датчиками концентрації газів в атмосфері, всередині станції, оскільки суміш газів за певної концентрації є вибухонебезпечною. Авторами роботи [8] розглядалися системи з використанням експериментальних теплових елементів з витою геометричною формою. Елементами управління і контролю виступали системи з кількома

термостатами, всередині кожної із станцій видобування. Формування областей високої концентрації з відносно сильними швидкостями теплопередачі вздовж теплообмінної стінки є основною причиною високої продуктивності при теплопередачі. Процес такого опалення був інтегрований у повномасштабну біогазову установку, а модель і алгоритм були розроблені та перевірені з додатковими експериментами задля опису загальної продуктивності як звичайного теплоносія, так і перевірки носія з оптимальною геометрією в різних умовах. Було помічено, що прибуток, еквівалентний 39% загального виробництва у масштабі великої біогазової установки можна досягти завдяки енергозбереженню при зовнішньому опаленні з витими видами теплових випромінювачів.

Система наведена у роботі [9] передбачає використання комунікативного інтерфейсу, що потребує мінімального обміну інформацією. Крім того, було запропоновано концептуальний метод використання розумних термостатів для соціальної комунікації щоб продемонструвати, як дана концепція може бути реалізована за допомогою датчиків, розумних елементів регулювання та інших видів периферійних пристроїв, що можуть бути під'єднані до термостатів (рис. 1.5). У випадку розумного термостата його можна підключити до проєкту

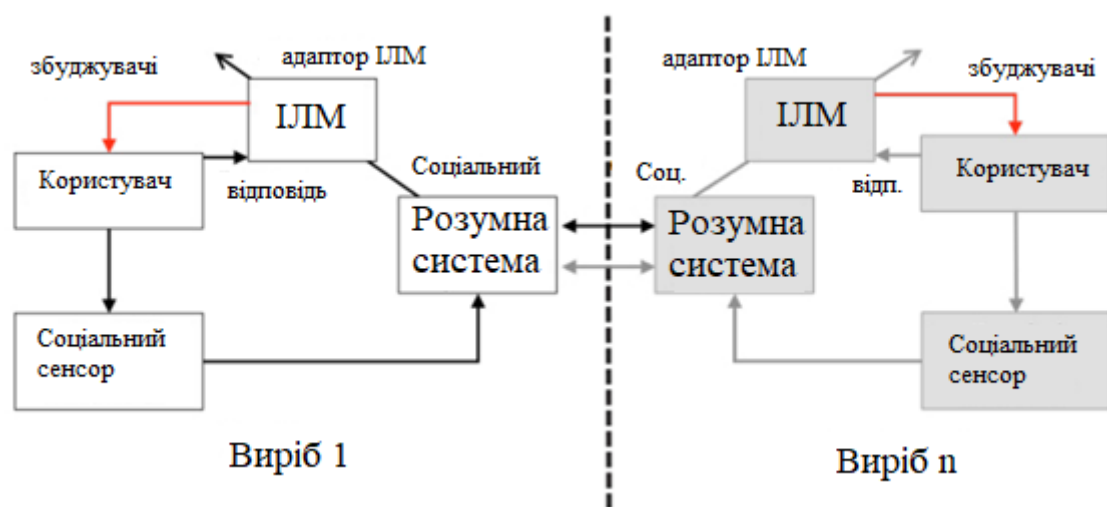


Рисунок 1.5 – Топологія структури із вдосконаленими соціальними зв'язками [9]

керування вікнами. Наприклад, щоб закрити вікна, коли в будинку починає працювати термостат, таким чином споживач економить енергію, а задана температура може бути досягнена швидше. З іншого боку, якщо показники відповідають максимальним, термостат перестає працювати, вікна відкриваються.

Для проектування розумних термостатів в якості пристроїв з передбаченням комунікативних функцій, першим кроком є розвиток соціальної комунікації між продуктом і споживачем. Для управління використовується мікроконтролер, як блок управління, і цифрова техніка відповідає за контроль температури в представленій роботі. Під час випробувань сконструйований термостат повністю підтвердив теоретичні передбачення, на яких воно базувалося. Сконструйований терморегулятор задовольнив усі очікування в плані досягненого діапазону робочих температур і стабільності утримання заданої температури. Отриманий діапазон температур становив -15°C - 120°C , з абсолютною похибкою менше $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ і зі стандартним відхиленням температури навколо $0,02^{\circ}\text{C}$ [10]. Мікроконтролер є блоком управління апаратом. Необхідний температурний режим зазвичай задається за допомогою потенціометра. Використання потенціометра є відносно грубим і непридатним рішенням для точного регулювання температури, особливо якщо необхідно повторити налаштування точно так само температури в наступних дослідах. Для точного встановлення потрібної температури передбачена клавіатура встановлено, тому завжди можна точно, швидко та легко ввести бажану температуру. Для легшого сприйняття інформації, також вбудований дисплей, щоб можна було встановити температуру та спостерігати за поточним значенням. Таким чином, сам пристрій стає автономним і незалежним від комп'ютера, хоча ним можна керувати й через комп'ютер, оскільки він використовує мікроконтролер.

Порівняння ефективності комерційного термостата з ПД регулятором і термостатом з мікроконтролером (рис. 1.6), розробленим у роботі [10], наведено на рисунку 1.7. Червона лінія ілюструє час діаграми для кількох послідовних змін температури термостату з мікроконтролером, від 90°C до -5°C . Очевидно,

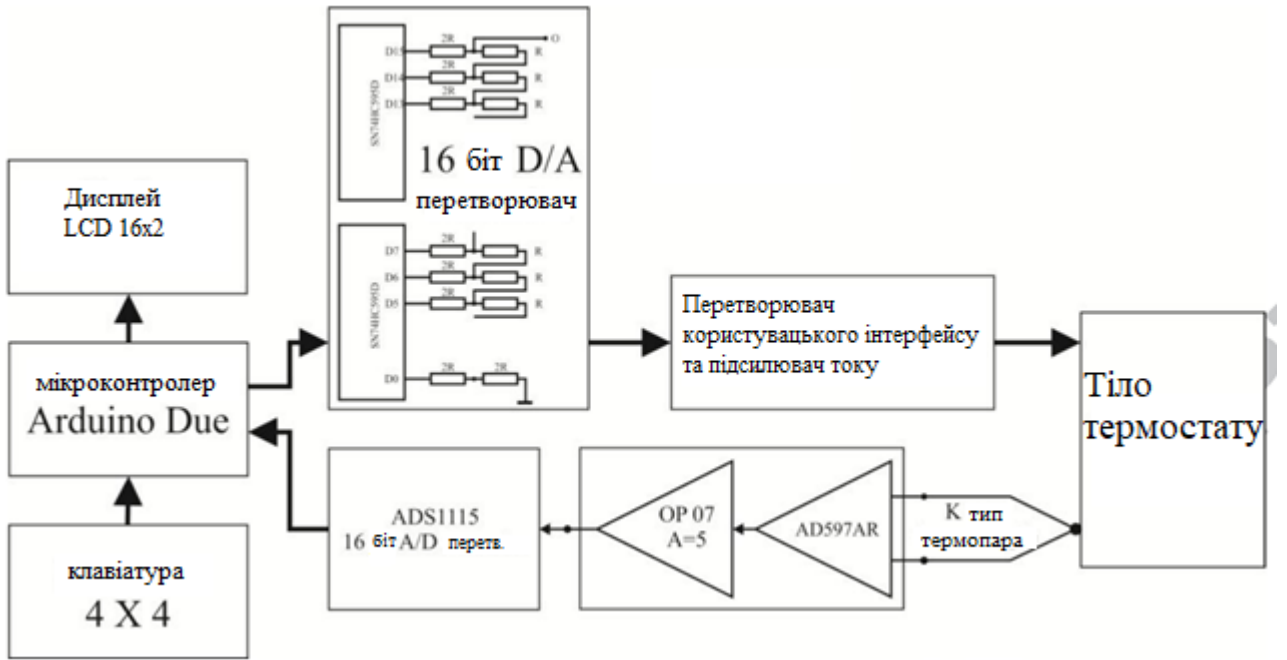


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення робочої системи термостату [10]

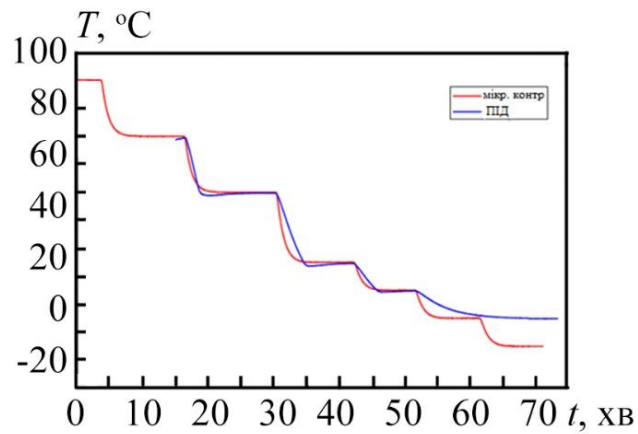


Рисунок 1.7 - Порівняння ефективності комерційного термостата з ПІД регулятором (синя лінія) і термостатом з мікроконтролером (червона лінія) [10]

що зміна температури реалізується дуже швидко і без коливань навколо нового значення, незалежно від значення температури. Синя лінія представляє часову діаграму комерційного PID-термостата. Часова діаграма ПІД-термостата була записана з використанням рекомендованих виробником значень параметрів.

За межами обраного діапазону температур, представленому на рисунку 1.6, комерційному ПІД-регулятору потрібно було набагато більше часу для стабілізації показників. Тому результати промислового термостата представлені у вузькому діапазоні.

У замкнутому колі підвищення глобальної температури збільшує потребу в більш низькій температурі всередині приміщень, водночас збільшується використання кондиціонерів призводить до підвищення зовнішньої температури. Більшість сучасних систем контролю клімату в приміщеннях спрямовані на підтримку теплової нейтральності, тобто майже постійної температури в приміщенні, у всьому підконтрольному просторі, та у часі. Це споживає значні ресурси, одночасно спричиняючи температурний дискомфорт для деяких мешканців приміщень.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

2.1 Огляд конструкцій термостатів

На теперішній час існує безліч різноманітних пристроїв, що виконують функції регуляторів температури, метеостанцій та кліматичного контролю, як комплексних, так і окремих [11]. Зазвичай вони розробляються під чітко визначене завдання працювати у визначеному діапазоні температур, регулювати певну величину, тощо. Також, здебільшого використовуються у складі систем більшого пристрою (котел індивідуального опалення, автомобіль, холодильник, вентиляція, тощо). Пристрої монтуються у складі системи або приладового блоку й значно ускладнюють використання поза їх межами, через занадто вузьку спеціалізацію [12].

У випадку більш універсальних моделей, можна спостерігати невелику кількість різноманітних пристроїв та моделей, котрі ще й обмежені у можливостях власною елементною базою [13, 14]. Вартість професійних пристроїв перевищує відомі цивільні моделі у кілька, або навіть у десятки разів (в залежності від спектру можливостей). Звісно, що вони забезпечують значно кращу надійність під час роботи, але ж не розраховані на можливість розширення кількості периферійних пристроїв до спроектованої системи, а отже модернізація без необхідності купувати ще один пристрій керування або ж втручання у його будову – майже неможлива.

Бюджетні модулі, зібрані власноруч досить дешеві у виконанні. Надійність, зазвичай, в них невисока, так як для максимальної дешевизни використовують далеко не найкращі напівпровідникові компоненти, часто використовують навісний монтаж або навіть просто скручують без закріплення виводів паянням. Такі саморобні пристрої, у більшості випадків, не мають ланок із захистом від перенапруги, статичного заряду (хоча це є суттєвим недоліком, оскільки мікроконтролери вразливі до нього), не використовують радіатори



Рисунок 2.1 – Зображення терморегуляційного модулю [15]

навіть за нагальної необхідності відведення надлишкового тепла. Через сукупність даних факторів можливості даних приладів не використовуються повноцінно, а також вони досить часто виходять з ладу в процесі постійної експлуатації. Прикладами використання саморобних пристроїв можна навести домашні інкубаторні ферми, тераріуми, системи кліматичного контролю в приміщенні, системи поливу рослин, системи опалення, тощо. Зображення варіанту виконання таких модулів наведено на рисунку 2.1.

2.2 Принцип вимірювання температури

Розглядаючи принцип роботи електронного термостата, треба звернутись до фізичних процесів. Контроль температури в ньому виконується завдяки зміні фізичної величини - провідності. У цьому випадку таким елементом може служити терморезистор, термотранзистор, тощо (тобто датчик) [16].

Датчики можна умовно поділити на кілька видів. Один із типів характеризується зростанням внутрішнього опору, коли температура вимірюваного середовища зростає. Такий пристрій є одним із різновидів терморезистора, що називають позистором. У випадку падіння внутрішнього опору електронного пристрою зі зростанням вимірюваної температури, такий пристрій прийнято називати термістором.

Обраний для пристрою датчик з'єднаний з мікроконтролером, що заздалегідь був налаштований під його тип даних. Отже контролер розпізнає отримані значення мікросхеми, і залежно від даних показників посилає сигнал механічній частині, що реалізована у вигляді реле й виконує функцію замикання або розмикання контактної групи, що керує вмиканням виконавчого пристрою. Зображення мікроконтролера на платі наведено на рисунку 2.2.

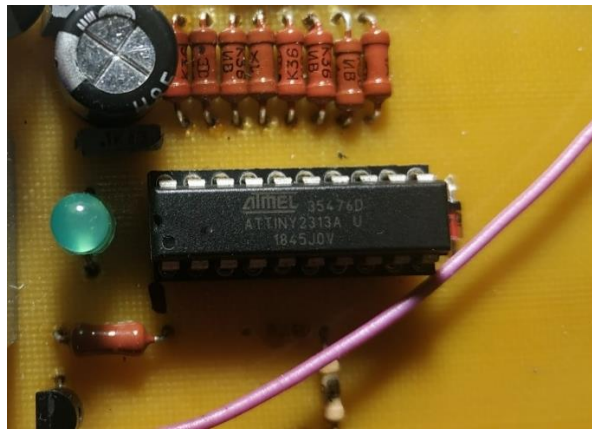


Рисунок 2.2 – Зображення мікроконтролера на платі

Вимірювані датчиком дані виводяться на визначений дисплей. В деяких модифікаціях версій програми можливе регулювання тимчасових, температурних і багатьох інших параметрів, але необхідність такого функціоналу визначається безпосередньо замовником.

Термостатом прийнято називати прилади (в окремих випадках може бути самостійним фізичним тілом), котрі підтримують температуру у межах заданого діапазону або ж на конкретній заданій точці [13]. Регулювання або ж підтримання температури відбувається за допомогою вмикання/вимикання нагрівальних чи охолоджуючих елементів, або ж за допомогою керуванням потоком теплоносія.

Для забезпечення сталої температури в термостатичних системах використовують явище стабільності температур фазових переходів, як приклад - температури плавлення та температури кипіння чистих речовин або ж рівноважних сумішей, також застосовують спеціальні пристрої - терморегулятори. Криогенні температури вимагають особливих конструкційних

особливостей у пристрої задля забезпечення його сталого функціонування, елементна база має бути пристосована до роботи у екстремальних умовах [17].

В якості теплоносіїв у регульованих системах для середнього температурного діапазону (від 200 К до 800 К) виступають вода, спиртові суміші, різні масляні сполуки. Для високого температурного діапазону (понад 800 К) застосовують солі і метали у рідкому розжареному вигляді. При експлуатації систем охолодження, основними джерелами генерації холоду виступають водень, гелій, азот й інші зріджені гази з досить низькими температурами конденсації та замерзання.

Термостати застосовують як окремі самостійні пристрої, так і складовою систем кліматичного контролю. Зазвичай використовують один датчик та один виконуючий пристрій. Прилади такого типу мають широкий спектр конструктивних виконань із можливістю обрати найбільш оптимальну схему у власному випадку. Більш дорогі сучасні термостати мають можливість використовувати більш ніж один датчик та виконуючий елемент [18].

Поняття термостату, зазвичай, використовують при вивченні термодинамічних систем. З цієї точки зору термостат є масивним тілом, з котрим відбувається обмін енергією системи. Наслідком даного процесу стає явище термодинамічної рівноваги, або ж іншими словами – фіксація температури у межах певної визначеної точки. В даних випадках термостат прийнято розглядати як значно масивніший за систему в цілому та характерною рисою є більша теплоємність, завдяки чому відбувається визначення й фіксація рівноважного стану системи.

У випадку, коли лінійні розміри окремого виділеного об'єкту є значно меншими за системні, але все ще достатньо великі задля проявлення термодинамічного потенціалу, то залишки об'єму можуть виконувати функцію термостату відносно обраного об'єму.

Основним принципом роботи термодатчиків, що використовуються у системах автономного керування, є перетворення температури у вигляд електричного сигналу [19]. Ефективність використання даної величини

зумовлена зручністю у передачі даних на відносно великі відстані без суттєвої втрати швидкості. А також передбачення зворотнього перетворення у цифровий вигляд й досить висока чутливість вимірювань.

Термоелектричний ефект проявляється, якщо в замкненому контурі з двох напівпровідникових сполук або ж провідників на місцях спаювання є різниця температур, що викликає появу електричного струму [16, 20]. Спай, що розташований у безпосередній близькості до вимірюваного середовища чи об'єкту прийнято називати гарячим, а інший спай – холодним. Чим більша різниця температур між даними двома точками, ти більший електричний струм генерується. Такі датчики температури також мають змогу використовуватись у схемах, де відсутній контакт заземлення.

2.3 Розробка виробу й огляд альтернативних рішень

Приступаючи проектування схеми майбутнього виробу є досить багато дрібниць, що потребують звертання власної уваги. Досить важливо дотримуватись відповідності з'єднань всіх функціональних елементів, із урахуванням правил використання компонентів та особливостей їх налаштування, як цілісного функціонального блоку, так і окремо кожного виконуючого елементу.

Від правильного компонування та гарно підібраних компонентів залежать наступні фактори: надійність; швидкодія; умови використання; особливості налаштування; ремонтпридатність. Також слід зазначити, що під час розробки пристрою важливо враховувати можливість збільшення кількості під'єднаних додаткових функціональних блоків або елементів (у деяких випадках) й розглянути варіанти модифікації (у випадку, коли проєкт позиціонує себе універсальним).

Оскільки метою даної роботи було розробка універсального термостату зі змінним гістерезисом, то при розробці даного конструкції терморегулятора було використано наступну елементну базу: мікроконтролер AtTiny2313a;

семисегментний індикатор; реле напруги 12В; діодний міст; стабілітрони; резистори; конденсатори; датчик виміру температури DS18B20; транзистор; тактові кнопки; мікросхема 78L05; світлодіод. Процес виготовлення наведено на рисунку 2.3.

Задля виведення інтерфейсу пристрою у візуальному вигляді, зручному для сприйняття, було обрано семисегментний індикатор. Він дозволяє не лише відстежувати чи працює даний прилад, а й виводить результати виміру температури. Також передбачено функцію показу інформації про можливі похибки чи несправності.



Рисунок 2.3 – Спроектвані плати пристрою під час виготовлення

Центральною частиною приладу виступає мікроконтролер AtTiny2313a. Він має досить невеликі лінійні розміри й гарний функціональний потенціал. Даний мікроконтролер дозволяє використовувати різні програми, що стосуються в тому числі й терморегулювання середовища, в залежності від отриманої інформації або ж чітких показників, що задовольняє основні завдання проекту.

Пристрій живиться від енергомережі 220 В, задля зниження напруги до робочого значення в 12 В вбудовано понижуючий трансформатор. Також конструкційно передбачено можливість подати живлення оминаючи трансформатор використовувати в якості джерела блок живлення або ж акумулятор. Зображення приладу без корпусу наведено на рисунку 2.4.

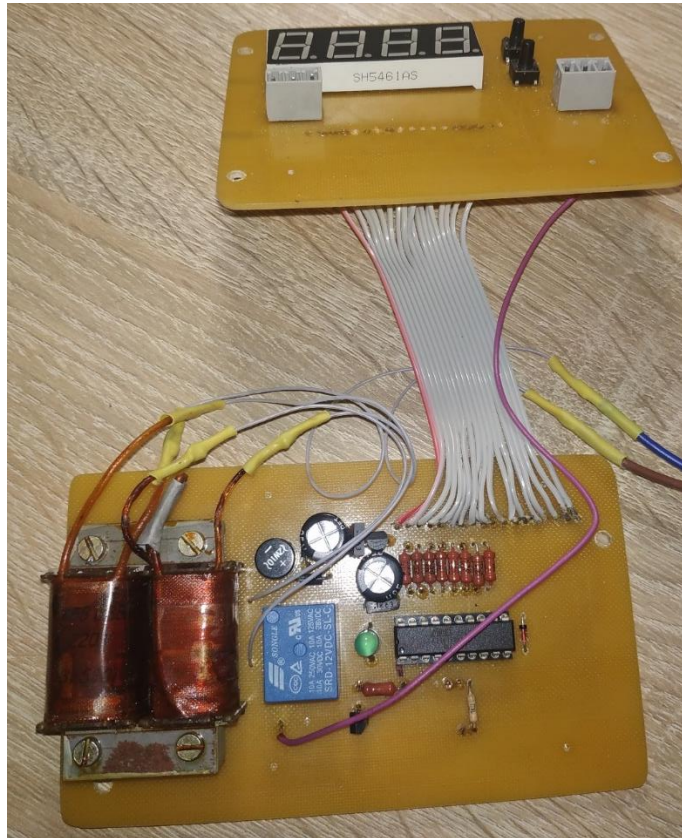


Рисунок 2.4 – Створений прилад без зовнішнього корпусу

Для зняття вимірів температури та передачу даних до керуючого пристрою було обрано датчик DS18B20, оскільки має досить невелику вартість, не потребує особливих умов використання, а також передбачено можливість виводити на відстань від приладу без помітного погіршення в роботі. Малі габарити даного датчику дозволяють використовувати його у важкодоступних місцях також (рис. 2.3). Вмонтований світлодіод є індикатором справності приладу, але, оскільки в даному випадку прилад знаходиться в цільному корпусі, він був захований всередині. За необхідністю або ж бажанням користувача, пристрій може бути виконаний у якості окремих по функціональних блоків (живлення, обробка даних й керування, індикація й налаштування, датчик, виконавчий пристрій). Конструкція приладу передбачає можливість невеликої переробки під індивідуальні забаганки користувача (закладено можливість кількох варіантів під'єднання органів керування та периферійних пристроїв). Схема розробленого приладу наведена на рисунку 2.6.

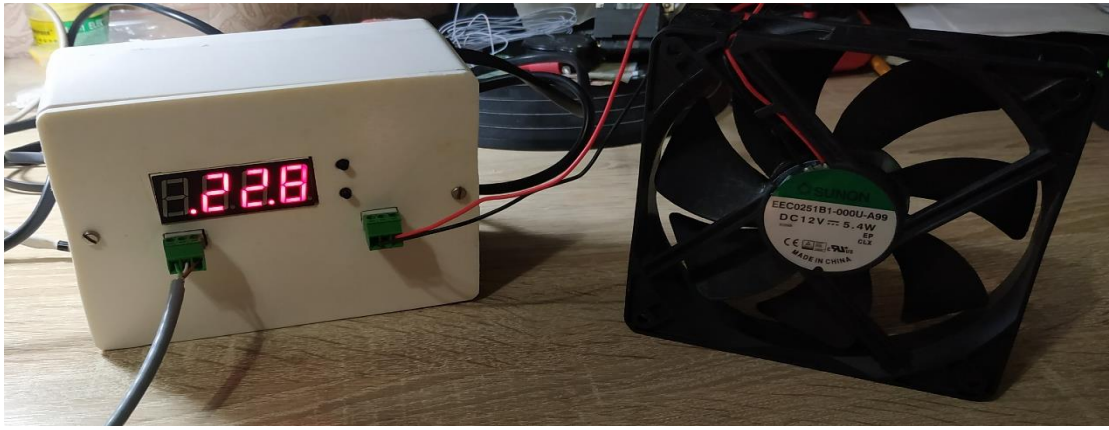


Рисунок 2.5 – Зображення виготовленого пристрою в роботі

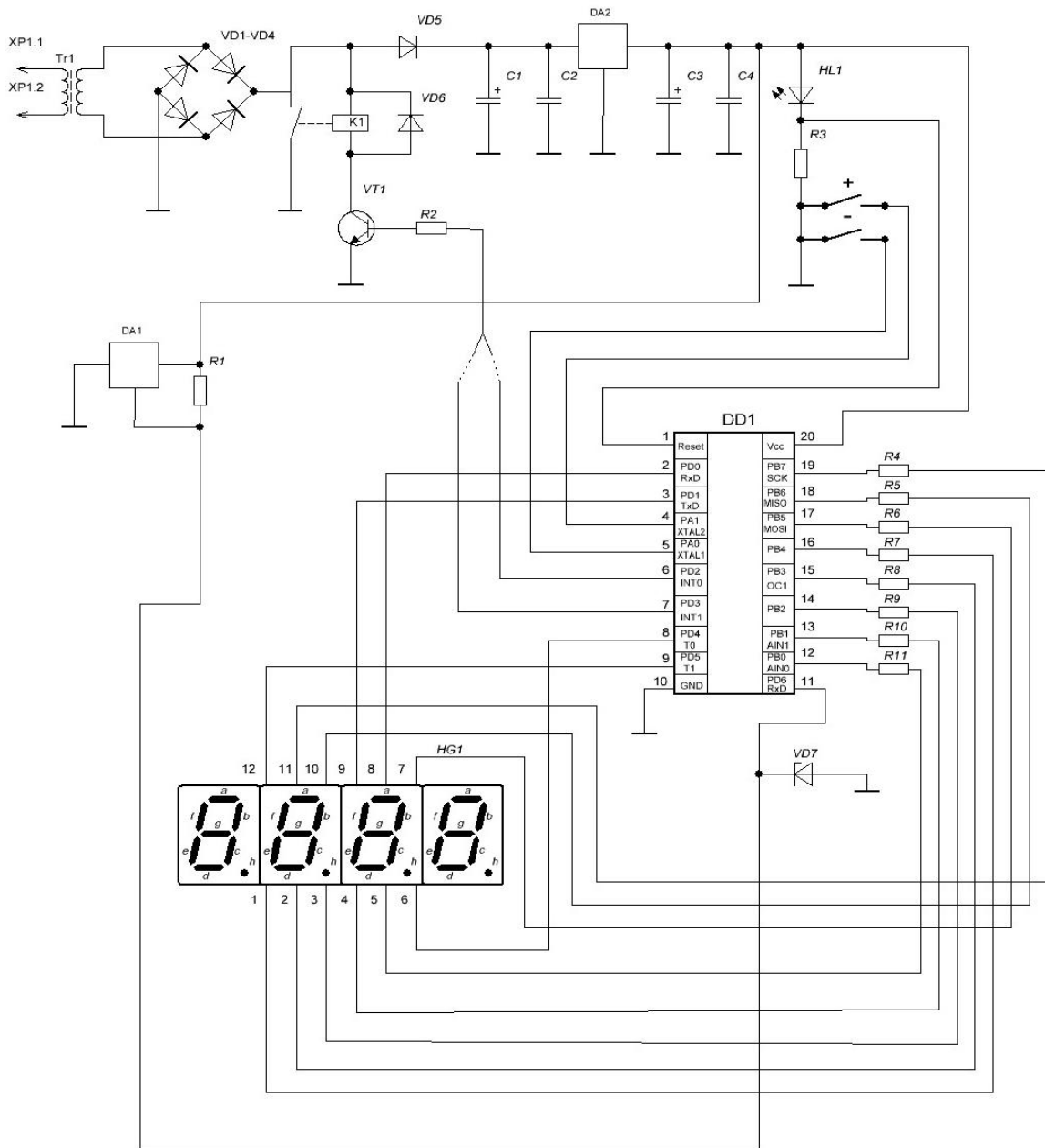


Рисунок 2.6 – Схема електрична принципова розробленого приладу

В альтернативних схемних рішеннях класична схема термостату складається з датчика температури та компаратора або операційного підсилювача, працюючого в якості компаратора. У даній схемі є два дільники напруги. В будові одного включено терморезистор, а в будові іншого - потенціометр задля встановлення порога температури.

Завдяки цьому, змінним резистором можна встановлювати поріг перемикання компаратора. А значення гістерезису визначають вводячи ланку із позитивним зворотнім опором. Зображення пристрою в роботі наведено на рисунку 2.5.

Мікросхема з логічним елементом на основі КМОП без ефекту тригера Шмідта можна використовувати в якості компаратора, оскільки вона також має чіткий поріг при переході між станами логічного нуля та одиниці. Але в даному випадку є неможливим регулювання значення даного порогу при незмінній нарузі живлення системи. Хоча при цьому ефект компаратора допускає можливість зміщення значень співвідношень плечей дільника напруги з терморезистором. Схема даного пристрою наведена на рисунку 2.7.

Іншою особливістю даної конструкції є можливість незалежного налаштування максимуму й мінімуму температурних значень, при яких подається сигнал на виконавчий пристрій, що дозволяє більш гнучко налаштувати пристрій під власні особливості. Датчик температури конструктивно особливий, оскільки складається з двох однакових терморезисторів, що розташовані в одній точці й піддаються впливу однакової температури.

У центрі такого пристрою – RS-тригер, що змінює значення до відповідності логічному нулю або ж одиниці, в залежності від налаштування пристрою. Коли транзисторний ключ відкривається, то напруга подається на нагрівальний елемент. З часом відбувається підвищення температури вимірюваного середовища, але тригер змінить положення лише коли напруга буде відповідати значенню логічного нуля. Таким чином за регулювання мінімуму та максимуму температурних показників відповідають резистори R1 та R2.

У даній роботі використовують напівпровідникові терморезистори із

опором в 15 кОм, але за необхідності зміни їх значення чи використання альтернативних моделей також буде необхідно змінити опори резисторів R1-R4 задля забезпечення кращої працездатності й виключити можливість розбалансування системи. Мікросхемою можуть виступати будь-які аналоги К561ЛЕ5. В якості діодного мосту можна використовувати готові збірки або ж зробити власноруч, але важливо дотриматись потужності такого компоненту не менш ніж 200 Вт і передбачити робочу напругу не нижче за 300 В. Польовим транзистором може виступати модель IRF840.

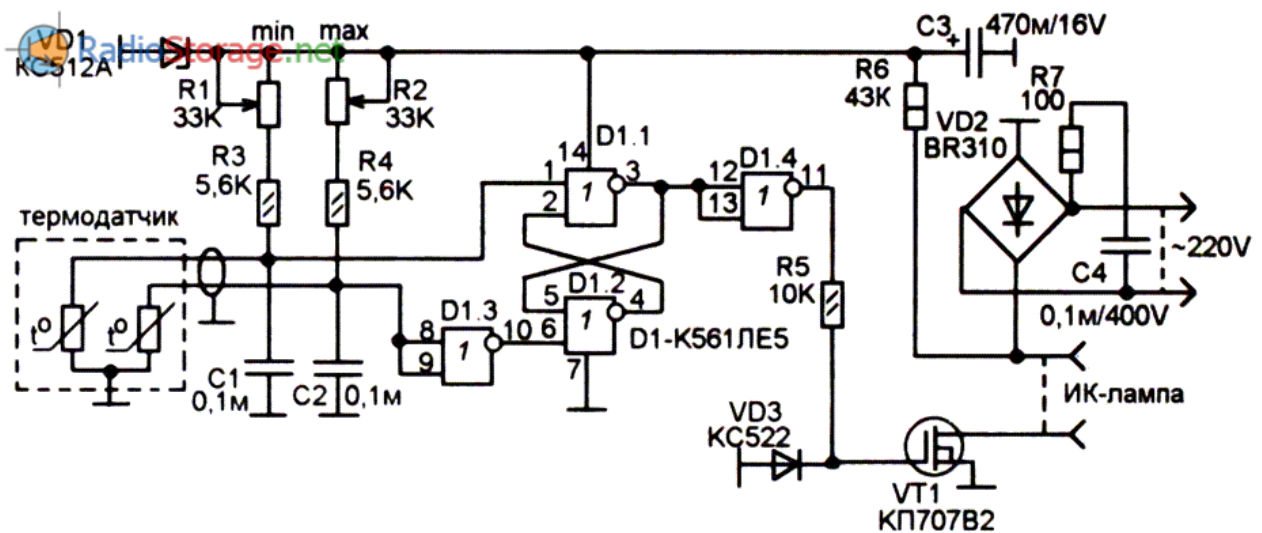


Рисунок 2.7 – Схема розглянутого альтернативного пристрою [15]

При використанні пристрою за умови, що значення потужності не сягатиме більш ніж 200 Вт – в якості радіатора достатньо буде символічного болту із гайкою та двома товстими шайбами. Стабілітрон може бути будь-який, що розрахований на напругу 7-12 В. За необхідності потужність даного пристрою може бути підвищена до значення у 2000 W, за умови використання більш потужного діодного мосту й прикріплення до транзистора кращого радіатора.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРУ ПРИЛАДУ

3.1 Середовище CVAVR

Середовище CodeVisionAVR (CVAVR) є віртуальною інтегрованою програмою, що використовується для програмування мікроконтролерів. Інтерфейс вікна програми наведено на рисунку 3.1.

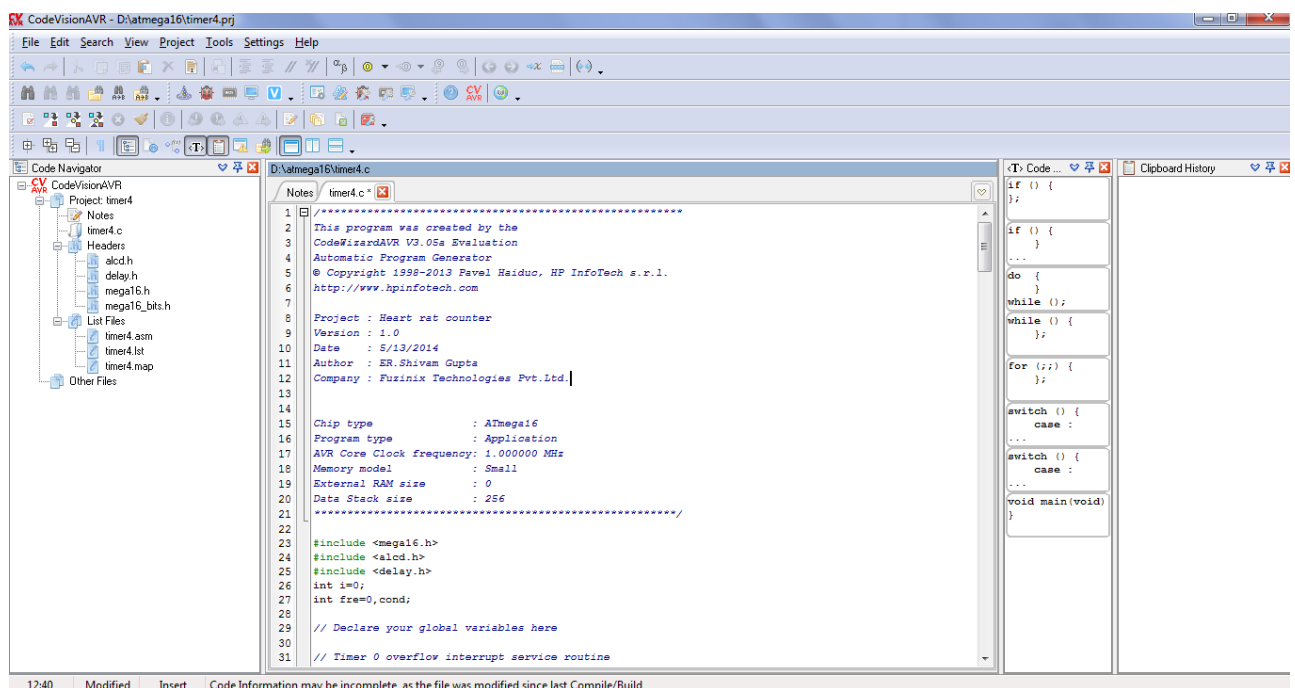


Рисунок 3.1 – Зображення вікна робочого середовища програми

Основними перевагами програми варто зазначити відносну простоту для самостійного вивчення, повну підтримку усього модельного ряду мікроконтролерів AVR разом із більш сучасними ядровими чипами серії ATXmega та дозволяє створити оптимальний результативний код під особисті потреби розробника або ж замовника. Окрім компіляції коду, середовище також виступає в якості інструменту для запису програм до пам'яті мікроконтролера. Модуль виконання прошивки розроблено із урахуванням можливості використання будь-якого офіційного зовнішнього програматорного пристрою.

Редактор програмного коду дозволяє одночасно працювати з двома проектними скетчами, а також виставляти велику кількість налаштувань робочого процесу.

Вікно робочого середовища програми містить багато корисних окремих модулів. Серед них: перекладач програм з інших мов програмування у зручний машинний код системам AVR, елементи для взаємодії з підключеними зовнішніми периферійними пристроями, модуль роботи з налагоджуваним пристроєм STK-500, кнопки керування зовнішніми програматорами, вікно редактору написаного коду, а також термінальний модуль. Призначення кнопок інтерфейсу наведено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Призначення кнопок інтерфейсу середовища CVAVR

Написаний, перевірений та налагоджений програмний код середовище дозволяє зберегти у вигляді файлів формату BIN, HEX або ROM. Такі формати застосовуються для прошивки мікроконтролера напям, за допомогою програматора. Також середовище CVAVR дозволяє зберігати інформацію у форматі OBJ або ж у якості файлу налагоджувача формату COFF. Бібліотеки середовища постійно поповнюються, оскільки мікропроцесори даної фірми використовуються у багатьох сучасних пристроях, як базовий елемент [21]. Число бібліотек CodeVisionAVR зростає з кожною новою версією і включає підтримку National semiconductor, Phillips, Maxim-Dallas Semiconductor й велику кількість інших фірм-гігантів.

Компілятор коду CVAVR хоч і виконує таку ж функцію, що й аналогічні програми як то AVR-GCC (у складі програми WinAVR) й схожий найбільше на PonyProg, але має суттєві відмінності. Найбільшими відмінностями є кількість підтримуваних моделей мікроконтролерів, використовуваним синтаксисом й швидкодією фінального програмного коду.

Працюючи з прошивками, варто пам'ятати що процедури запису Fuse-бітів та ПЗУ в середовищі CVAVR є окремими. За офіційною рекомендацією необхідно спочатку прописати розроблений код, потім виконати запис EEPROM-пам'яті і лише в кінці записувати значення так званих fuse-бітів. Також слід перевірити, чи виконано налагодження зв'язку між середовищем і програматором. Задля цього слід використати кнопку "Reset Chip", при цьому на програматорі повинна включитись індикація читання/запису[22].

Розробники постійно вдосконалюють розроблений оптимізатор коду й працюють над прискоренням робочих алгоритмів компонування програмного коду. Також відрізняють дві версії програми: звичайну й версію Evaluation. Основною відмінністю є обмеження в безкоштовній версії на максимальний розмір файлу із програмним кодом та відсутність багатьох сучасних ключових бібліотек.

Усі кодові команди асемблера AVR можна умовно поділити на команди пересилки даних, передачі керування, бітових операцій, умовних переходів за станами прапорців SREG, управління процесором, арифметичні й логічні команди-вирази [23]. Проектований прилад мав бути гнучким не лише з точки зору можливості налаштування точки утримованої температури а й з налаштуванням петлі гістерезису (дельти коливань температури під час роботи пристрою). Блок схему програми пристрою зображено на рисунку 3.3.

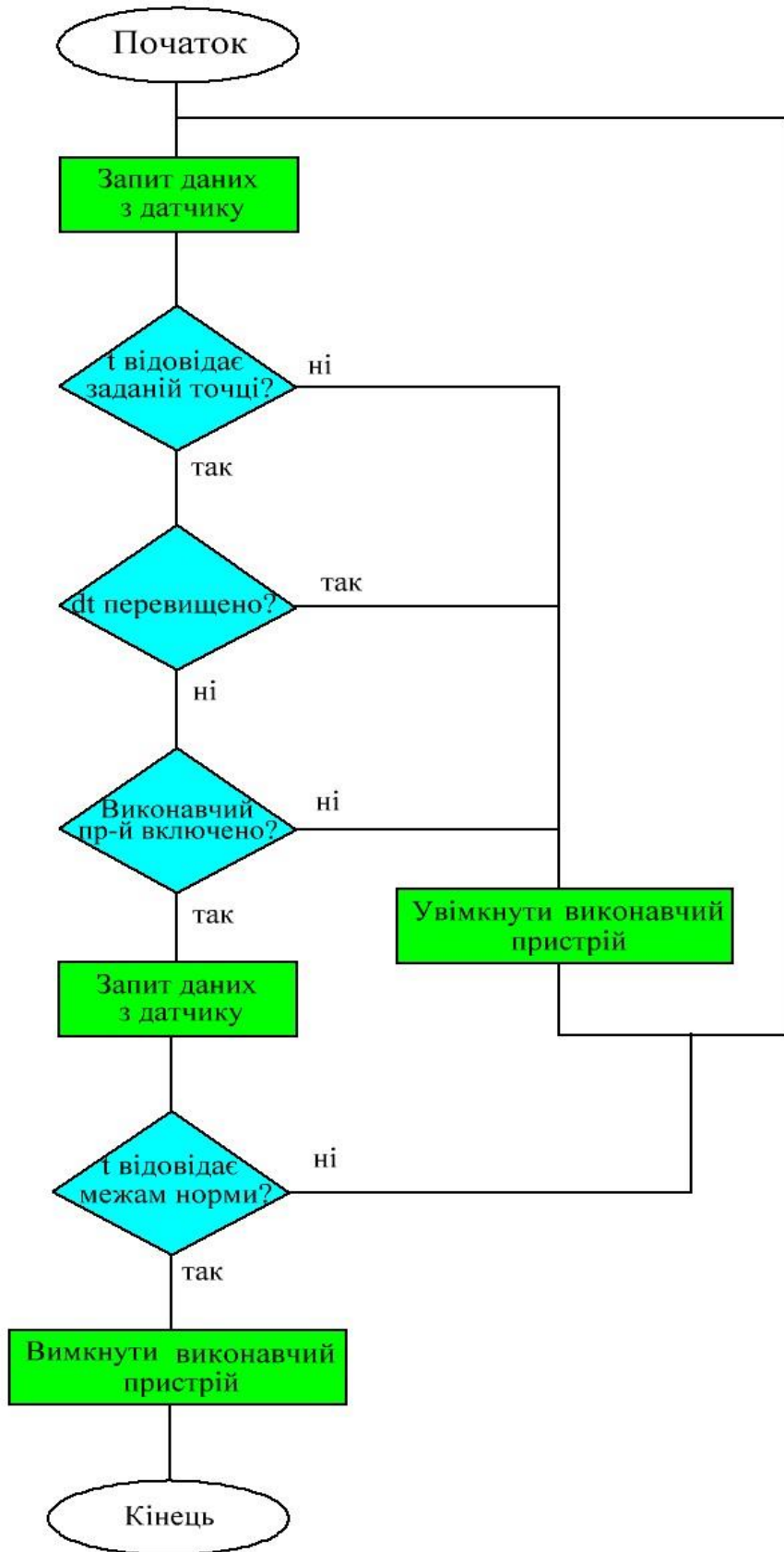


Рисунок 3.3 – Блок схема створеної програми пристрою

Фрагмент лістингу програми наведено нижче.

```
#include <tiny2313.h>
#include <kbd.h>
#include "termostat_led.h"
#asm
    .equ __w1_port=0x12 ;PORTD
    .equ __w1_bit=6
#endasm
#include <1wire.h>
#include <delay.h>
#ifndef EliminateFlicker
#define LED_delay 150U
#else
#define LED_delay 600U
#define LED_delay_add 800U
bit skipDelay = 1;
#endif
#ifdef heat
#define ShowDotAtStartup 0
#endif
#ifdef cold
#define ShowDotAtStartup 1
#endif
#ifndef ShowDotAtStartup
#define ShowDotAtStartup 0
#endif
```


3.2 Альтернативні виконання програм

Звісно, що пристрої подібного призначення можна побудувати на базі логічних мікросхем, що не підлягають зовнішньому програмуванню (“так звана жорстка логіка”), але найбільш широким з точки зору закладеного потенціалу є виконання на основі будь-яких апаратних обчислювальних платформ. Представниками таких платформ є плати серії Arduino, Raspberry Pi, Netduino та їх копії під назвами інших брендів (конструкційно та за елементною базою не мають відмінностей, різниця лише в маркуванні та кольорах текстоліту) [24].

Дані платформи використовують власні мови програмування й мають широке застосування у різноманітних системах та приладах. Основною прийнято вважати мови, що підтримуються основним середовищем для програмування, як то Arduino IDE. Прикладом таких мов є C++, C, Python, Java. Також слід зазначити, що для програмування не обов’язково вивчати повний список команд мови програмування чи спеціальних функціональних виразів.

Для того, щоб почати програмувати з даними платформами, інколи достатньо переглянути відкриті бібліотеки на GitHub [25]. Поєднуючи відкритий програмний код та принципи підключення окремих функціональних елементів, що вже підготовлені й сформовані у вигляді бібліотек файлів, можна створити цілком функціональний скетч програми. Крім того існують інші програми, що дозволяють працювати з програмним кодом у вигляді альтернативних елементів.

Arduino IDE є здебільшого користувацьким інтерфейсом та середовищем для маніпуляцій з програмним кодом, тож для певних творчих завдань можливостей даної програми може бути недостатньо. Важливо знайти оптимальну мову, що буде вдало комунікувати з користувачем, використовуваними пристроями та має змогу реалізувати поставлені цілі.

Для новачків в сфері програмування варто поглянути на середовище XOD. Воно замість строчок коду використовує візуальні блоки, більш зрозумілі для людей, як маючих досвід в програмуванні, так і вимушених вперше створювати власний проект. Візуальні блоки дозволяють створити програму,

використовуючи ті ж самі інструменти, що й Arduino IDE. Але не слід вважати, що платформа Arduino зовсім проста й призначена для дітей. Декому буде значно простіше працювати не з строгими рядками букв, цифр й символів, а саме використовувати візуальну оболонку тих самих функцій, що допоможе ознайомитись із повним спектром можливостей програмних блоків й створювати власні програмні скрипти у вигляді одного блоку. Також програму у вигляді візуальних блоків легко перетворити у цьому ж середовищі одразу у звичайні строчки коду. Водночас XOD виступає в якості інструменту для запису програми в контролер, що працює поверх офіційної IDE від Arduino. Також це дозволяє засвоїти базис мови без необхідності зубрити сотні команд й виразів.

Аналогічним середовищем є Snap4Arduino. Воно також за базис використовує візуальну оболонку, але стиль виконання є більш стриманим, блоки займають менше місця й менше звертають увагу на поясненні всіх нюансів. Для більш зручного користування програма потребує використовувати крім основного середовища Arduino IDE ще й StandartFirmata. Всі ці програми є модульними й дозволяють добре взаємодіяти між собою.

Якщо ж розглядати саме мови програмування, то C# є досить відомим, гнучким та відносно зручним засобом програмування. Підключення різних бібліотек дозволяє охоплювати широкий спектр пристроїв та кінцевих застосувань програмного коду. За допомогою CmdMessenger користувачу дозволяється виходити за рамки використання послідовного порту, задля перевірки ескізів програм чи проектів й переходу на іншу, більш зручну мову програмування. Запустивши CmdMessenger за допомогою Microsoft Visual Studio, користувачу дозволяється надсилати команди, викликати або ж виконувати інші дії задля обміну даних між ПК й пристроєм Arduino, використовуючи C# [26].

Не зважаючи на можливість підтримання пристроями Arduino коду мови програмування Python, є можливість використати його для налаштування зв'язку послідовного порту пристрою. Але найкраще працювати в такому випадку в системах із архітектурою Unix. Для того, щоб працюючи на ПК, мати ті ж самі

можливості, слід використовувати програмне середовище pySerial. Офіційні розробники залишили багато корисної інформації, що допоможе адаптувати середовище й на інші системи. Метод запису інформації за допомогою pySerial не є зручним для новачків й вимагає від користувача мати деяку базу знань до першого запуску програми, в тому числі щодо налагодження зв'язків між пристроями.

Аналізуючи це, можна зробити висновок, що Python є одним з найкращих варіантів для взаємодії з периферією Arduino. Дана мова програмування є інтуїтивно зрозумілою для багатьох людей. Саме через це її прийнято рекомендувати в якості перших кроків до програмування. Також досвід Python буде дуже корисним при переході від Arduino до пристроїв Raspberry Pi [27].

Це лише декілька прикладів різних середовищ та мов, що можуть використовуватись для програмування, оскільки платформа дозволяє бути гнучким у власному виборі.

ВИСНОВКИ

1. Серед найбільш розповсюджених варіантів використання термоконтролю вважають керування клімату вдома, інтеграція даних систем до інкубаторних ферм як великого, так і малого розмірів, оптимізація температурних показників в офісних будівлях, досягнення й підтримання необхідної температури для довготривалого зберігання речей без втрати їх цілісності або ж пошкодження у складових приміщеннях, тощо.

2. Було показано, що застосування розумних регуляторів температури значно підвищує енергоефективність вже існуючих систем, а також може забезпечити більшу надійність та довготривалість роботи окремих її складових.

3. Основним принципом роботи термодатчиків, що використовуються у системах автономного керування, є перетворення температури у вигляд електричного сигналу. Ефективність використання даної величини зумовлена зручністю у передачі даних на відносно великі відстані без суттєвої втрати швидкості, а також передбачення зворотнього перетворення у цифровий вигляд й досить висока чутливість вимірювань.

4. Розроблено базову модель пристрою для регулювання та підтримання температури у межах заданої точки з додатковим введенням гнучкого налаштування щодо можливих відхилень значення від абсолютного. Абсолютна похибка перетворювання даних вимірюваної температури не більше $\pm 0.5\%$ у діапазоні комфортних температур ($-10\dots+85\text{ }^{\circ}\text{C}$). Пристрій має змогу працювати без суттєвого спотворення значень вимірів у діапазоні температур $-55\dots+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. Особливостями програми даного приладу є самодіагностика несправностей та вивід коду помилки на індикатор, що дозволяє швидко зрозуміти, що стало причиною в тій чи іншій ситуації. Задання рівню підтримуваної температури, визначення максимального чи мінімального порогу спрацювання, встановлення меж гістерезисної петлі від $0,1$ до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. За необхідності можна без змін коду програми підключити інший датчик з аналогічними параметрами й інший виконавчий елемент.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Iskrenović P.S., Sretenović G.B., Krstić I.B. et al. Thermostat with Peltier element and microcontroller as a driver // *Measurement* – 2019. – V. 6338. – P. 7-12.
2. Guannan L.Y., Qing S.K., Yunpeng H.I., et al. Investigating thermostat sensor offset impacts on operating performance and thermal comfort of three different HVAC systems // *Elsevier. Case Studies in Thermal Engineering*. – 2022. – V. 31. – P. 31-40.
3. Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M. et al. Achieving better energy-efficient air conditioning – a review of technologies and strategies // *Appl. Energy*. – 2013. – V. 104. – P. 87-104.
4. Yoon S.M., Yu Y.G., Wang J.J. et al. Impacts of HVACR temperature sensor offsets on building energy performance and occupant thermal comfort // *Build. Simulat.* – 2019 – V. 12. – P. 259-271.
5. <https://energyplus.net/> - офіційний сайт програми, дата доступу 14.11.2022
6. Zhong F.T., Calautit J.K., Wu Y.Y. Assessment of HVAC system operational fault impacts and multiple faults interactions under climate change. // *Energy*. – 2022. – V. 258. – P. 191-222.
7. Christensen L.R., Broholt T.H., Barthelmes V.M. et al. A mixed-methods case study on resident thermal comfort and attitude towards peak shifting of space heating // *Energy and Buildings*. – 2022. – V. 276. – P. 69-83.
8. Risberg M.J., Westerlund L.T., Wang C.J. et al. A high efficient heat exchanger with twisted geometries for biogas process with manure slurry // *Appl. Energy*. – 2020. – V. 279. – P. 41-61.
9. Ponce P.D., Meier A. N., Miranda J.P. et al. Therese Peffer The Next Generation of Social Products Based on Sensing, Smart and Sustainable (S³) Features: A Smart Thermostat as Case Study // *International Federation of Automatic Control*. – 2019. – V. 52. – P. 2390-2395.
10. Rea A.L., Corbit L.H., Shu L.H. User perceptions of a range-based thermostat // *Proceida CIPR*. – 2022. – V. 105. – P. 727-732.

11. <https://opalennya.in.ua/> - сайт із видами й розрахунком систем опалення та окремих складових, дата доступу 21.11.2022
12. <https://ds-electronics.com.ua/> - головний сайт виробника термостатів, дата звернення 27.11.2022
13. <https://teplo.guru/> - онлайн довідник систем терморегулювання й опалення, дата доступу: 24.11.2022
14. <https://red-forum.com/> - універсальний український форум, дата доступу 25.11.2022
15. <https://radiostorage.net/> - форум інженерів аматорів, дата доступу: 29.11.2022
16. Швець Є.Я., Червоний І.Ф., Головка Ю.В. Матеріали і компоненти електроніки: навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗДІА, 2011. – 278 с.
17. Zhang L.N., Leach M.M., Bae Y.F. et al. Sensor impact evaluation and verification for fault detection and diagnostics in building energy systems // Adv. Appl. Energy – 2021 – V.3. – P. 28-60.
18. Васильківський І.С., Фединець В.О., Юсик Я.П. Виконавчі пристрої систем автоматизації – Львів: Львівська політехніка, 2020 – 220.
19. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи: навчальний посібник – К.: НАУ, 2019. – 276 с.
20. Однодворець Л.В., Пазуха І. М. Матеріали і компоненти функціональної електроніки : навчальний посібник. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
21. Цирульник С.М., Азаров О.Д., Трояновська Т.І. та ін. Програмування мікроконтролерів AVR : навчальний посібник. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2018. – 110 с.
22. Barnet R.H., Cox S.H., O`Cull L.A. Embedded C Programming and the Atmel AVR // Boston, USA: Cengage Learning, 2012. – P. 186-274.
23. <https://www.microchip.com/> - сайт виробника електронних компонентів, дата доступу: 1.12.2022.
24. <https://www.hacktronics.com/> - форум інженерів ентузіастів Arduino, дата доступу: 3.12.2022.

25. <https://github.com/> - платформа для спільної розробки й хостингу ІТ – проектів, дата доступу: 27.11.2022.
26. Troelsen A.P., Japikse P.H. Pro C# 7: With .NET and .NET Core – Minneapolis, Minnesota, USA, 2017. – 1410 с.
27. <https://arduinolab.pw> – аматорський форум для розробників пристроїв з Arduino, дата доступу: 5.12.2022.