

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки,  
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій  
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів  
(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)  
магістра  
(ступінь вищої освіти)

на тему «РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ  
НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ  
НА ОСНОВІ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕЛЬТЬЄ»

«DEVELOPMENT OF METHODS FOR IMPROVING  
THE RELIABILITY OF THERMOELECTRIC MODULES  
BASED ON PELTIER ELEMENTS»

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи РТ-519м  
Спеціальності 172 Радіотехніка та  
телекомунікації  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)  
Інтелектуальні технології мікросистемної  
радіоелектронної техніки

Климчук М.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Огренич Є.В.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент Воскобойник В.О.  
(прізвище та ініціали)

2020



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**  
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики та радіоелектроніки

Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри Шило Г.М.,**

**д-р техн. наук, доцент**

«    »                      2020 року

**ЗАВДАННЯ**  
 НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Климчука Максима Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка методики підвищення надійності термоелектричних модулів на основі елементів Пельтьє  
 керівник проєкту (роботи) Огренич Євген Вікторович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій електронних засобів

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «12» листопада 2020 року №325

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 18 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): термоелектричний модуль TEC1-12706 кліматичне виконання УХЛ 4.1, 4.2; Arduino Uno,

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Термоелектричні модулі; 2. Розробка конструкції контролера елемента Пельтьє; 3. Надійність термоелектричних модулів охолодження; 4. Економічне обґрунтування дипломної роботи; 5. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 20 рисунків; 16 таблиць; презентація роботи.



6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

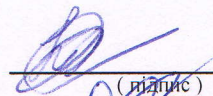
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
Розділи 1-3	Огренич Є.В., ст. викл.	01.09	
Розділ з ОП і НС	Якімцов Ю.В., доц.	10.09	
Розділ з економіки	Левченко Н.М., проф.	10.09	
Нормоконтроль	Поспеева І.Є., ст. викл.	11.12	

7. Дата видачі завдання «01» вересня 2020 року.

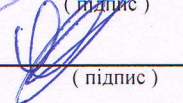
**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Визначення тематики роботи	1 тиждень	Виконано
2	Аналіз застосування елементів Пельтьє	2 тиждень	Виконано
3	Постановка задачі дослідження	3 тиждень	Виконано
4	Аналіз фізичних процесів, будови та умов експлуатації ТЕМ	4 тиждень	Виконано
5	Розробка контролера елемента Пельтьє на базі мікроконтролера серії PIC	5 тиждень	Виконано
6	Розробка контролера елемента Пельтьє на базі плати Arduino	6-7 тижні	Виконано
7	Розробка додатка ДР	8-9 тижні	Виконано
8	Розробка рекомендацій для підвищення надійності ТЕМ	10 тиждень	Виконано
9	Виконання організаційно-економічної частини	11 тиждень	Виконано
10	Розробка заходів з охорони праці та цивільної безпеки	12 тиждень	Виконано
11	Оформлення пояснювальної записки	13 тиждень	Виконано
12	Оформлення супровідної документації	14 тиждень	Виконано
13	Нормоконтроль та рецензування	15 тиждень	Виконано
14	Захист роботи	16 тиждень	

Студент

  
(підпис)

Керівник проєкту (роботи)

  
(підпис)

Климчук М.М.  
(прізвище та ініціали)

Огренич Є.В.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 106 с., 20 рис., 16 табл., 26 джерел, 3 додатка.

Об'єктом дослідження в даній дипломній роботі є термоелектричний модуль на основі елемента Пельтьє.

Мета роботи – дослідження надійності елементів Пельтьє. Вона може бути досягнута конструктивними, технологічними та програмними засобами.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі: визначити фізичні принципи, на яких базуються ТЕМ Пельтьє; проаналізувати роботу охолоджувальних пристроїв на основі елемента Пельтьє; розробити систему керування контролером елемента Пельтьє з метою підвищення надійності роботи пристроїв; проаналізувати вплив різних чинників на надійність ТЕМ охолодження на основі елементів Пельтьє (теплові, механічні, експлуатаційні); розробити рекомендації для підвищення надійності ТЕМ охолодження.

Актуальність проведення дослідження обумовлена важливістю забезпечення теплових режимів, що може здійснюватися за допомогою елементів Пельтьє, та необхідністю зниження витрат на ремонт обладнання у зв'язку з виходом із ладу термоелектричних модулів.

**ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ, ЕФЕКТ ПЕЛЬТЬЄ, КОНТРОЛЕР, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, НАДІЙНІСТЬ, ЗОВНІШНІ ВПЛИВИ**

## ЗМІСТ:

Перелік умовних скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Термоелектричні модулі.....	10
1.1 Ефект Пельтьє в напівпровідниках .....	11
1.2 Термоелектричні модулі на основі елементів Пельтьє .....	17
1.2.1 Принцип роботи термоелектричного модуля .....	18
1.2.2 Будова і умови експлуатації термоелектричних модулів .....	20
1.3 Постановка задачі дипломного проєктування .....	24
2 Розробка конструкції та системи керування контролера елемента Пельтьє .....	25
2.1 Розробка контролера елемента Пельтьє на основі мікроконтролера PIC.....	25
2.1.1 Управління елементом Пельтьє. Вимоги до контролера.....	25
2.1.2 Вимоги до контролера елемента Пельтьє, пов'язані зі специфікою експлуатації холодильної установки .....	27
2.1.3 Розробка схеми та вибір елементів .....	28
2.1.4 Математичне забезпечення регуляторів контролера .....	31
2.2 Розробка контролера елемента Пельтьє на основі Arduino .....	34
2.2.1 Загальний опис .....	34
2.2.2 Імпульсні стабілізатори.....	36
2.2.3 Розрахунок дроселя ключового стабілізатора .....	41
2.2.4 Загальні рекомендації монтажу .....	42
2.2.5 Структура програми. Вимірювання вихідних параметрів контролера.....	43

2.2.6 Реалізація програми вимірювання вихідних параметрів контролера елемента Пельтьє .....	45
2.2.7 Передача даних на комп'ютер.....	48
2.2.8 Оцінка якості роботи регулятора термоелектричного модуля Пельтьє .....	49
3 Надійність термоелектричних модулів охолодження .....	56
3.1 Загальні рекомендації .....	56
3.2 Вплив високих температур на надійності термоелектричних модулів .....	59
3.3 Вплив температурних циклів на надійність термоелектричних модулів .....	60
3.4 Вплив циклів вмикання/вимикання потужності на надійність термоелектричних модулів.....	63
3.5 Вплив зовнішніх дій на надійність термоелектричних модулів .....	63
3.6 Стандартні процедури контролю надійності .....	65
4 Економічне обґрунтування роботи .....	67
4.1 Планування науково-дослідницької роботи.....	67
4.2 Визначення трудомісткості та тривалості НДР .....	67
4.2.1 Складання мережевого графіка .....	71
4.3 Визначення витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	75
4.3.1 Розрахунок заробітної плати.....	75
4.3.2 Визначення витрат на матеріали .....	77
4.3.3 Розрахунок витрат на електроенергію .....	77
4.3.4 Розрахунок вартості спецобладнання .....	78
4.3.5 Загальновиробничі витрати.....	79



4.3.6 Загальний розрахунок затрат на виконання науково-дослідної роботи.....	79
4.4 Розрахунок економічної ефективності НДР.....	80
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	82
5.1 Аналіз потенційних небезпек .....	82
5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки .....	83
5.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці.....	88
5.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	92
5.4.1 Заходи з пожежної безпеки .....	92
5.4.2 Заходи з цивільного захисту .....	94
Висновки .....	98
Перелік посилань.....	99
Додаток А.....	102
Додаток Б .....	104
Додаток В.....	105

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АПС	– автоматична пожежна сигналізація
ЕОМ	– електронно-обчислювальна машина
ЕРС	– електрорушійна сила
МК	– мікроконтролер
ПК	– персональний комп'ютер
ТЕМ	– термоелектричний модуль
ТермоЕРС	– електрорушійна сила, пов'язана з різницею температур



## ВСТУП

Питання забезпечення теплових режимів в електронних пристроях та системах є задачею, яка досліджується вченими в усьому світі.

Термоелектричне охолодження швидко стало практичним варіантом для багатьох типів електронного обладнання. Пристрої із термоелектричними модулями на основі елементів Пельтьє, є компактними, ефективними та - завдяки передовій внутрішній конструкції - долають традиційні проблеми надійності, які обмежували можливості для цього типу пристроїв у минулому.

Підтримка електронних компонентів, таких як лазерні діоди або датчики зображення, при стабільній температурі життєво необхідне для забезпечення належної роботи приладів, таких як потужні лазери, лабораторні довідки, спектроскопи або системи нічного бачення. У деяких випадках може знадобитися охолодження до температури, нижчої за температуру навколишнього середовища. Хоча охолодження із використанням комбінації радіатора і примусового повітряного охолодження може в цілому задовольняти вимогам до теплових режимів; реакція на зміни теплового навантаження може бути повільною і неточною, а охолодження залежить від теплового градієнта, де температура джерела тепла вища за температуру навколишнього середовища.

Як альтернатива загальноживаним пасивним методам охолодження, термоелектричне охолодження може запропонувати численні переваги. Сюди входять точний контроль температури та швидша реакція, можливість безвентиляторної роботи (за умови роботи радіатора), зменшення шуму, економія місця, зниження споживання енергії та здатність охолоджувати компоненти до температури навколишнього середовища [1].

## 1 ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ МОДУЛІ

У 1834 р. французький фізик Жан Пельтьє встановив, що при протіканні постійного електричного струму через ланцюг з різних провідників, місце з'єднання провідників охолоджується або нагрівається в залежності від того, в якому напрямку тече струму. Кількість теплоти, що поглинається, пропорційна струму, що проходить через провідники [2].

В результаті робіт радянського академіка А.Ф. Іоффе і його співробітників, були синтезовані напівпровідникові сплави, які дозволили застосувати цей ефект на практиці і приступити до серійного випуску термоелектричних охолоджуючих приладів для широкого застосування в різних областях людської діяльності [3].

Одиничним елементом термоелектричного модуля (ТЕМ) є термопара, що складається з двох елементів різного роду з р- і n-типом провідності. Елементи поєднуються за допомогою комутаційної пластини, виконаної з міді. У якості матеріалу елементів ТЕМ зазвичай використовуються напівпровідники на основі вісмуту, телуру, сурми і селену.

Термоелектричний модуль (елемент Пельтьє) являє собою сукупність термопар, електрично з'єднаних послідовно (у більшості випадків). У стандартному елементі Пельтьє термопари розміщуються між двох плоских керамічних пластин, виготовлених на основі оксиду або нітриду алюмінію. Кількість термопар може відрізнятися в широких межах – від одиничних пар до декількох сот пар, що надає можливість створювати ТЕМ із практично будь-якою охолоджувальною потужністю – від десятих часток до сотень ват [4].

При вивченні роботи термопари виділяють чотири основних механізми:

1. Теплопровідність. Тепло може передаватися або при русі носіїв, або при коливанні кристалічної решітки. Теплопровідність зумовлює погіршення коефіцієнта перетворення термопари.

2. Джоулеві втрати. При протіканні струму відбувається виділення тепла, пов'язане з наявністю електричного опору. Цим явищем обумовлений другий механізм втрат в термопарі. Джоулеві втрати виникають в результаті



розсіювання носіїв заряду через недосконалість кристалічної решітки, що обумовлено тепловими вібраціями, наявністю домішок, дислокацій і т. ін.

3. Ефект Зеебека. Ефект проявляється в тому, що в провіднику виникає електрична напруга, обумовлене наявністю поздовжнього градієнта температур. Різниця потенціалів є наслідком того, що в холодній частині провідника підвищується концентрація носіїв заряду.

4. Ефект Пельтьє. Цей ефект проявляється в поглинанні або виділенні тепла в місцях контакту різних провідників і обумовлений зміною теплоємності носіїв при їх переході з одного матеріалу в інший. Існує наявність зв'язку між ефектами Зеебека і Пельтьє. На відміну від джоулева тепла, яке пропорційне квадрату сили струму, виділення тепла, зумовлене ефектом Пельтьє, пропорційне силі струму в першому ступені.

5. Ефект Томсона, зумовлений тепловою конвекцією при дрейфовому русі носіїв.

### 1.1 Ефект Пельтьє в напівпровідниках

Ефект Пельтьє – термоелектричне явище, зворотне ефекту Зеебека: при пропусканні електричного струму  $I$  через контакт (спай) двох різних речовин (провідників або напівпровідників) на місці контакту, окрім джоулева тепла, виділяється додаткове тепло Пельтьє  $Q_P$  при одному напрямку струму, і його поглинання – у випадку зворотного напрямку струму [5].

Кількість тепла, що виділяється ( $Q_P$ ), і його знак залежать від виду контактуючих речовин, сили струму і часу проходження струму:

$$dQ_P = \pi_{12} \cdot I \cdot dt, \quad (1.1)$$

де  $\pi_{12} = \pi_1 - \pi_2$  - коефіцієнт Пельтьє для даного контакту, що залежить від абсолютних коефіцієнтів Пельтьє  $\pi_1$  і  $\pi_2$  контактуючих матеріалів.

При цьому вважають, що струм іде від першого зразка до другого. При виділенні тепла Пельтьє маємо:

$$Q_P > 0, \pi_{12} > 0, \pi_1 > \pi_2.$$

При поглинанні тепла Пельтьє воно вважається негативним і відповідно:

$$Q_P < 0, \pi_{12} < 0, \pi_1 < \pi_2.$$

Очевидно, що  $\pi_{12} = -\pi_{21}$ .

Коефіцієнт Пельтьє вимірюється у вольтах:  $[Q_P] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$ .

Замість тепла Пельтьє часто використовують фізичну величину, яка визначається як теплова енергія, яка щосекундно виділяється на контактній одиничній площі. Ця величина, що отримала назву «потужність тепловиділення», визначається за виразом:

$$q_P = \pi_{12} \cdot j, \quad (1.2)$$

де  $j = \frac{I}{S}$  - щільність струму;

S - площа контакту;

розмірність цієї величини  $[q_P] = \text{Вт} / \text{м}^2$ .

Із законів термодинаміки випливає, що коефіцієнт Пельтьє і коефіцієнт термоелектрорушійної сили (термоЕРС) (Зеебека)  $\alpha$  пов'язані співвідношенням:

$$\pi = \alpha \cdot T, \quad (1.3)$$

де T - абсолютна температура контакту.

Коефіцієнт Пельтьє, що є важливою технічною характеристикою матеріалів, як правило, не вимірюється, а обчислюється за коефіцієнтом термоЕРС, вимірювання якої є більш простим.

На рис. 1.1 і рис. 1.2 зображене замкнуте коло, що складається з двох різних напівпровідників НП1 і НП2 із контактами А і В.



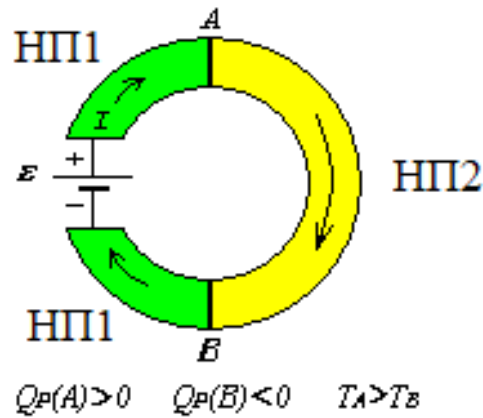


Рисунок 1.1 – Виділення тепла Пельтьє, коли  $T_A > T_B$  (контакт А):

НП1, НП2 – перший і другий напівпровідники, відповідно

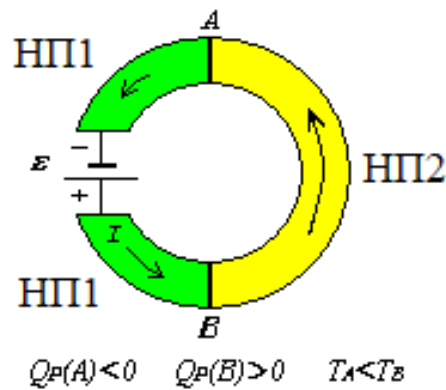


Рисунок 1.2 – Виділення тепла Пельтьє коли  $T_A < T_B$  (контакт А):

НП1, НП2 – перший і другий напівпровідники, відповідно

Таке коло називають термоелементом, а його вітки – термоелектродами. Крізь коло тече струм  $I$ , що створюється зовнішнім джерелом енергії  $\mathcal{E}$ . На рис. 1.1 показаний випадок, коли на контакті А (струм іде від НП1 до НП2) відбувається виділення тепла Пельтьє  $Q_P(A) > 0$ , а на контакті В (струм протікає від НП2 до НП1) - його поглинання -  $Q_P(B) < 0$ . Як результат, спостерігається зміна температур спаїв:  $T_A > T_B$ .

На рис. 1.2 показано, що в результаті зміни знаку джерела зовнішньої напруги напрямок струму змінюється на протилежний: від НП2 до НП1 на контакті А і від НП1 до НП2 на контакті В. Аналогічним чином змінюється знак тепла Пельтьє і співвідношення між температурами контактів:

$$Q_P(A) < 0, Q_P(B) > 0, T_A < T_B.$$

Причина виникнення ефекту Пельтьє в місці контакту напівпровідників із однаковим видом носіїв струму (два напівпровідника n-типу або два напівпровідника p-типу) така ж, як і в разі контакту двох металевих провідників. Носії струму (електрони або дірки) по різні боки спаю мають різну середню енергію, яка залежить від багатьох причин: енергетичного спектру, концентрації, механізму розсіювання носіїв заряду. Якщо носії, пройшовши через спай, потрапляють в область із меншою енергією, вони передають надлишок енергії кристалічній ґратці, в результаті чого поблизу контакту відбувається виділення теплоти Пельтьє ( $Q_P > 0$ ), і температура контакту підвищується. При цьому на іншому спаї носії, переходячи в область з більшою енергією, запозичують відсутню енергію від ґратки, відбувається поглинання теплоти Пельтьє ( $Q_P < 0$ ) і зниження температури.

Як і всі термоелектричні явища, ефект Пельтьє, виражений особливо сильно в колах, що складаються з електронних (n-тип) і діркових (p-тип) напівпровідників. В цьому випадку ефект Пельтьє має інше пояснення. Розглянемо ситуацію, коли струм в контактї йде від діркового напівпровідника до електронного ( $p \rightarrow n$ ). При цьому електрони і дірки рухаються назустріч один одному і, зустрівшись, рекомбінують. В результаті рекомбінації звільняється енергія, яка виділяється у вигляді тепла. Ця ситуація розглянута на рис. 1.3, де зображені енергетичні зони ( $\epsilon_c$  – зона провідності,  $\epsilon_v$  – валентна зона) для домішкових напівпровідників з дірковою та електронною провідністю.

На рис. 1.4 ілюструється поглинання тепла Пельтьє для випадку, коли струм йде від n- до p-напівпровідника ( $n \rightarrow p$ ).



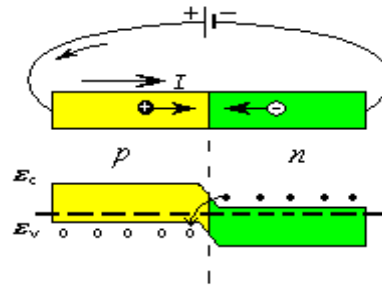


Рисунок 1.3 - Виділення тепла Пельтьє на контакті напівпровідників

p- і n-типу:  $\epsilon_c$  – зона провідності;  $\epsilon_v$  – валентна зона

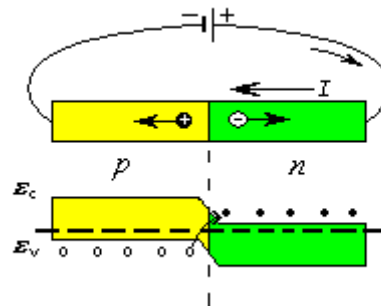


Рисунок 1.4 – Поглинання тепла Пельтьє на контакті напівпровідників

p- і n-типу:  $\epsilon_c$  – зона провідності,  $\epsilon_v$  – валентна зона

В даному випадку електрони в напівпровіднику n-типу та дірки в напівпровіднику p-типу рухаються різнонаправлено, йдучи від границі розділу. Зменшення кількості носіїв струму в приграничній області заповнюється за рахунок попарної генерації електронів і дірок. Створення таких пар вимагає енергії, що забезпечується тепловими коливаннями атомів кристалічної ґратки. Згенеровані електрони та дірки направляються в протилежні боки в результаті захоплення електричним полем. Внаслідок цього весь час, коли через контакт іде струм, відбувається безперервна генерація нових пар носіїв заряду. Як результат, тепло в контакті поглинатиметься.

Для того, щоб ефект Пельтьє був помітний на тлі загального розігріву, пов'язаного з виділенням тепла Джоуля - Ленца, необхідне виконання умови:

$$|Q_P| \geq Q_{Дж}$$

В результаті отримуються наступні співвідношення, які необхідно враховувати при проведенні експериментів:

$$I \leq \frac{\pi_{12}}{R}; j \leq \frac{\pi_{12}}{l \cdot \rho}, \quad (1.4)$$

де  $R$  – опір ділянки термоелектрода довжиною  $l$ , на якому відбувається виділення тепла;

$\rho$  – питомий електричний опір.

Коефіцієнт Пельтьє, що визначає кількість тепла Пельтьє, яка виділяється на контакт, залежить від матеріалу речовин, що входять до складу контакту, і його температури:

$$\pi_{12} = \alpha_{12} \cdot T = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T,$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – абсолютні коефіцієнти термоЕРС контактуючих речовин.

Якщо для більшості пар металів коефіцієнт термоЕРС має порядок  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  В/К, то для напівпровідників він може виявитися набагато більше (до  $1,5 \cdot 10^{-3}$  В/К). Для напівпровідників з різним типом провідності  $\alpha$  має різні знаки, внаслідок чого

$$|\alpha_{12}| = |\alpha_1| + |\alpha_2|.$$

Необхідно відзначити, що коефіцієнт термоЕРС складним чином залежить від складу і температури напівпровідника, при цьому температурна залежність  $\alpha$  для напівпровідників виражена значно сильніше, ніж для металів. Знак  $\alpha$  визначається знаком носіїв заряду. Не існує загальних емпіричних, і тим більше, теоретичних формул, які охоплювали б термоелектричні властивості напівпровідників в широкому інтервалі температур. Зазвичай термоелектрорушійна сила  $\alpha$  напівпровідника, починаючи зі значення  $\alpha = 0$  при  $T = 0$ , зростає спочатку пропорційно  $T$ , потім більш повільно, часто



залишається постійною в деякому інтервалі температур, а в області високих температур (більше 500...700 К) починає спадати по закону  $\alpha \sim 1/T$ .

Іншою відмінною рисою напівпровідників є визначальна роль домішок, введення яких дозволяє не тільки в багато разів змінювати величину коефіцієнту  $\alpha$ , але й міняти його знак.

У напівпровідниках із змішаною провідністю вклади в термоЕРС дірок і електронів протилежні, що призводить до малої величині  $\alpha$  і  $\pi$ .

В окремому випадку, коли концентрації ( $n$ ) і рухливості ( $u$ ) електронів і дірок рівні ( $\eta_e = \eta_p$  і  $\mu_e = \mu_p$ ) величини  $\alpha$  і  $\pi$  обертаються в нуль:

$$\alpha \sim \frac{\eta_e \mu_e - \eta_p \mu_p}{\eta_e \mu_e + \eta_p \mu_p} \quad (1.5)$$

Ефект Пельтьє, як і всі інші термоелектричні явища, носить характер феномену.

Ефект Пельтьє в напівпровідниках використовується для термоелектричного охолодження і підігріву, що знаходить практичне застосування при термостатування, зокрема, в холодильних пристроях [6, 7].

## 1.2 Термоелектричні модулі на основі елементів Пельтьє

Основними напрямками практичного застосування ефекту Пельтьє в напівпровідниках є отримання холоду для створення термоелектричних охолоджуючих пристроїв, підігрів з метою опалення, забезпечення термостатичності в апаратурі, керування процесами кристалізації, коли підтримання постійної температури є обов'язковим.

Охолодження за допомогою термоелектричних модулів має ряд переваг в порівнянні з іншими методами охолодження. Термоелектричні пристрої відрізняються простотою управління, можливістю тонкого регулювання температури, безшумністю, високою надійністю роботи.

ТЕМ на основі елементів Пельтьє успішно застосовуються у випадках, коли необхідне охолодження із дотриманням невеликої різниці температур, або у випадках, коли енергетична ефективність розробленої системи охолодження не є важливим параметром. Зокрема, елементи Пельтьє застосовуються в невеликих холодильниках для автомобілів, коли використання компресора є неможливим через обмежені розміри, і затребувана потужність охолодження є невеликою [8].

Також елементи Пельтьє використовуються для забезпечення заданих теплових режимів пристроїв із зарядним зв'язком в сучасних цифрових фото- та відеокамерах. В результаті їх використання досягається значне зниження теплового шуму у випадку тривалих експозицій (наприклад, для створення фотографій в астрономії). Елементи Пельтьє, виконані у вигляді декількох ступінчасто з'єднаних частин, використовуються для охолодження приймачів випромінювання в інфрачервоних датчиках.

Крім того, елементи Пельтьє широко використовуються для забезпечення теплових режимів діодних лазерів з метою стабілізації довжини хвилі випромінювання.

У приладах з низькою потужністю охолодження, елементи Пельтьє часто застосовуються у якості другого або третього елемента охолодження. Отримана в результаті температура на 30 – 40 К нижча, ніж при використанні традиційних компресійних охолоджувачів (до -80 для одностадійних холодильників і до -120 для двостадійних).

### 1.2.1 Принцип роботи термоелектричного модуля

Основним технологічним вузлом усіх термоелектричних охолоджуючих пристроїв є термоелектрична батарея, набрана з послідовно з'єднаних термоелементів. Так як металеві провідники мають слабкі термоелектричні властивості, термоелементи виконуються з напівпровідників, причому одна з віток термоелемента повинна складатися з чисто діркового (p-тип), а інша з чисто електронного (n-тип) напівпровідника. Якщо вибрати такий напрямок

струму (рис. 1.5), при якому на контактах, розташованих усередині холодильника, тепло Пельтьє буде поглинатися, а на зовнішніх контактах виділятися в навколишній простір, то температура всередині холодильника буде знижуватися, а простір поза холодильником нагріватися (що відбувається при будь-якій конструкції холодильника).

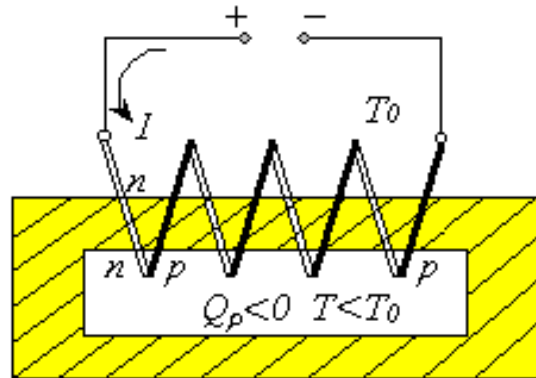


Рисунок 1.5 – Принципова схема термоелектричного холодильника

Основною характеристикою термоелектричного охолоджувального пристрою є реалізована за його допомогою ефективність охолодження [21]:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \lambda}, \quad (1.6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС;

$\rho$  – питомий опір;

$\lambda$  – питома теплопровідність напівпровідника.

Параметр  $Z$  залежить від температури, а також концентрації носіїв заряду, причому для кожної заданої температури існує оптимальне значення концентрації, при якій величина  $Z$  максимальна. Максимальне зниження температури пов'язане з величиною ефективності наступним виразом:

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot T^2, \quad (1.7)$$

де  $T$  – температура холодного краю термоелемента.

Значення  $Z$  для окремих віток прямо пропорційно визначає те значення, яке визначає ККД всього термоелемента:

$$Z = (\alpha_1 + \alpha_2)^2 / (\sqrt{\rho_1 \lambda_1} + \sqrt{\rho_2 \lambda_2})^2. \quad (1.8)$$

Доцільно вибрати напівпровідники з найбільшими значеннями рухливості і з мінімальною теплопровідністю. Легування напівпровідників є основним доступним способом для зміни його показників ( $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ ) в необхідну сторону [6].

Технологічно стрижні з напівпровідникових матеріалів з р- і n-провідністю (1) монтуються на теплопровідні плати з ізоляційного матеріалу (2) за допомогою металевих з'єднувачів (3), як показано на рис. 1.6.

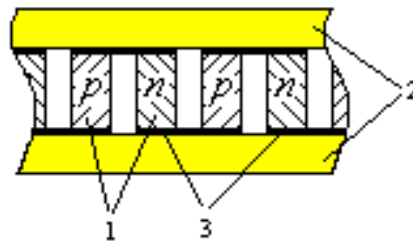


Рисунок 1.6 – Схема термоелектричного модуля

### 1.2.2 Будова і умови експлуатації термоелектричних модулів

Модулем Пельтьє є термоелектричний холодильник, що складається з послідовно з'єднаних напівпровідників р- і n-типу, що утворюють р-n і n-p-переходи. Кожен з таких переходів з'єднаний із одним з двох радіаторів з використанням теплопровідних матеріалів. Внаслідок проходження електричного струму визначеної полярності виникає перепад температур між двома радіаторами модуля Пельтьє: один радіатор охолоджується, інший радіатор нагрівається, і в результаті відбувається відвід тепла. На рис. 1.7 представлена структура і зовнішній вигляд типового модуля Пельтьє.



Типовий конструкція модуля на основі елементів Пельтьє забезпечує значний температурний перепад, який сягає кількох десятків градусів. За умови відповідного примусового зовнішнього охолодження радіатора, що нагрівається, другий радіатор надає можливість зниження температури до значень менше 0 °С.

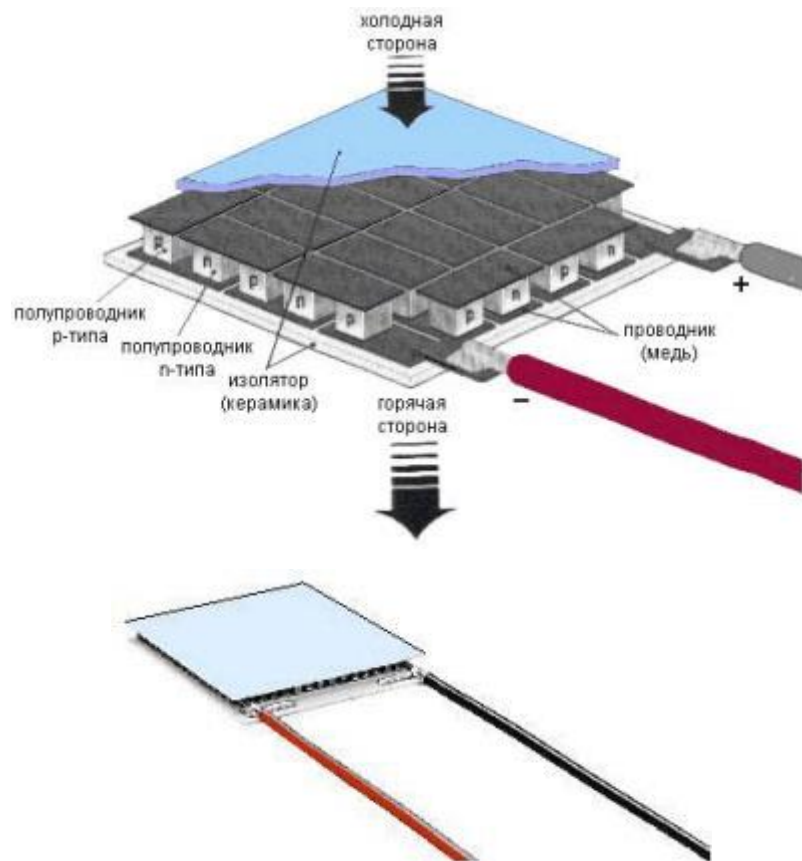


Рисунок 1.7 – Структура і зовнішній вигляд типового модуля Пельтьє

З метою збільшення різниці між температурами радіаторів інколи використовують каскадне включення ТЕМ Пельтьє за умови дотримання відповідного їх охолодження. Це дозволяє відносно простими засобами досягти значного перепаду температур і, як результат, забезпечити ефективне охолодження елементів, що захищаються від перегріву. Пристрої охолодження на основі ТЕМ Пельтьє часто називають активними холодильниками Пельтьє або кулерами Пельтьє.

Використання модулів Пельтьє в активних кулерах відзначається їх істотно більшою ефективністю у порівнянні зі більш розповсюдженими типами охолоджувачів, що базуються на традиційних радіаторах і вентиляторах. Проте

в процесі проектування та використання кулерів з модулями Пельтьє слід враховувати ряд специфічних особливостей, що визначаються конструкцією ТЕМ, їх принципом роботи, архітектурою сучасних апаратних платформ, а також функціональних можливостей системного та прикладного програмного забезпечення.

У більшості випадків потужність модуля Пельтьє визначається його розміром. ТЕМ малої потужності не забезпечує охолоджуваній апаратурі необхідний рівень зниження, що може привести до погіршення роботи або виходу із ладу електронного елемента, що захищається (наприклад, процесора), в результаті його перегріву. Проте застосування модулів дуже великої потужності без необхідності також є недоречним, оскільки може викликати зниження температури охолоджуючого радіатора до рівня конденсації вологи з повітря, що є небезпечним для електронних кіл. Це пояснюється з тим, що вода, яка постійно конденсується, може призвести до виникнення короткого замикання в електронних колах апаратури, оскільки відстань між струмопровідними провідниками на сучасних друкованих платах нерідко складає доли міліметрів.

Треба відмітити, що ТЕМ на основі елементів Пельтьє в процесі своєї роботи виділяють порівняно велику кількість тепла. З цієї причини слід застосовувати не тільки потужний вентилятор в складі кулера, але й інші заходи для забезпечення теплових режимів всередині блоків електронної апаратури для попередження перегріву решти компонентів комп'ютера. Тому доцільно використовувати додаткові вентилятори в конструкції корпусу комп'ютера для забезпечення кращого теплообміну з навколишнім середовищем поза корпусом.

Найпоширеніший типом елемента Пельтьє є термоелектричний модуль Пельтьє TEC1-12706 (рис. 1.8), який використовується в багатьох побутових приладах. Через низьку вартість та задовільні характеристики часто використовується для виготовлення малопотужних холодильників, охолоджувачів води.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вид модуля TEC1-12706

Характеристики модуля TEC1-12706 наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні параметри TEC1-12706

Позначення	Параметр	Значення параметра при температурі гарячої сторони	
		25 °C	50 °C
Q <sub>max</sub>	Охолоджувальна продуктивність	50 Вт	57 Вт
Delta T <sub>max</sub>	Різниця температур	66 °C	75 °C
I <sub>max</sub>	Максимальний струм	6,4 А	6,4 А
U <sub>max</sub>	Максимальна напруга	14,4 В	16,4 В
Resistance	Опір	1,98 Ом	2,3 Ом

Важливі показники щодо експлуатації наступні:

- максимальна допустима температура 138 °C;
- неприпустиме перевищення значення параметрів I<sub>max</sub> і U<sub>max</sub>;
- термін служби 200000 год.

Виробник - HV Corporation.

### 1.3 Постановка задачі дипломного проєктування

Мета дипломної роботи полягає у дослідженні надійності елементів Пельтьє. Вона може бути досягнута конструктивними, технологічними та програмними засобами.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- визначити фізичні принципи, на яких базуються ТЕМ Пельтьє;
- проаналізувати роботу охолоджувальних пристроїв на основі елемента Пельтьє;
- розробити систему керування контролером елемента Пельтьє з метою підвищення надійності роботи пристроїв;
- проаналізувати вплив різних чинників на надійність ТЕМ охолодження на основі елементів Пельтьє (теплові, механічні, експлуатаційні);
- розробити рекомендації для підвищення надійності ТЕМ охолодження.



## **2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОНТРОЛЕРА ЕЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЄ**

Для аналізу було обрано розробку конструкції та системи керування контролера елемента Пельтьє у складі холодильної установки. Нами було вирішено реалізувати систему керування на основі мікроконтролера PIC та плати Arduino.

### **2.1 Розробка контролера елемента Пельтьє на основі мікроконтролера PIC**

#### 2.1.1 Управління елементом Пельтьє. Вимоги до контролера.

Елемент Пельтьє є досить складним у використанні напівпровідниковим приладом. Він пред'являє жорсткі вимоги до керуючого контролера. Ці вимоги не дотримуються у багатьох розробках, але за умови роботи в цілодобовому режимі, це може призведе до негативних наслідків.

Пульсації струму через елемент Пельтьє не повинні перевищувати 5%. Порушення цієї умови веде до різкого зниження ефективності модуля (за деякими даними на 30-40%), при цьому його ККД в режимі охолодження становить близько 60%, тому таке зниження ефективності може стати критичним. Якщо в якості джерела живлення використовувати традиційну схему нестабілізованого блоку живлення - трансформатор, випрямляч, конденсатор, то ємність згладжуючого конденсатора повинна бути дуже великою. Є ще більш низькочастотні зміни напруги мережі живлення 220 В, від яких не врятують жодні конденсатори.

Перший висновок - контролер повинен живити модуль Пельтьє стабілізованим струмом, з низьким рівнем пульсацій. Звичайний нестабілізований трансформаторний блок живлення для цього абсолютно неприйнятний.

Традиційно, регулювання температури в холодильних установках відбувається релейним регулятором. При зниженні температури до заданого значення холодильна установка вимикається, а при перевищенні - вмикається.

Використання релейного регулятора для управління модулем Пельтьє приводить до незадовільних результатів через швидку деградацію елемента Пельтьє. Через кожне включення-виключення модуля деградують напівпровідникові кристали. Пояснюється це тим, що через різкі зміни температури між пластинами модуля виникають механічні напруги в місцях спайки з напівпровідниками. Виробники елементів Пельтьє нормують кількість циклів старт-стопів модуля. Для побутових модулів це прядка 5000 циклів. Але це на повне припинення працездатності модуля. Тобто релейний регулятор виведе модуль Пельтьє за 1-2 місяці.

Елемент Пельтьє має високу теплопровідність. Це означає, що при виключенні тепло від зовнішнього радіатора, через модуль буде передаватися на внутрішній радіатор холодильника. І нагрівати повітря в холодильну установку.

Тому можна зробити висновок, що регулятор повинен постійно тримати охолоджуючий модуль включеним, плавно змінюючи потужність на ньому. Часте включення - вимикання модуля Пельтьє є неприпустимим.

Вольт-амперна характеристика модуля Пельтьє нелінійна і крута, тобто при невеликій зміні напруги струм змінюється у значній мірі. До того ж, характеристика змінюється від температури поверхонь модуля, тому необхідно регулювати потужність. Охолоджуюча здатність елемента Пельтьє безпосередньо пов'язана з електричною потужністю. Тому для стабілізації температури треба регулювати електричну потужність на елементі Пельтьє, тобто добуток струму через модуль на напругу на ньому.

Регулювати потужність за допомогою широтно-імпульсного модулятора не вдається через наявність 5% пульсацій.

Аналоговий регулятор застосовувати на таких потужностях теж не можна через низький ККД.

Тому зроблено висновок, що потрібен імпульсний регулятор потужності з фільтром на виході.

Одна з потенційних причин виходу елемента Пельтьє з ладу або його швидкої деградації - висока температура гарячої пластини модуля. Як правило, вона не повинна перевищувати 80°C.

Температура охолоджуючої поверхні модуля залежить від гарячої поверхні. Наприклад, якщо допустити нагрівання гарячої поверхні до 50 ° C, а елемент Пельтьє знизить її на 30 ° C, то температура холодної частини буде 20°C, і для побутової холодильної установки таке значення температури є зависоким.

Тому необхідно контролювати температуру зовнішнього радіатора холодильника і тримати її не вище 30-35°C. Це можна робити за допомогою ввімкнення вентилятора на радіаторі, тобто контролер холодильної установки повинен вимірювати температуру зовнішнього радіатора і, при необхідності, включати вентилятор.

### 2.1.2 Вимоги до контролера елемента Пельтьє, пов'язані зі специфікою експлуатації холодильної установки

До вимог, пов'язаних із застосуванням в пристрої елемента Пельтьє, додаються специфічні умови експлуатації холодильника.

Система управління повинна підтримувати температуру з високою точністю, і головне - без різких коливань.

У камері холодильної установки стабілізується температура повітря. Реакція зміни температури повітря на зміну електричної потужності охолоджуючого модуля є дуже повільною - десятки хвилин. Математичне забезпечення регуляторів повинно враховувати цю специфіку.

Пристрій працює в цілодобовому режимі. Тому необхідний високий ККД при невисокій споживаній потужності. Бажано надати користувачу можливість самостійно задавати максимальну потужність.

У систему входять декілька компонентів, розташованих поза контролером (датчики температури, вентилятор, модуль Пельтьє). Повинна здійснюватися автономна діагностика всіх вузлів системи і забезпечуватися захист від фатальних помилок, перегріву, поломки вентилятора тощо.

Контролер повинен мати простий, зрозумілий інтерфейс.

З обліків вище сказаного і було запропоновано надану далі розробку контролера для холодильної установки. Параметри контролера наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри контролера для холодильної установки на модулі Пельтьє

Показник	Значення
Точність підтримання температури в камері	0,1°C
Діапазон температури стабілізації	(0 – 50)°C
Максимальна вихідна потужність	20 Вт
Максимальний вихідний струм	3 А
Максимальна вихідна напруга	12 В
ККД не менше	90%
Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги не більше	2%
Напруга живлення, нестабілізована	10 - 12 В
Габарити	110 x 90 x 38 мм

### 2.1.3 Розробка схеми та вибір елементів

Спрощена схема системи має наступний вид (рис. 2.1).



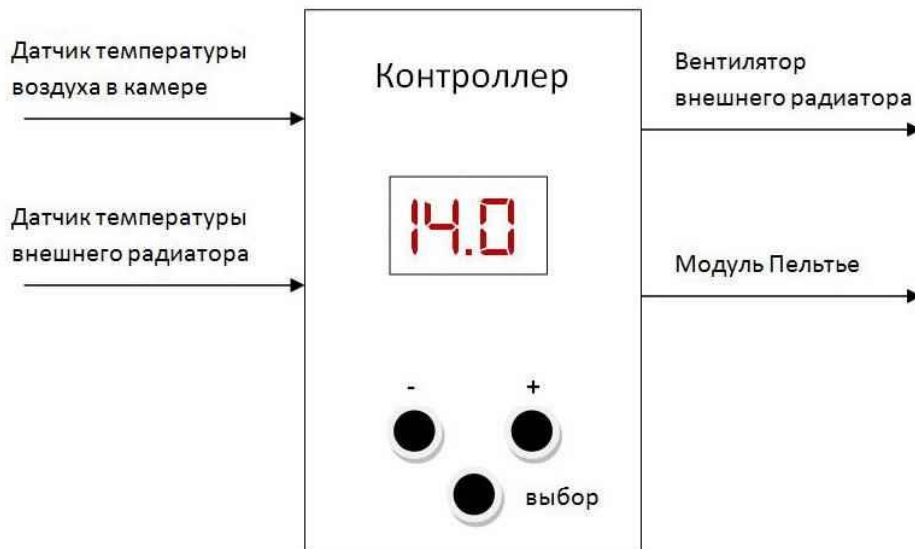


Рисунок 2.1 – Загальний принцип функціонування системи на контролері з елементом Пельтьє

Принципова схема контролера для побутової холодильної установки на елементі Пельтьє представлена на рис. 2.2.

Головним компонентом схеми є мікроконтролер PIC18F2520 компанії Microchip. До нього підключені:

- трьохрозрядний семисегментний світлодіодний індикатор VD9, через струмообмежувальні резистори R20-R27;
- три кнопки, через діоди розв'язки VD6-VD8;
- два датчика температури DS18B20 D1, D2;
- ключ управління вентилятором VT1;
- вимірювальне коло струму, через фільтр R12, C6;
- вимірювальне коло напруги живлення, через фільтр-дільник R8, R5, C4;
- вимірювальне коло напруги на другому виведення навантаження, через фільтр-подільник R9, R6, C5;
- драйвер ШІМ ключа VT2, VT3, R7, R10, R11;
- силова частина імпульсного стабілізатора VT5, VD2, L1.

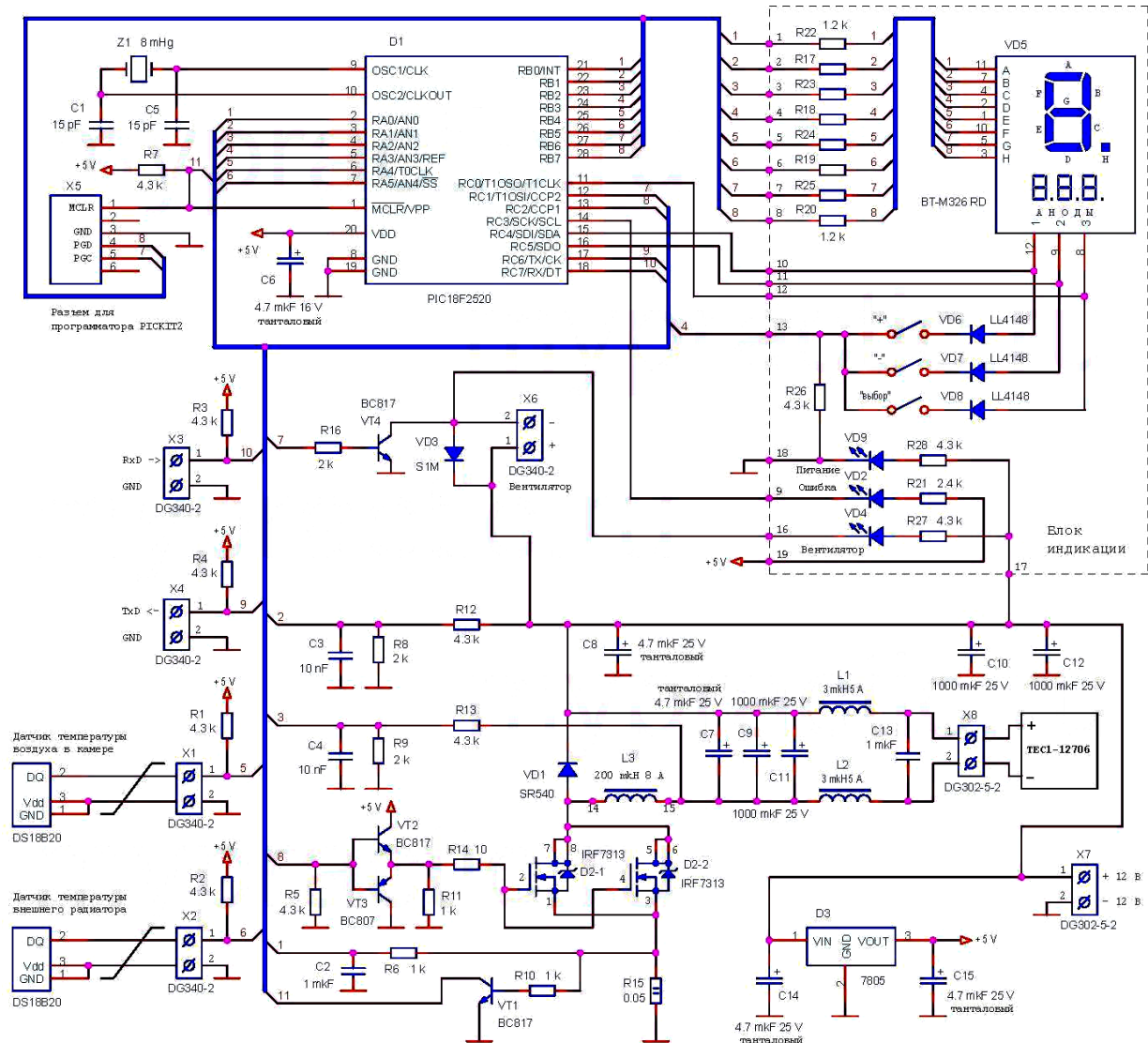


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова контролера

Імпульсний стабілізатор зібраний за традиційною схемою понижуючого стабілізатора, тільки навантаження (елемент Пельтьє) не під'єднане напряму до земляної шини. Це дозволяє управляти ключем стабілізатора від сигналу мікроконтролера, що має з'єднання із земляною шиною, що значно спрощує схему.

Ключ стабілізатора VT5 управляється через драйвер від ШІМ модулятора мікроконтролера. Частота ШІМ 100 кГц. У відкритому стані ключа струм надходить в навантаження по колу: живлення, навантаження, дросель L1, ключ VT5. У закритому - навантаження живиться від енергії, запасеної в дроселі, по колу: дросель L1, рекуперативний діод VD2. Залежно від шпаруватості ШІМ змінюється енергія, що передається в навантаження.

Значення струму, споживаного від джерела живлення, вимірюється через резистори R16, R17.

Потужність обчислюється як добуток струму на напругу живлення.

Напруга на навантаженні визначається як різниця між значенням напруги живлення і напругою на другому виведенні навантаженні.

Використовуючи всі ці параметри, контролер визначає шпаруватість ШІМ.

Дросель L1 повинен бути індуктивністю 300-400 мкГн і струмом насичення 5 А. Я виконав його на Ш подібному сердечнику Ш36x18x10 2500НМС. Намотав 65 витків, зазор 1 мм.

Треба пам'ятати, що частота ШІМ - 100 кГц. Тому повинен бути ферит відповідної марки, наприклад, N87. Обмотку краще виконати складеним в 2-3 шари тонким дротом, для боротьби зі скін-ефектом.

Схема розрахована на струм до 3 А, але можна застосувати інші компоненти для збільшення вихідної потужності. На максимальну вихідну потужність впливають параметри наступних елементів: R16, R17, VT5, VD2, L1, C10, L2, L3.

Вимоги до розведення схеми звичайні для імпульсних стабілізаторів. Мінімальними повинні бути зв'язки між силовими високочастотними елементами: R16, R17, VT5, VD2, L1, C7, C9.

На елементах L2, L3, C11 зібраний вихідний фільтр радіоперешкод.

Датчики температури краще підключити витими парами.

Оскільки компоненти схеми майже не нагріваються, вони не вимагають радіаторів.

#### 2.1.4 Математичне забезпечення регуляторів контролера

Спрощена схема застосування регуляторів наведена на рис. 2.3.

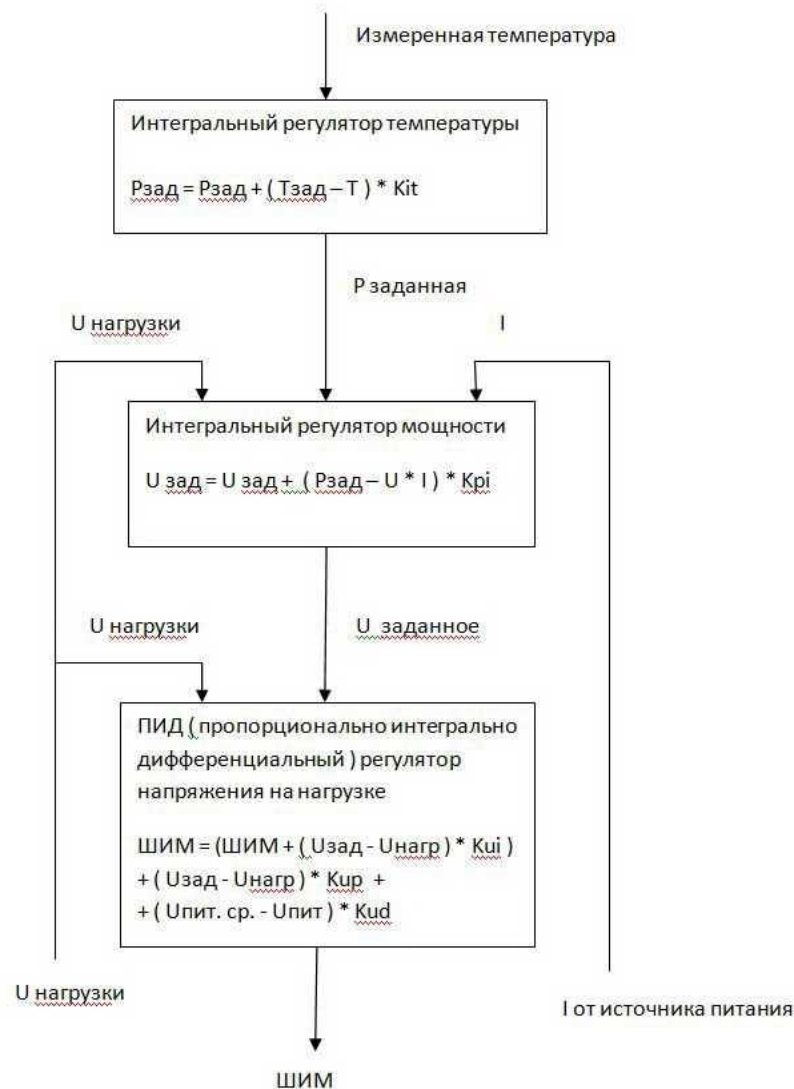


Рисунок 2.3 – Спрощена схема регуляції

Всього використовується три основних регулятори.

На найнижчому рівні регулятор напруги. Це ПІД регулятор (пропорційно інтегрально-диференційний). Його завдання - керувати ШІМ так, щоб напруга на навантаженні було стабільною. Задану напругу він отримує від попереднього регулятора - регулятора потужності. Також він згладжує пульсації, в основному, за рахунок диференціальної складової.

Вище знаходиться регулятор потужності. Він стабілізує потужність на навантаженні відповідно до заданого значення від регулятора температури. Це інтегральний регулятор. Реальну потужність він обчислює як добуток струму на напругу.



На верхньому рівні знаходиться регулятор температури. Його завдання - підтримувати стабільної температури. Це повільний інтегральний регулятор. Його інтегральний коефіцієнт заданий таким, що при помилці неузгодженості температури  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , потужність змінювалась на  $10\text{ Вт}$  за  $12\text{ хвилин}$ . Повільна реакція потрібна через інерційність процесу охолодження повітря в холодильнику.

Креслення плати та складальне креслення наведені як рисунки в Додатку А.

Програма керування контролером елемента Пельтьє на базі мікроконтролера PIC написана на асемблері, з циклічним перевстановленням всіх змінних.

Програмне забезпечення виконує наступні функції:

- індикація поточної температури в камері холодильника;
- індикація заданої температури;
- індикація поточної електричної потужності на елементі Пельтьє;
- індикація заданої максимальної потужності;
- індикація температури зовнішнього радіатора;
- індикація включення живлення;
- індикація включення вентилятора;
- індикація фатальних помилок системи;
- стабілізація температури повітря в камері;
- управління вентилятором зовнішнього радіатора (включення при  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вимикання при  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- контроль стану системи.

Якщо є можливість застосування такого контролера холодильної установки разом із комп'ютером, стане можливим:

- відстежувати у реальному часі роботу системи;
- аналізувати роботу системи за допомогою діаграм регістратора;
- встановлювати параметри контролера.

## 2.2 Розробка контролера елемента Пельтьє на основі Arduino

### 2.2.1 Загальний опис

Аналог контролера елемента Пельтьє може бути реалізований на основі платформи Arduino. Це дещо підвищує вартість контролера, проте виключає процес виготовлення друкованої плати, що зменшує час виготовлення пристрою.

Така розробка є нескладною і включає такі завдання, як вимірювання аналогових сигналів, роботу з кнопками, підключення систем індикації, вимірювання температури, роботу з EEPROM, зв'язок з комп'ютером, реалізацію паралельних процесів тощо.

Єдина функціональна відмінність такого контролера від прототипу розробки на мікроконтролері PIC – це відсутність швидкого стабілізатора напруги, який компенсує пульсації напруги живлення, тобто даний варіант пристрою повинен житися від стабілізованого джерела живлення з низьким рівнем пульсацій (не більше 5%). Цим вимогам відповідають всі сучасні імпульсні блоки живлення. При цьому живлення від нестабілізованого блоку живлення (трансформатор, випрямляч, ємнісний фільтр) є неприйнятним, оскільки швидкодія системи Ардуіно не дозволяє реалізувати регулятор напруги, що зможе відповідати цій швидкодії.

Розробка загальної структури пристрою починається із аналізу, з яких елементів складається система, на якому контролері її виконати, і чи достатньо висновків і функціональних можливостей контролера. В загальному вигляді структуру можна зобразити наступним чином (рис. 2.4).

Було вирішено, що до плати необхідно підключити:

- LCD індикатор (для відображення результатів і режимів);
- 3 кнопки (для управління);
- світлодіод індикації помилки;
- ключ управління вентилятором (для включення вентилятора радіатора гарячої сторони);

- ключ імпульсного стабілізатора (для регулювання потужності елемента Пельтьє);
- аналоговий вхід вимірювання струму навантаження;
- аналоговий вхід вимірювання напруги навантаження;
- датчик температури в камері (точний датчик DS18B20);
- датчик температури радіатора;
- сигнали зв'язку з комп'ютером.

Всього вийшло 18 сигналів. У плати Arduino UNO R3 або Arduino NANO 20 виводів. Залишилося ще 2 незадіяні виводи, що дозволить за необхідності внесення змін додати додаткові елементи, наприклад, підключити кнопку, світлодіод, датчик вологості тощо. Крім того, для розробки необхідно 2 аналогових входи, у плат Arduino UNO R3 або Arduino NANO їх 6, тобто ці плати задовольняють вимогам.

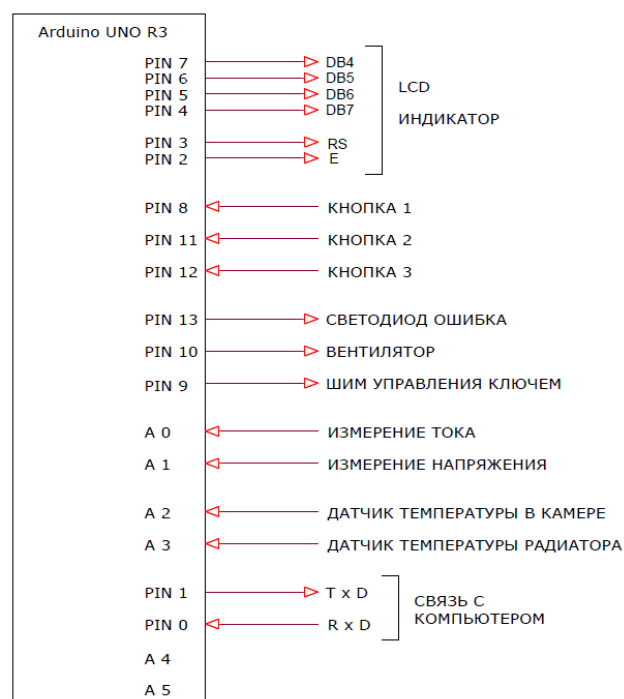


Рисунок 2.4 – Структура схеми контролера

### 2.2.2 Імпульсні стабілізатори

Для точної стабілізації температури і роботи елемента Пельтьє в оптимальному режимі необхідно регулювати потужність на ньому. Регулятори бувають аналогові (лінійні) і імпульсні (ключові).

Аналогові регулятори являють собою послідовно підключені до джерела живлення регулюючий елемент і навантаження. За рахунок зміни опору регулюючого елемента відбувається регулювання напруги або струму на навантаженні. У якості регулюючого елемента, як правило, використовується біполярний транзистор (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Використання транзистора у якості регулюючого елемента

Регулюючий елемент працює в лінійному режимі. На ньому виділяється надлишкова потужність. При великих струмах стабілізатори такого типу сильно гріються, мають невеликий ККД. Типовим лінійним стабілізатором напруги є мікросхема 7805. Для розроблюваної схеми такий варіант не підходить, тому будемо застосовувати імпульсний (ключовий) стабілізатор із пониженням температури. Напруга на навантаженні в таких пристроях завжди нижче напруги живлення. Схема понижуючого імпульсного регулятора виглядає так (рис. 2.6).

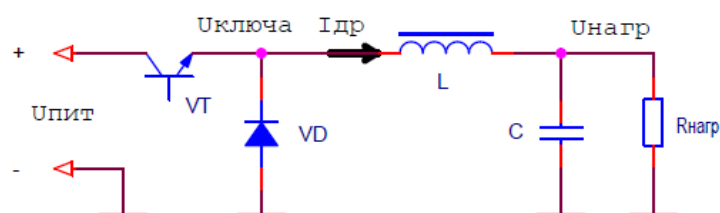


Рисунок 2.6 – Схема понижуючого імпульсного регулятора

Діаграма роботи регулятора має такий вигляд (рис. 2.7).

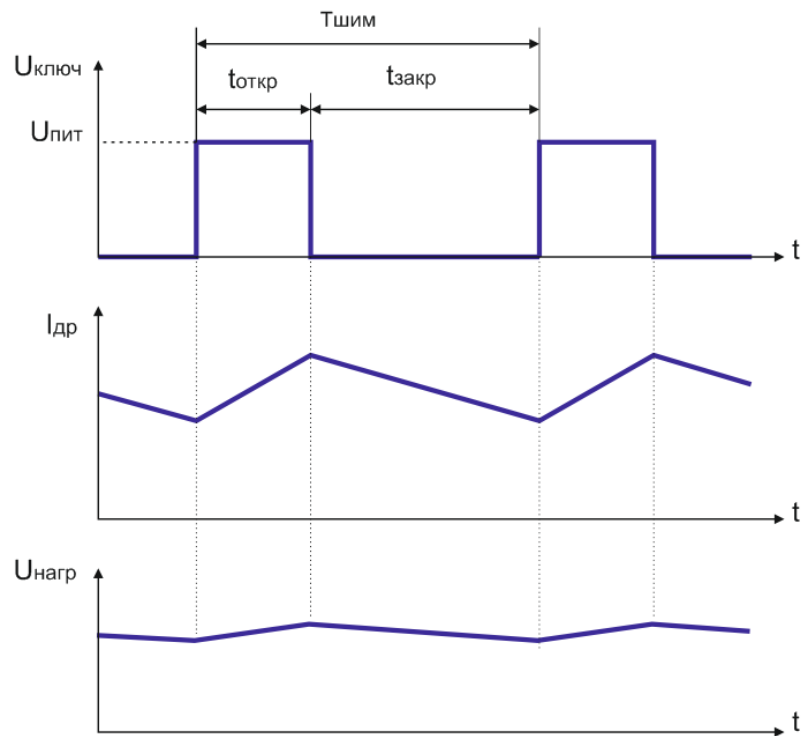


Рисунок 2.7 – Діаграма роботи регулятора

Транзистор VT працює в ключовому режимі, тобто у нього може бути тільки два стани: відкритий або закритий. Пристрій управління, в нашому випадку мікроконтролер, комутує транзистор з певною частотою і шпаруватістю.

Коли транзистор відкритий, струм тече по наступній вітці: джерело живлення  $\rightarrow$  транзисторний ключ VT  $\rightarrow$  дросель L  $\rightarrow$  навантаження.

При розімкненому ключі енергія, накопичена в дроселі, надходить в навантаження. Струм тече по ланцюгу: дросель, діод VD, навантаження.

Таким чином, постійна напруга на виході регулятора залежить від співвідношення часу відкритого ( $t_{\text{откр}}$ ) і закритого ключа ( $t_{\text{закр}}$ ), тобто від шпаруватості імпульсів управління. Змінюючи шпаруватість, мікроконтролер може змінювати напругу на навантаженні. Конденсатор C згладжує пульсації вихідної напруги.

Головна перевага такого способу регулювання – високий ККД. Транзистор завжди знаходиться у відкритому чи закритому стані, тому на



ньому розсіюється невелика потужність - завжди або напруга на транзисторі близько до нуля, або струм дорівнює 0.

Це класична схема імпульсного понижуючого регулятора. У ній ключовий транзистор не під'єднаний до загальної шини. Транзистором важко керувати, потрібні спеціальні кола зсуву до шини напруги живлення.

Тому було вирішено змінити схему. У ній від загального проводу від'єднане навантаження, але під'єднаний ключ. Таке рішення дозволяє управляти транзисторним ключем від сигналу мікроконтролера, використовуючи простий драйвер-підсилювач струму.

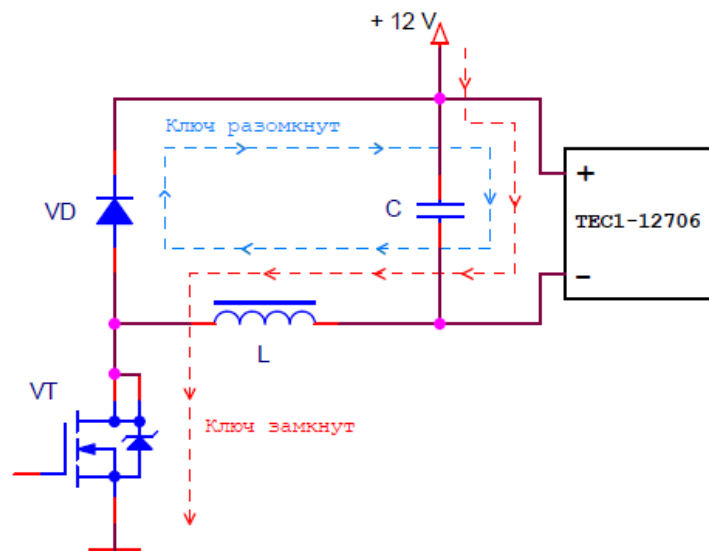


Рисунок 2.8 – Модернізована схема імпульсного понижуючого регулятора

При замкнутому ключі струм надходить в навантаження по колу: джерело живлення → дросель L → ключ VT (шлях струму показаний червоним кольором).

При розімкнутому ключі енергія, накопичена в дроселі, повертається в навантаження через рекуперативний діод VD (шлях струму показаний синім кольором).

Необхідно реалізувати вузол імпульсного регулятора з такими функціями:

- власне ключовий регулятор (ключ, дросель, рекуперативний діод, згладжуючий конденсатор);
- коло вимірювання напруги на навантаженні;
- коло вимірювання струму регулятора;
- апаратний захист від перевищення струму (рис. 2.9).

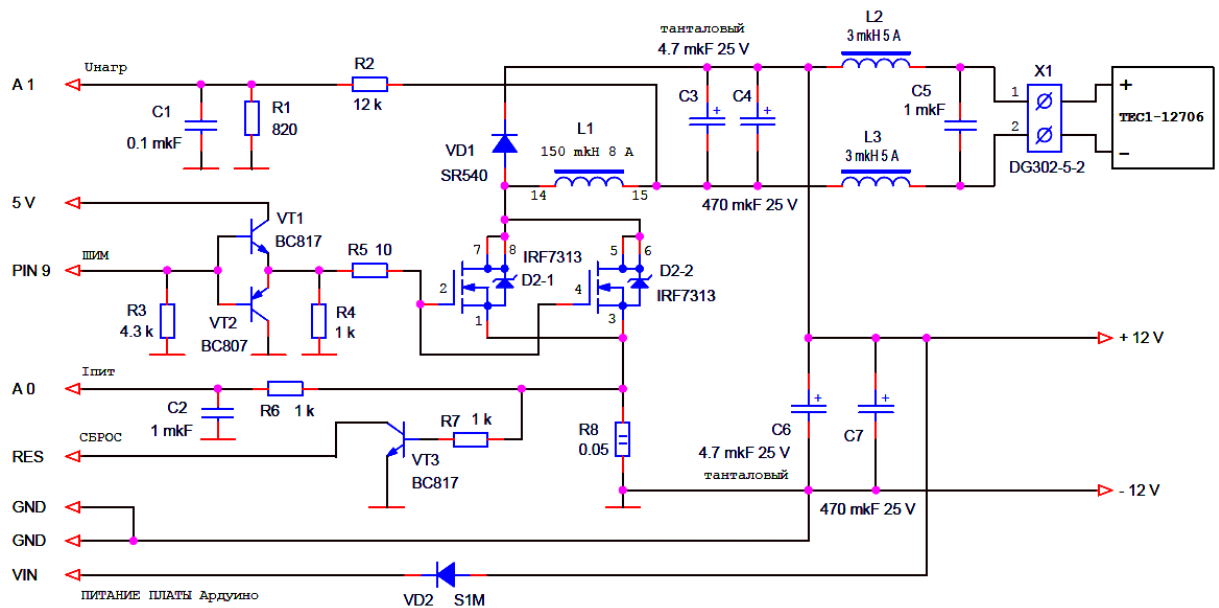


Рисунок 2.9 – Схема імпульсного регулятора для роботи з платою Arduino

В якості силового ключа використані MOSFET транзистори IRF7313.

На транзисторах VT1 і VT2 зібраний драйвер ключового MOSFET транзистора. Це схема підсилює струм, а напруга при цьому знижується приблизно до 4,3 В. Тому ключовий транзистор обов'язково повинен бути низькопороговим. Є різні варіанти реалізації драйверів MOSFET транзисторів., у тому числі із використанням інтегральних драйверів. Цей варіант найпростіший і дешевий.

Для вимірювання напруги на навантаженні використовується дільник R1, R2. При вказаних значеннях опорів резисторів і значенні на джерелі опорної напруги 1,1 В, діапазон вимірювань становить 0...17,2 В. Коло дозволяє виміряти напругу на другому виводі навантаження щодо спільного проведення.

Напруга на навантаженні розраховується як різниця між напругою джерела живлення та виміряною напругою:

$$U_{\text{н}} = U_{\text{ж}} - U_{\text{вим}},$$

де  $U_{\text{н}}$  – напруга на навантаженні, В;

$U_{\text{ж}}$  – напруга джерела живлення, В;

$U_{\text{вим}}$  – значення виміряної напруги, В.

Точність вимірювання буде залежати від стабільності підтримки напруги джерела живлення, але розроблюваний пристрій не потребує високої точності вимірювання напруги, струму, потужності навантаження, оскільки його мета – підтримка певної температури, яка буде вимірюватися з високою точністю.

Струм вимірюється за допомогою резистора-датчика струму R8. Компоненти R6 і C2 утворюють простий фільтр низьких частот.

На елементах R7 і VT3 зібраний найпростіший апаратний захист. Якщо струм в колі перевищить 12 А, то на резисторі R8 напруга досягне порога відкриття транзистора 0,6 В. Транзистор відкриється і замкне вивід скидання мікроконтролера (RES). Недоліком такої схеми є те, що поріг спрацьовування цього захисту визначається напругою база-емітер біполярного транзистора (0,6 В), через що захист спрацьовує тільки при значних струмах. Застосування аналогового компаратора дозволяє уникнути цього недоліку, але це ускладнить схему.

Струм може вимірюватися з вищою точністю при збільшенні опору датчика струму R8, але це призведе до виділення на ньому значної потужності. Так, при опорі 0,05 Ом і струмі 5 А на резисторі R8 розсіюється 1,25 Вт.

У схемі вимірюється струм споживання імпульсного стабілізатора від джерела живлення. Для роботи системи необхідно вимірювати електричну потужність на елементі Пельтьє. Потужність, що споживається регулятором, буде визначатися за формулою:

$$P_{\text{рег}} = U_{\text{ж}} \cdot I,$$

де  $P_{\text{рег}}$  – потужність регулятора, Вт;

$U_{\text{ж}}$  – напруга джерела живлення, В;

$I$  – споживаний струм, А.

Розрахунки показали, що ККД регулятора складатиме 90-95%.

Компоненти L2, L3, C5 - простий фільтр радіоперешкод.

### 2.2.3 Розрахунок дроселя ключового стабілізатора

Для даної схеми для дроселя є важливими такі параметри, як індуктивність та струм насичення. Необхідна індуктивність дроселя визначається частотою ШІМ і допустимими пульсаціями струму дроселя.

Для розрахунку використані наступні значення параметрів:

- напруга живлення 12 В;
- мінімальна напруга на елементі Пельтьє 5 В;
- значить максимальне напруження на дроселі  $12 - 5 = 7$  В.

Тривалість імпульсу відкритого ключа  $t_{\text{откр}}$  визначається частотою періоду ШІМ. Чим вона вища, тим меншої індуктивності необхідний дросель. Максимальна частота ШІМ плати Arduino 62,5 кГц.

У найгіршому варіанті - ШІМ перемикається рівно в середині періоду.

Тривалість періоду  $1/62500$  Гц = 0,000016 сек = 16 мкс.

Тривалість відкритого ключа = 8 мкс.

Пульсації струму в таких схемах зазвичай задають до 20% від середнього струму.

Якщо струм 5 А, то візьмемо пульсації струму 10% або 0,5 А.

Тоді індуктивність дроселя:

$$L = U_{\text{дроселя}} * t_{\text{відкр}} / I_{\text{пульсацій}} = 7 * 8 / 0,5 = 112 \text{ мкГн.}$$

У нашому випадку максимальний струм дроселя визначається як середній струм плюс пульсації, тобто 5,5 А. Але враховуючи наявність апаратного захисту у цьому варіанті схеми, струм повинен бути не менше 12 А.

Струм насичення визначається повітряним зазором в магнітопроводі дроселя.

Провід обмотки дроселя повинен бути достатнього перетину. Розрахунок відбувається шляхом визначення теплових втрат за рахунок активного опору обмотки.

Активний опір обмотки:

$$R_a = \rho * l / S,$$

Де  $R_a$  - активний опір обмотки, Ом;

$\rho$  - питомий опір матеріалу (для міді 0,0175 Ом мм<sup>2</sup> / м);

$l$  - довжина обмотки, м;

$S$  - перетин дроту обмотки, мм<sup>2</sup>.

Теплові втрати на активному опорі дроселя:

$$P = I_2 * R_a$$

#### 2.2.4 Загальні рекомендації монтажу

Ключовий регулятор споживає від джерела живлення значний струм і не можна допускати, щоб цей струм проходив через плату Arduino, тому дроти від блоку живлення підключені безпосередньо до блокувальним конденсаторів C6 і C7.

Основні імпульсні струми схеми проходять по контуру C6, навантаження, L1, D2, R8. Це коло повинне замикатися зв'язками з мінімальною довжиною.

Загальний дріт і шина живлення плати Arduino підключаються до блокувальний конденсатор C6.

Сигнальні дроти між платою Arduino і модулем ключового стабілізатора повинні бути мінімальної довжини. Конденсатори C1 і C2 краще розташувати на роз'ємах підключення до плати.

### 2.2.5 Структура програми. Вимірювання вихідних параметрів контролера

Контролер повинен виконувати кілька паралельних завдань в циклах з різним часом періодів. Завдання повинні виконуватися одночасно. Жодне завдання призупинити не можна, оскільки навіть короткочасна зміна тривалості періоду будь-якої операції може привести до таких наслідків, як похибки вимірювання, мерехтіння індикаторів, неправильна робота регуляторів, нестійка реакції на натискання кнопок і т.ін.

Тому, перш за все, необхідно створити структуру програми, що забезпечує виконання необхідних паралельних завдань.

Перш за все необхідно визначити, які типові операції і з якою періодичністю будуть виконуватися в програмі. Було обрано наступні паралельні завдання (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Операції для паралельного виконання

Операції	Періодичність виклику
Вимірювання струму та напруги	2 мс
Цифрова фільтрація (обчислення середнього значення) струму, напруги, потужності	20 мс
Опитування регулятора потужності на елементі Пельтьє	20 мс
Зчитування показів датчиків температури (формування сигналів керування датчиками 1-wire)	1 с
Опитування регулятора температури	1 с
Виведення даних на дисплей	20 мс
Сканування кнопок	2 мс
Управління індикацією	20 мс
Встановлення параметрів	300 мс
Захисні функції	20 мс
Передача даних на комп'ютер	1 с
Управління, загальна логіка програми	20 мс



Операції по періоду виклику можна розділити на 3 групи:

1) Операції, що виконуються в циклі 2 мс: зчитування аналогових каналів, сканування стану кнопок, формування сигналів датчиків температури (інтерфейс 1-wire).

2) Операції з періодом виклику 20 мс: цифрова фільтрація значень аналогових каналів, регулятор потужності, індикація, загальне управління тощо.

3) Операції з періодом 1 с: зчитування датчиків температури, регулятор температури, передача даних на комп'ютер.

При цьому треба враховувати, що операції з періодом виклику 20 мс не повинні блокувати операції в циклі 2 мс. Операції з періодом 1 с не повинні заважати виконанню операцій в циклах 2 і 20 мс.

Було обрано наступний варіант структури програми. Цикл із періодичністю виклику реалізовано в оброблювачі переривань по таймеру:

```
// обробка переривань по таймеру 2 мс
void timerInterrupt() {
// операції циклу 2 мс
interruptCount++; // лічильник циклів переривань
if ( interruptCount >= 10 ) { // тривалість циклу 20 мс
interruptCount= 0;
flagReady= true; // ознака циклу 20 мс
}
}
```

Цикл викликається апаратним перериванням кожні 2 мс. У ньому виконуються необхідні операції. Операції цього циклу пріоритетні. Зупинити виконання їх операції інших циклів не можуть.

У кожному циклі змінна interruptCount (лічильник циклів переривань) збільшується на 1. Далі вона порівнюється з константою і при досягненні її

значення формується ознака `flagReady`. При часі переривання 2 мс і константі, що дорівнює 10, ознака `flagReady` виробляється кожні 20 мс.

В основному циклі `loop ()` аналізується ознака `flagReady` і при його активному стані виконується програмний блок "цикл 20 мс" (Додаток Б).

У ньому виконуються операції циклу 20 мс.

Для відліку часу циклу тривалістю 1 с змінна `cycle20mcCount` (лічильник циклів 20 мс) кожні 20 мс збільшується на 1. При досягненні 50, тобто часу 1 с, вона скидається в 0.

Тепер залишається операції циклу тривалістю 1 с розподілити по 50 інтервалах тривалістю 20 мс. Кожна операція цього циклу не повинна перевищувати час 20 мс. Треба залишити час на виконання операцій інших циклів. Для деяких завдань така організація виявляється оптимальною. Наприклад, робота з датчиком температури DS18B20 вимагає наступної послідовності операцій:

- ініціалізація вимірювання температури;
- очікування перетворення температури (750 мс);
- читання даних датчика.

В певних інтервалах початку повільного циклу ми можемо виконати ініціалізацію вимірювання, а в останніх інтервалах - зчитати результат. Пауза на перетворення температури 750 мс відпрацюється автоматично.

Операції циклу 1 с можна додавати в програму за допомогою конструкції:

```
if (cycle20mcCount == 25) {
//операції інтервалу 25
}
```

## 2.2.6 Реалізація програми вимірювання вихідних параметрів контролера елемента Пельтьє

Для керування елементом Пельтьє регулювання параметрів вимагає попереднього їх вимірювання, зокрема, потужності на елементі Пельтьє. Тому

першим завданням програми є вимірювання електричних параметрів на виході контролера, а саме напруги, струму та потужності.

Перший варіант програми, який вимірює ці параметри і передає їх на комп'ютер наведено у Додатку В.

Програма організована відповідно до структури описаної вище.

Визначено переривання по таймеру 2 з періодом 2 мс. У ньому відбувається читання аналогових входів і підсумовування кодів АЦП в змінних SumU і SumI. Через кожні 20 мс (10 вибірок) змінні перевантажуються в averageU і averageI, де містяться середні значення результатів вимірювання за 20 мс і помножені на 10. Перезавантаження супроводжується установкою ознаки flagReady в активний стан.

В основному циклі loop () виділені програмні блоки:

- цикл 20 мс;
- виконання розподілених операцій в циклі 1 с.

У циклі 20 мс відбувається:

- обчислення напруги;
- обчислення струму;
- обчислення потужності.

1) Обчислення струму здійснюється наступним чином:

$$\text{measureI} = (\text{float})(\text{averageI} / \text{MEASURE\_PERIOD}) * \text{coeffI};$$

Середнє значення коду АЦП ділимо на 10, явно перетворюємо в float і множимо на масштабний коефіцієнт. Коефіцієнт обчислюється за формулою:

$$\text{coeffI} = \text{Удж.он} / \text{R8} / 1024 \text{ А/од. АЦП},$$

де Удж.он – значення напруги джерела опорної напруги, що відповідає 1,1 В;

R8 – опір струмового шунту (0,05 Ом).

Коефіцієнт показує, який струм відповідає одній одиниці коду АЦП.

При цьому вимірюється струм, який споживається регулятором, а не струм, що проходить через елемент Пельтьє.

2) Обчислення напруги здійснюється наступним чином:

$$\text{measureU} = \text{powerU} - (\text{float})(\text{averageU} / \text{MEASURE\_PERIOD}) * \text{coeffU};$$

На аналоговий вхід плати через резисторний подільник надходить напруга з нижнього виводу елемента Пельтьє. На самому елементі напруга обчислюється як різницю між напругою джерела живлення і вимірним значенням. Масштабний коефіцієнт обчислюється за формулою:

$$\text{coeffU} = U_{\text{ион}} / R1 * (R1 + R2) / 1024 \text{ В/ед. АЦП}$$

де R1 і R2 – опори резисторів подільника напруги, в розробленій схемі вони становлять 820 і 1200 Ом.

Коефіцієнт показує, яка напруга відповідає одній одиниці коду АЦП.

3) Потужність обчислюється як добуток напруги джерела живлення на споживаний регулятором струм:

$$\text{measureP} = \text{powerU} * \text{measureI};$$

Ці вимірні значення `measureU`, `measureI` і `measureP` будуть використовуватися в інших програмних блоках. Ці значення необхідні для відлагодження модуля вимірювання вихідних параметрів контролера.

## 2.2.7 Передача даних на комп'ютер

Відлагодження програми буде реалізовано через монітор послідовного порту Arduino IDE. Обрано текстовий протокол передачі даних.

Кожен параметр передається в форматі:

- буква, символічне позначення параметра;
- символ "=";
- числове значення параметра;
- пробіл.

Дані передаються на комп'ютер, починаючи з 25 інтервалу:

```
if (cycle20mcCount == 25) {
    //----- інтервал 25, передача інформації на комп'ютер
    Serial.print("U="); Serial.print(measureU, 2); // напруга
    Serial.print(" I="); Serial.print(measureI, 2); // струм
    Serial.print(" P="); Serial.print(measureP, 2); // потужність
    Serial.println(" ");
}
```

В результаті буде виведений рядок:

```
U=8.97 I=0.26 P=3.12
```

Таким чином, було розроблено основу програми з усіма часовими циклами, а також реалізовано і перевірено модуль вимірювання вихідних параметрів (measureU - напруга на навантаженні; measureI - струм споживання регулятора; measureP - потужність на навантаженні).

Також визначено протокол передачі даних на комп'ютер і реалізовано передачу виміряних вихідних параметрів.

## 2.2.8 Оцінка якості роботи регулятора термоелектричного модуля Пельтьє

Охолоджуюча здатність елемента Пельтьє пов'язана з електричною потужністю на елементі. Тому регулювання температури має проводитися за рахунок зміни електричної потужності на модулі Пельтьє, тобто для виконання завдання потрібен регулятор саме потужності, а не напруги чи струму.

Регулятор це пристрій, який підтримує певні параметри об'єкта на заданому рівні. Регулятор стежить за станом об'єкта і здійснює керуючі впливи для того, щоб забезпечити стабільність параметра регулювання.

У будь-якому регуляторі треба чітко виділити, що регулюється і за допомогою чого це здійснюється. Тобто регульований параметр і регулюючий елемент.

Для регулятора потужності, що розробляється, регульований параметр - електрична потужність на навантаженні, регулюючий елемент - широтно-імпульсний модулятор.

Переважає більшість регуляторів використовують зворотний зв'язок для того, щоб дізнатися про стан регульованого параметра і компенсувати зовнішні збурення.

У нашому випадку на регулятор надходить виміряна потужність з виходу системи та задане значення потужності. За певним алгоритмом регулятор обчислює значення коефіцієнта заповнення ШІМ, за рахунок якого і змінюється потужність на навантаженні.

Критеріями оцінки якості регулятора є:

- швидкість регулювання (швидкодія) - час зменшення помилки регулювання до заданої величини;
- точність регулювання - помилка параметра регулювання в усталеному стані;
- стійкість регулятора - відсутність коливань параметра регулювання.

Алгоритм регулювання буде здійснюватися програмним способом. Це означає, що в системі буде дискретний за часом регулятор. Управління буде



відбуватися в окремі моменти часу. У програмі контролера було визначено часову дискретність регулятора потужності 20 мс.

Необхідно підтримувати значення потужності на виході, змінюючи ШІМ. Найпростіший спосіб - це: порівняти задану потужність з виміряною; якщо задане значення більше реального, то ШІМ збільшити на 1; якщо задане значення менше реального, то ШІМ зменшити на 1.

Такий підхід буде працювати, але якість регулювання буде низькою.

Для більш якісного регулювання необхідно додавати до поточного значення ШІМ величину, що залежить від помилки параметра регулювання.

Математично закон управління інтегрального регулятора виглядає так:

$$K_w = K_i * \int e(t) dt$$

Де  $K_w$  - коефіцієнт заповнення ШІМ;

$K_i$  - інтегральний коефіцієнт;

$e(t)$  - помилка неузгодженості, тобто різниця між заданим і реальним значеннями регульованого параметра.

Вихідна функція інтегрального регулятора пропорційна інтегралу за часом від відхилення регульованого параметра.

Інтегральний регулятор є регулятором послідовного наближення. При великій помилці він змінює ШІМ великими кроками, при маленькій помилці він компенсує її повільно. Помилка накопичується в інтеграторі, і якою б малою вона не була, все одно з часом вона вплине на регулюючий елемент.

У вигляді, близькому до дискретної реалізації, схема інтегрального регулятора виглядає наступним чином (рис. 2.10).

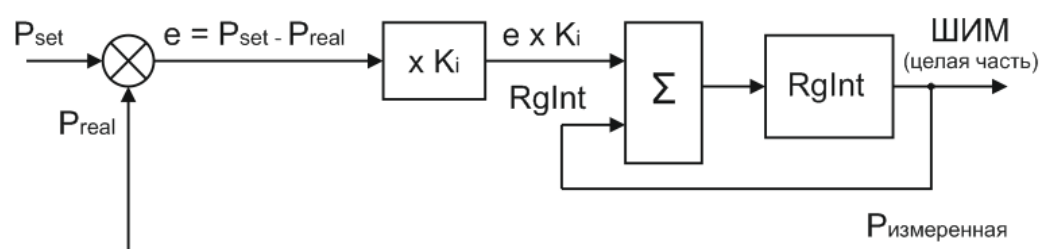


Рисунок 2.10 – Схема інтегрального регулятора

Обчислюється помилка неузгодженості  $e$  як різниця між заданою потужністю  $P_{set}$  і виміряної на виході  $P_{real}$ :

$$e = P_{set} - P_{real}.$$

Помилка неузгодженості  $e$  множиться на інтегральний коефіцієнт  $K_i$  і накопичується в регістрі-інтеграторі  $R_{gl}$ .

Цілі розряди регістра надходять на широтно-імпульсний модулятор.

Як правило, інтегратор має досить велику розрядність з дробовою частиною, а ШІМ може сприймати тільки цілі значення. Значення менше одиниці поступово накопичуються в інтеграторі і переходять в цілу частину, а значить і в ШІМ. Це дозволяє при малих помилках неузгодженості або малому значенні  $K_i$  зменшувати швидкодію регулятора. Малі значення будуть довго переходити в цілу частину.

Інтегральні регулятори мають:

- високу точність;
- низьку швидкість регулювання;
- посередню стійкість, яка залежить від швидкості регулювання.

Для регулятора потужності на елементі Пельтьє було обрано саме інтегральний закон управління з наступних міркувань.

Елемент Пельтьє змінює свої параметри в залежності від температури, але відбувається це повільно, тому швидкий регулятор не потрібен;

Різка зміна потужності на елементі Пельтьє веде до деградації напівпровідникових кристалів модуля. Через різкі зміни температури в місцях спайки напівпровідників виникають механічні напруги, що веде до зниження ефективності елемента і навіть виходу його з ладу. Тому як би швидко не змінював регулятор температури задане значення, для регулятора потужності необхідно, щоб зміна потужності на елементі Пельтьє відбувалося плавно.

Конденсатор великої ємності, що є на виході регулятора, також краще заряджати повільно.

Наприклад, при ввімкненні живлення при неохолодженій камері охолоджувальної установки регулятор температури повинен включити елемент на повну потужність. Необхідно, щоб це відбулося не миттєво, а протягом декількох секунд.

Всім цим вимогам ідеально підходить саме інтегральний регулятор. Більш того коефіцієнт  $K_i$  ми спеціально знизимо, щоб забезпечити повільну зміну потужності на навантаженні.

Регулятор додамо у раніше згадану програму, в якій вже створили структуру програми контролера і реалізували вимірювання напруги, струму і потужності на навантаженні.

Нам потрібні такі змінні і константи:

```
float measureP; // виміряна потужність на навантаженні, Вт
```

Ця змінна в програмі вже є.

Додамо:

```
float setPower; // задана потужність
```

```
float regPwrInt = 0; // інтегральне ланка регулятора потужності
```

```
#define koeffRegPwrInt 0.05 // інтегральний коефіцієнт регулятора  
потужності
```

Сам регулятор виглядає наступним чином:

```
regPwrInt = regPwrInt + (setPower - measureP) * koeffRegPwrInt;
```

Також треба перевантажити цілу частину з інтегратора в ШІМ:

```
analogWrite (9, (unsigned int) regPwrInt); // ШІМ
```

Ця програма вже працює. Можна тимчасово поставити потужність рівною, наприклад, 5 Вт і перевірити роботу регулятора в циклі 20 мс.

Але не вистачає ще деяких операцій.

Ми працюємо з реальною схемою. Припустимо, задана потужність, яку регулятор не здатний забезпечити, наприклад, 50 Вт. Регулятор повинен сформувати максимальний ШІМ. Але інтегральна ланка регулятора буде продовжувати збільшуватися. Коли воно перевищить максимально-допустиме значення ШІМ (у нас це 255), ШІМ перестане правильно працювати, швидше скинеться в 0 і знову почне збільшуватися. Тобто необхідно ввести обмеження інтегральної ланки. Вона не повинна бути більше максимального значення ШІМ і не допустимо, щоб вона стала негативною.

```
if (regPwrInt <0) regPwrInt = 0; // обмеження знизу
if (regPwrInt > MAX_PWM) regPwrInt = MAX_PWM; // обмеження зверху
```

Необхідно врахувати ще одну особливість роботи з ШІМ. Імпульси на виході ШІМ перемикають реальний ключ. При зменшенні коефіцієнта заповнення імпульси включення ключа можуть стати дуже короткими. Для нашого ШІМ значення 1 відповідає імпульсу тривалістю 62,5 нс. За такий короткий час ключ не встигає відкриватися повністю і правильно працювати не буде. Тому для управління ШІМ необхідно заборонити занадто коротких імпульсів управління.

Введемо два часових відрізка, на яких заборонимо роботу ШІМ. Один відрізок поблизу нуля, другий близько максимального значення. Загальноприйнято тривалість цих відрізків називати "мертвим часом" ШІМ (dead time). Алгоритм простий:

- якщо значення ШІМ менше "мертвого часу", то ШІМ дорівнює 0.
- Якщо значення ШІМ більше різниці максимального ШІМ і "мертвого часу", то ШІМ дорівнює максимальному значенню.

Реалізація цього алгоритму в програмі виглядає так:

```

unsigned int pwm = (unsigned int) regPwrInt; // переведення в ШІМ
if (pwm <DEAD_TIME) pwm = 0;
if (pwm> (MAX_PWM - DEAD_TIME)) pwm = MAX_PWM;
analogWrite (9, pwm); // ШІМ

```

В проєкті було задано "мертвий час" рівним 500 нс:

```
#define DEAD_TIME 8 // мертво час ШІМ (* 62,5 нс)
```

Також треба додати швидке вимкнення регулятора. Вище було сказано, що регулятор повинен повільно змінювати потужність на елементі Пельтьє. Але це не стосується аварійного вимкнення. При `setPower = 0` вимикати регулятор треба миттєво.

Повністю програмний блок інтегрального регулятора потужності виглядає так:

```

//----- регулятор потужності
if (setPower! = 0) {
    regPwrInt = regPwrInt + (setPower - measureP) * koefRegPwrInt;
    if (regPwrInt <0) regPwrInt = 0; // обмеження знизу
    if (regPwrInt> MAX_PWM) regPwrInt = MAX_PWM; // обмеження
зверху
    // мертвий час ШІМ
    unsigned int pwm = (unsigned int) regPwrInt; // переклад в ШІМ
    if (pwm <DEAD_TIME) pwm = 0;
    if (pwm> (MAX_PWM - DEAD_TIME)) pwm = MAX_PWM;
    analogWrite (9, pwm); // ШІМ
}
else { // вимикання

```

```
regPwrInt = 0;  
analogWrite (9, 0); // ШІМ  
}
```

Ще було додано до блоку передачі даних на комп'ютер значення інтегратора. Його ціла частина відповідає коефіцієнту заповнення ШІМ, тому значення коефіцієнта на комп'ютер було вирішено не передавати.

```
Serial.print ( "p ="); Serial.print (regPwrInt, 2); // інтегральна ланка  
регулятора потужності
```

Таким чином, нами було реалізовано схему керування контролером елемента Пельтьє на базі мікроконтролера PIC та Arduino. Аналіз показав, що для побутового використання холодильної установки з елементом Пельтьє більш доцільним є використання плати Arduino.

## 3 НАДІЙНІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ОХОЛОДЖЕННЯ

### 3.1 Загальні рекомендації

Термоелектричні модулі охолодження вважаються високонадійними компонентами завдяки їх твердотільній конструкції. Для більшості застосувань вони забезпечуватимуть тривалий, безпроблемний сервіс. В процесі експлуатації було встановлено, що деякі термоелектричні модулі використовувались безперервно протягом двадцяти і більше років, і термін служби модуля часто перевищує термін служби відповідного обладнання. Однак конкретну надійність термоелектричних приладів, як правило, важко визначити, оскільки рівень відмов в значній мірі залежить від конкретного застосування. Так, для обладнання, що має порівняно постійне охолодження, де до модуля подається потужність постійного струму більш-менш безперервно і рівномірно, надійність термоелектричного модуля є надзвичайно високою. Середній час напрацювання на відмову (СЧНВ), що перевищує 200 000 годин, у таких випадках не рідкість, і це значення СЧНВ, як правило, вважається галузевим стандартом. З іншого боку, при застосуванні термоелектричних модулів в обладнанні із циклічним коливанням температур, показники СЧНВ значно гірші, особливо коли термоелектричні модулі працюють в умовах із циклічним зростанням температури до високих значень.

Однозначні ствердження про питання надійності термоелектричного модуля є неможливими, оскільки існує безліч параметрів та умов застосування, які вплинуть на кінцевий результат. Незважаючи на те, що дані про надійність є дійсними для умов, в яких проводилося випробування, вони не обов'язково можуть застосовуватися до інших конфігурацій. Методи складання та монтажу модуля, системи контролю живлення та технології контролю температури, а також температурні профілі, разом з безліччю зовнішніх факторів, можуть поєднуватись, створюючи показники відмов від надзвичайно низьких до дуже високих. Намагаючись надати користувачам певну основну інформацію про



термін служби термоелектричного модуля та допомогти інженерам у розробці систем для оптимальної надійності, ми проаналізували декілька тестових програм для отримання необхідних даних про надійність. На сьогоднішній день результати випробувань представлені для кількох ситуацій, які можуть бути корисними для користувачів [9].

Загальні вимоги до належного встановлення термоелектричних модулів будуть описані далі. Важливо, щоб модулі встановлювались відповідно до цих загальних вимог, щоб мінімізувати ймовірність передчасного виходу модуля з ладу через неправильну техніку складання. Деякі фактори, пов'язані з установкою, які можуть вплинути на надійність модуля, включають наступні показники.

3.1.1 Термоелектричні модулі демонструють відносно високу механічну міцність у режимі стиснення, але міцність на зсув порівняно низька. Охолоджувач термоелектричного модуля не повинен проектуватися в систему, де він служить основним опорним елементом механічної конструкції. Крім того, у випадках, коли будуть наявні сильні удари та вібрація, термоелектричний модуль охолодження повинен бути встановлений на стиснення, тобто встановлений методом затиску. При правильному монтажі термоелектричні охолоджувачі успішно відповідають вимогам до ударів та вібрацій в аерокосмічній, військовій та подібних областях застосування.

3.1.2 Хоча максимально рекомендоване навантаження на стиснення для термоелектричних модулів становить  $15 \text{ кг/см}^2$  площі поверхні модуля, випробування показали, що стиснення більше  $75 \text{ кг/см}^2$  зазвичай може застосовуватися до більшості модулів, не викликаючи збою. Важливо забезпечити, щоб при встановленні модулів методом затискання підтримувався достатній тиск, щоб модуль не був «вільним», завдяки чому його можна було б легко переміщати, застосовуючи невелику бокову або поперечну силу. Крихкі модулі можуть становити особливу проблему, коли кілька модулів згруповані в одному охолоджувальному вузлі. У цій ситуації відсутність належної сили затискання може призвести як до зниження продуктивності охолодження, так і

до раннього виходу модуля з ладу. Коли в масив встановлено декілька модулів, рекомендуються модулі з точним допуском до висоти  $\pm 0,03$  мм. У всіх випадках сила затискання повинен застосовуватися рівномірно, а сполучні поверхні повинні бути рівними.

3.1.3 Якщо конструкція має консольну будову, велика непідтримувана маса не повинна бути безпосередньо прикріплена до холодної поверхні модуля, щоб запобігти можливим руйнуванням деталей модуля під впливом значного механічного удару. Якщо йдеться про велику масу, термоелектричні модулі слід затискати між радіатором і об'єктом із великою масою, або проміжною плитою із матеріалів із високою теплопровідністю, на якій цей об'єкт встановлений. При такому розташуванні затискні гвинти ефективно збільшать міцність на зсув загальної механічної системи.

3.1.4 Не можна допускати потрапляння вологи всередину термоелектричного модуля, щоб запобігти як зниженню охолоджувальних характеристик, так і можливій корозії матеріалів модулів за рахунок електрохімічної дії або електролізу. При охолодженні нижче точки роси слід забезпечити герметизацію вологи або на самому модулі, або між радіатором та охолоджуванним об'єктом в зоні, що оточує термоелектричний модуль. Наприклад, силіконовий каучук RTV може бути використаний для безпосереднього ущільнення термоелектричного модуля. Гнучка ізоляційна стрічка або листовий матеріал із пінопластової піни у поєднанні із каучуком для заповнення невеликих проміжків, може використовуватися для ущільнення між холодним предметом та радіатором.

3.1.5 Якщо застосування модулів передбачає значні перепади температури або теплову циклічність, термоелектричні модулі не слід встановлювати за допомогою припою або епоксидної смоли, завдяки чому об'єкт жорстко прикріплений до модуля. Якщо температурні коефіцієнти лінійного розширення всіх компонентів системи не є близькими, жорстке зчеплення в поєднанні з циклічним зміщенням температури часто призводить до раннього виходу модуля з ладу через створені теплові напруження. Тверде

зчеплення з гарячою стороною модуля, як правило, є меншою проблемою, оскільки температура гарячої сторони зазвичай є відносно постійною під час роботи. Коли йдеться про значні коливання температури або циклічність температур, рекомендується встановлювати модулі затисканням із використанням гнучкого кріпильного матеріалу, такого як термопаста або фольга з графіту або індію. Крім того, не рекомендується жорстке кріплення з обох сторін модулів для пристроїв розміром більше 15 мм.

3.1.6 Методи регулювання температури також впливають на надійність термоелектричного модуля. Лінійне або пропорційне керування завжди слід вибирати серед методів вмикання/вимикання, коли потрібно продовжити термін служби модуля.

### **3.2 Вплив високих температур на надійності термоелектричних модулів**

Виходи з ладу термоелектричного модуля, як правило, можна класифікувати на дві групи: катастрофічні відмови та відмови через деградацію. Відмови через деградацію, як правило, мають тривалий характер і зазвичай спричинені зміною параметрів напівпровідникового матеріалу або збільшенням електричного опору контакту. Висока температура може призвести до зміни параметрів матеріалу і, отже, до зниження термоелектричних характеристик. Для вивчення цього ефекту було проведено тест в роботі [10]. Термоелектричні модулі серії Ferrotec 95 піддавались тривалому безперервному впливу підвищеної температури (150 °C) в нормальній атмосфері повітря. Протягом періоду тестування відповідні параметри модуля регулярно вимірювали та реєстрували. Одним з параметрів, який є важливим показником загальної роботи модуля, є максимальна різниця температур ( $\Delta t_{\max}$ ). Цей параметр відстежувався протягом 42-місячного періоду, середнє значення було показано на графіку (рис. 3.1). Можна бачити, що невелике (2,5%) зниження  $\Delta t_{\max}$  зі зниженням швидкості спадання відбулося в перші 12 місяців впливу високої температури. Однак в інші 30 місяців

додаткове зниження  $\Delta t_{\max}$  становило лише близько 1,3%, оскільки характеристики напівпровідникового матеріалу стабілізувались.

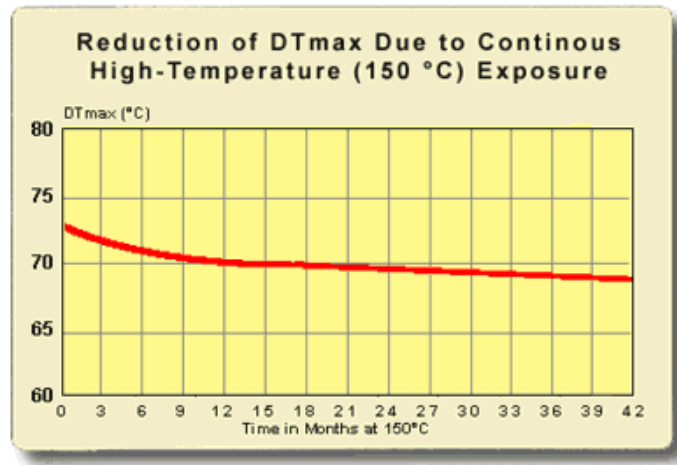


Рисунок 3.1 – Зменшення максимальної різниці температур в часі під дією довготривалих впливів високих температур

### 3.3 Вплив температурних циклів на надійність термоелектричних модулів

Безперервний тепловий цикл термоелектричних модулів у широкому діапазоні температур фактично піддає модуль критичному режиму роботи, особливо коли модулі піднімаються до відносно високої температури в одному кінці циклу. У більшості випадків частота відмов модулів вища для цього режиму роботи, ніж для будь-якого іншого робочого стану. Основою більшості відмов через температурні цикли є неминуча невідповідність температурних коефіцієнтів лінійного розширення різних матеріалів та компонентів модулів. Невідповідність керамічних і напівпровідникових температурних коефіцієнтів лінійного розширення викликає механічні напруження, які можуть спричинити руйнування напівпровідникових гранул та паяних з'єднань, коли модуль нагрівається або охолоджується. На додаток до зміни абсолютної температури модулів Пельтьє, теплові градієнти на пристрої та швидкі темпи зміни його температури спричиняють додаткові механічні напруження. Робота при екстремальних температурах, з великими температурними градієнтами і при високих швидкостях зниження температури створює підвищені механічні

напруження, що може спричинити вихід пристрою із ладу. Такі відмови мають, як правило, катастрофічний характер, але певна деградація зазвичай може спостерігатися до відмови.

У зв'язку із вищевикладеним, необхідно визначити тепловий цикл. Багато термоелектричних застосувань передбачають періодичне підвищення та зниження контрольної температури, іноді в досить широкому діапазоні температур. Хоча часто не існує чітко визначеної межі між циклічним та нециклічним застосуванням обладнання, тепловий цикл зазвичай вважається режимом, при якій температура регулярно та більш-менш постійно підвищується та знижується протягом тривалого періоду експлуатації. Застосування обладнання у циклічному режимі зазвичай передбачає автоматичний або машинний контроль відхилення температури на відміну від ручного керування. Якщо температура пристрою декілька разів на день зростає і спадає, це, як правило, не вважається режимом роботи у теплових циклах.

Щонайменше чотири фактори пов'язані з частотою відмов при тепловому циклі:

- загальна кількість циклів;
- загальний температурний діапазон за цикл;
- верхня температурна межа циклу;
- швидкість зміни температури.

Найвища надійність та термін служби модуля спостерігається, коли кількість циклів невелика, або діапазон розкиду температури вузький, верхня межа температури відносно низька і швидкість зміни температури мінімізована. І навпаки, велика кількість циклів у широкому температурному діапазоні з швидкими темпами змін і високим значенням призводить до значно нижчого ресурсу модуля.

Важливо зазначити, що абсолютний термін служби модуля залежить від загальної кількості циклів, а не загальний час, необхідний для накопичення цих циклів. Отже, при обговоренні впливу теплових циклів на СЧНВ найкраще вказувати з точки зору кількості циклів, а не годин роботи.

Тип модуля, що використовується в теплових циклічних програмах, також важливий щодо рівня відмов. Модулі, розраховані на більш високі максимальні робочі температури, забезпечують значно кращий термін служби, ніж прилади з нижчим номіналом. Дослідження показали, що це висновок є достовірним навіть незважаючи на те, що верхня температура циклу значно нижче максимально допустимої температури модуля. Модулі, розраховані на навіть нижчі максимальні робочі температури, слід використовувати лише для відносно низьких температурних циклів.

Слід зазначити, що ще два фактори також можуть впливати на СЧНВ, пов'язаний із температурними циклами. Модулі із меншими габаритами демонструють більшу стабільність через менший розкид температур на їхній поверхні. Наявні дані, що дозволяють припустити, що модулі розміром 30 мм<sup>2</sup> або менше мають кращу надійність (стосовно температурних циклів), ніж фізично більші модулі. Теплові індуковані механічні напруження більші у великогабаритних модулях, і такі модулі, як правило, мають більшу кількість з'єднань. Це призводить до набагато більшої кількості окремих паяльних з'єднань, на які може впливати механічна втома від термічного напруження.

Способи кріплення та загальні деталі монтажу є важливими факторами, коли використання термоелектричних модулів передбачає температурну циклічність.

Також слід зазначити наступний важливий спосіб використання цих рекомендацій. Через механічні напруження, що виникають в термоелектричному модулі, температурний цикл виявився ефективною технікою для «вигорання» - спеціального виведення із ладу пристроїв. Піддаючи термоелектричні пристрої контрольованій програмі температурних циклів, можна виявити модулі із потенційно незадовільними характеристиками, тим самим зменшуючи ймовірність відмов на ранніх етапах роботи пристроїв. Очевидно, що з цією операцією пов'язані певні витрати, але такий підхід може бути корисним, коли потрібна надзвичайно висока надійність пристроїв, що проектуються для відповідальних систем.

### **3.4 Вплив циклів вмикання/вимикання потужності на надійність термоелектричних модулів**

Галузевий стандарт для СЧНВ термоелектричного модуля становить мінімум 200 000 годин. Це значення СЧНВ базується на відносно стабільному режимі роботи модуля, коли живлення системи час від часу (зазвичай кілька разів на день) вмикається та вимикається. У деяких системах живлення вмикається і вимикається частіше, особливо там, де використовується термостатичний контроль температури.

Необхідно відзначити, що більшість звичайних терморегуляторів мають відносно великі різниці температур у режимі вмикання/вимикання. Через це може виникати ситуація температурного циклу, коли температура термоелектричного модуля постійно змінюється між верхньою та нижньою диференціальними межами. Оскільки відомо, що температурний цикл зменшує термін служби термоелектричних модулів, використання традиційних схем термостатичного регулювання температури не рекомендується для систем, де вимагається висока надійність.

### **3.5 Вплив зовнішніх дій на надійність термоелектричних модулів**

Термоелектричні модулі часто встановлюються в системах, що зазнають значних ударів, вібрацій та/або інших потенційно шкідливих умов навколишнього середовища. Як зазначалося вище, модулі витримують помірні сили стиснення, але міцність на зсув відносно низька. Однак, коли термоелектричні модулі належним чином змонтовані в межах механічного вузла, вони безперешкодно витримують значні механічні навантаження.

Низькі температури, що виникають в процесі роботи холодильників Пельтьє надлишкової потужності, сприяють конденсації вологи з повітря. Це становить небезпеку для електронних компонентів, так як конденсат може викликати короткі замикання між елементами. Для виключення даної небезпеки доцільно використовувати холодильники Пельтьє оптимальної



потужності. Виникне конденсація чи ні, залежить від декількох параметрів. Найважливішими є: температура навколишнього середовища (в даному випадку температура повітря усередині корпусу пристрою чи системи), температура охолоджуваного об'єкту і вологість повітря. Чим тепліше повітря всередині корпусу і чим більше вологість, тим вірогідніше відбудеться конденсація вологи і подальший вихід з ладу електронних елементів комп'ютера. Табл. 3.1 ілюструє залежність температури конденсації вологи на охолоджуваному об'єкті залежно від вологості і температури навколишнього повітря. Використовуючи цю таблицю, можна встановити, чи існує небезпека конденсації вологи чи ні. Наприклад, якщо зовнішня температура 25 °С, а вологість 65%, то конденсація вологи на охолоджуваному об'єкті відбувається при температурі його поверхні нижче 18 °С [11].

Таблиця 3.1 – Температура поверхні охолоджуваного об'єкта, при якій відбувається конденсація вологи

Температура оточуючого середовища, °С	Вологість, %								
	30	35	40	45	50	55	60	65	70
30	11	13	15	15	18	20	21	23	24
29	10	12	14	14	18	19	20	22	23
28	9	11	13	13	17	18	20	21	22
27	8	10	12	12	16	17	19	20	21
26	7	9	11	11	15	16	18	19	20
25	6	9	11	11	14	15	17	18	19
24	5	8	10	10	13	14	16	17	18
23	5	7	9	9	12	14	15	16	17
22	4	6	8	8	11	13	14	15	16
21	3	5	7	7	10	12	13	14	15
20	2	4	6	6	9	11	12	13	14

Також механічні напруження можуть спричинити розвиток тріщин у паяних з'єднаннях модуля Пельтьє та напівпровідникових гранулах. Заміна паяних з'єднань на холодній стороні модуля електропровідною смолою покращує продуктивність модуля, надійність та термін служби циклу завдяки своїй унікальній конструкції, яка протидіє наслідкам термічної втоми. Ця смола більш механічно сумісна з припоєм, і таким чином допомагає мінімізувати напруження та руйнування, що виникають у традиційних конструкціях модулів Пельтьє. Решта паяних з'єднань рекомендується виготовляти з високотемпературним припоєм із сурми та олова (SbSn, 235 °C), а не з більш поширеним і нижчим температурним припоєм із вісмуту та олова (BiSn, 138 °C). Олово-сурм'яний припій переносить механічні навантаження краще, ніж припій з вісмутом, що сприяє підвищенню надійності модуля Пельтьє [12].

Напівпровідникові гранули, паяні з'єднання та металізовані струмоведучі доріжки в модулях Пельтьє можуть піддаватися забрудненню із зовнішніх джерел, що також може призвести до виходу із ладу пристрою. Загальним рішенням для мінімізації впливу забруднення є нанесення шару герметика по периметру модуля між двома керамічними пластинами. Можна рекомендувати силіконовий каучук у якості герметика через механічну відповідність матеріалу, але у важких робочих умовах силіконовий каучук може виявитися неефективним для пароізоляції. Якщо пристрій працює в умовах присутності високої концентрації пари, в якості герметика можна використовувати епоксидну смолу, проте вона не є настільки механічно сумісною, як силіконовий каучук. Тому вибір герметика має здійснюватись інженером-конструктором при проектуванні пристроїв із елементами Пельтьє з урахуванням всіх особливостей роботи.

### **3.6 Стандартні процедури контролю надійності**

Виробники термоелектричних приладів самостійно розробили процедури контролю якості та випробувань, щоб гарантувати, що продукція відповідає

опублікованим специфікаціям та має відповідні стандарти виробництва. Хоча в галузі мало офіційних стандартів, існують певні мінімально визнані критерії, яких дотримується більшість найбільших виробників термоелектричних модулів.

Досвід показує, що оптимальна програма операцій контролю надійності включають:

- електричні та механічні випробування / перевірку продукції перед відправкою замовнику;
- випробування та скринінг в процесі, використовуючи або перевірку всіх виробів, або перевірку окремих модулів згідно з MIL-STD-105 [13];
- використання методів статистичного управління процесами для різних критичних операцій.

Бажано, щоб загальна програма забезпечення якості структурована відповідно до MIL-Q-9858A [14].

Вище було вказано на значну залежність надійності термоелектричного модуля від умов застосування. Дотримуючись деяких основних рекомендацій та знаючи, як певні фактори мають тенденцію впливати на термін служби модуля, розробники повинні мати можливість оптимізувати надійність системи. Цього можна досягти як проведенням всебічного аналізу і моделюванням всіх відповідних параметрів, так і за допомогою емпіричного підходу для визначення надійності модулів у системах із особливими параметрами, характеристиками та умовами експлуатації.

## 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ

### 4.1 Планування науково-дослідницької роботи

В даній магістерській роботі присвячено увагу дослідженню питання надійності термоелектричних модулів на основі елементів Пельтьє.

Основна умова раціонального планування НДР - скорочення термінів виконання розробок при мінімальних витратах трудових, матеріальних і грошових ресурсів.

Для цього необхідно вирішити такі завдання з планування НДР: визначення трудомісткості та тривалості; складання мережного графіка виконання; визначення витрат на виконання НДР.

### 4.2 Визначення трудомісткості та тривалості НДР

Весь комплекс науково-дослідної роботи можна розділити на типові етапи. По кожному етапу вказуються виконавці і трудомісткість або тривалість виконання робіт.

Трудомісткість НДР розраховується в нормо-годинах або людино-днях витрат робочого часу основних виконавців і залежить від складності розробки та ступеня її новизни, кваліфікації виконавців, наявності у них навичок дослідницької роботи, від використовуваних матеріалів, вимог надійності, технічних умов комплектуючих схем і т. д.

Розрахунок тривалості виконання НДР і кожного її етапу знаходимо відповідно до кількості виконавців по кожному етапу за формулою:

$$T_{ц} = \frac{Q}{R \cdot K_{в.н.}}, \quad (4.1)$$

де  $T_{ц}$  – тривалість циклу, днів;

$Q$  – трудомісткість робіт, люд.-годин;

$R$  – кількість виконавців, людей;

$K_{в.н.}$  – плановий коефіцієнт виконання норм на відрядження роботах,

$K_{в.н.} = 1,05 \dots 1,1$ .

Тривалість виконання НДР та кожного з її етапів наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1- Тривалість етапів НДР

Етап НДР	Трудомісткість		Виконавці		Тривалість днів
	Люди но-днів	% по підсум- ку	Спеціальність	Кіль- кість людей	
1	2	3	4	5	6
1. Отримання технічного завдання	2	2,4	Ведучий інженер	1	2
2. Огляд літературних джерел	3	3,52	Інженер	1	3
3. Обґрунтування актуальності	3	6,52	Ведучий інженер	1	3
4. Огляд застосування термоелектричних модулів	4	7,7	Інженер	1	4
5. Аналіз елементної бази	4	4,7	Інженер - технолог	1	4
6. Розробка конструкції контролера на базі МК PIC	6	10,06	Інженер – конструктор	1	9
7. . Розробка конструкції контролера на базі Arduino	6	8,06	Інженер – конструктор	1	9
8. Розробка інструкції з експлуатації під час запуску обладнання	4	6,7	Інженер - технолог	1	6
9. Дослідження роботи контролера для термоелектричних модулів	7	8,7	Інженер - технолог	1	10

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4	5	6
10. Опис програмного забезпечення	5	4,7	Інженер – проектувальник	1	4
11. Аналіз отриманих результатів	6	11,76	Ведучий - інженер	1	10
12. Розробка рекомендацій щодо підвищення надійності термоелектричних модулів	10	12,26	Інженер – конструктор	1	10
13. Визначення кошторисної вартості проведення робіт	4	4,7	Консультант з економіки.	1	4
14. Розробка питань з охорони праці	4	4,7	Консультант по ОТ	1	4
15. Висновки	3	3,52	Інженер	1	3
Разом	85	100	-	7	85

У ряді випадків важко встановити загальну тривалість робіт. Це пов'язано з елементами невизначеності в процесі виконання більшості робіт. Їх трудомісткість і тривалість залежить від безлічі факторів, передбачити які неможливо. У таких випадках використовують імовірнісні оцінки часу. Ці оцінки зазвичай виражаються в днях і є вихідними для розрахунку очікуваного часу виконання етапу робіт за формулою:

$$t_{ie} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5}, \quad (4.2)$$

де  $t_{ож}$  - очікувана оптимальна оцінка часу виконання роботи, днів;

$t_{\min}$  - мінімально необхідний час на виконання роботи по найбільш сприятливих умов, днів;

$t_{\max}$  - максимальні витрати часу на виконання роботи при несприятливих умовах, днів.

Ступінь правильності визначення  $t_{ож}$  перевіряють розрахунком дисперсії (розкиду між мінімальною і максимальною оцінками часу виконання робіт), яка визначається за формулою:

$$\sigma^2(t) = \left(\frac{t_{\max} - t_{\min}}{5}\right)^2 \quad (4.3)$$

Розрахунок  $\sigma^2(t)$  и  $t_{ож}$  наведений в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Оцінка тривалості і трудомісткості робіт

Етапи НДР	Оцінка часу, днів			Дисперсія	Виконавці	
	min	max	оч		Спеціальність	Кількість людей
1	2	3	4	5	6	7
1. Отримання технічного завдання	1	3	2	0,16	Ведучий інженер	1
2. Огляд літературних джерел	2	4	3	0,16	Інженер	1
3. Обґрунтування актуальності	2	4	3	0,16	Ведучий інженер	1
4. Огляд застосування термоелектричних модулів	3	5	4	0,16	Інженер	1
5. Аналіз елементної бази	3	5	4	0,16	Інженер - технолог	1
6. Розробка конструкції контролера на базі МК PIC	5	7	6	0,16	Інженер - конструктор	1
7. . Розробка конструкції контролера на базі Arduino	5	7	6	0,16	Інженер - конструктор	1

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
8. Розробка інструкції з експлуатації під час запуску обладнання	3	5	4	0,16	Інженер - технолог	1
9. Дослідження роботи контролера для термоелектричних модулів	9	11	10	0,16	Інженер - технолог	1
10. Опис програмного забезпечення	3	5	4	0,16	Інженер - проектувальник	1
11. Аналіз отриманих результатів	3	5	4	0,16	Інженер - конструктор	1
12. Розробка рекомендацій щодо підвищення надійності термоелектричних модулів	3	5	4	0,16	Консультант з економіки	1
13. Визначення кошторисної вартості проведення робіт	9	11	10	0,16	Консультант по ОТ	1
14. Розробка питань з охорони праці	3	5	4	0,16	Інженер	1
15. Висновки	3	5	4	0,16	Інженер - конструктор	1

#### 4.2.1 Складання мережевого графіка

Мережевий графік є інформаційно-динамічною моделлю, в якій зображаються взаємозв'язки і результати всіх робіт, необхідних для досягнення кінцевої мети розробки.

При побудові мережевого графіка використовуються два графічні елементи: роботи і події.



Робота - це процес, що вимагає витрат часу, наявності виконавців і матеріальних ресурсів. На графіку роботи зображуються стрілками.

Подіями називають результати проведення робіт, формулювання події завжди записується в довершеній формі, що не допускає різного тлумачення. На графіку подію зображають колом в якому указують порядковий номер події.

До основних параметрів мережевого графіка відносять: критичний шлях, резерви часу подій і резерви часу робіт. Ці параметри є результатними для аналізу і оптимізації мережі.

Перелік робіт мережного графіка наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Перелік робіт мережевого графіка

№	Найменування роботи	Код роботи	Тривалість
1	Отримання технічного завдання	1-2	2
2	Огляд літературних джерел	2-3	3
3	Обґрунтування актуальності	3-4	3
4	Огляд застосування термоелектричних модулів	4-5	4
5	Аналіз елементної бази	5-6	4
6	Розробка конструкції контролера на базі МК PIC	5-7	6
7	Розробка конструкції контролера на базі Arduino	6-8	6
8	Розробка інструкції з експлуатації під час запуску обладнання	7-9	4
9	Дослідження роботи контролера для термоелектричних модулів	8-10	10
10	Опис програмного забезпечення	9-11	4
11	Аналіз отриманих результатів	10-12	10
12	Розробка рекомендацій щодо підвищення надійності термоелектричних модулів	11-12	4
13	Визначення кошторисної вартості проведення робіт	14-15	4
14	Розробка питань з охорони праці	15-16	4
15	Висновки	16-17	3

На рис. 4.1 показано мережний графік виконання НДР.

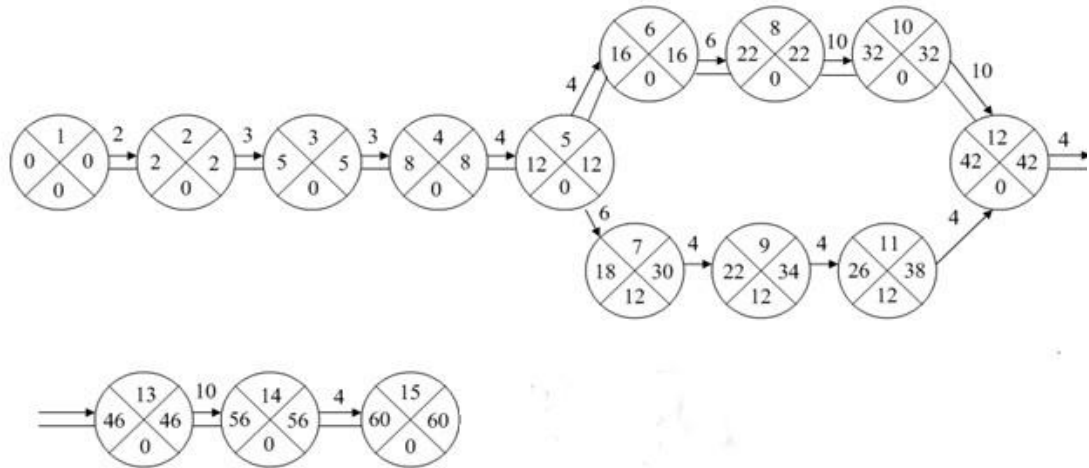


Рисунок 4.1- Мережевий графік плану виконання робіт

У табл. 4.4 наведені параметри подій з розробки проекту. Для заповнення табл. 4.4 необхідно розрахувати наступні дані:

$t_i^p$  - ранній термін настання події;

$t_i^n$  - пізній термін настання події;

$R_i$  – резерв часу події.

Таблиця 4.4 – Параметри подій

Кількість попередніх робіт	Номер події	$t_i^p$	$t_i^n$	$R_i$
0	1	0	0	0
1	2	2	2	0
2	3	5	5	0
3	4	8	8	0
4	5	12	12	0
5	6	16	16	0
6	7	18	30	12
7	8	22	22	0
8	9	22	34	12
9	10	32	32	0
10	11	26	38	12
11	12	42	42	0
12	13	46	46	0
13	14	56	56	0
14	15	60	60	0

Розрахунки параметрів робіт і параметри шляхів мережного графіка наведені в табл. 4.5 і 4.6.

Для заповнення табл. 4.5 необхідно розрахувати наступні дані:

- $t_{ij}$  – тривалість виконання роботи  $i-j$ , днів;
- $tr_n$  – ранній термін початку роботи, днів;
- $tr_o$  – ранній термін закінчення роботи, днів;
- $tp_n$  – пізній термін початку роботи, днів;
- $tp_o$  – пізній термін закінчення роботи, днів;
- $R_p$  – повний резерв часу, днів;
- $R_v$  – вільний резерв часу, днів.

Таблиця 4.5 - Параметри робіт

Код роботи	$T_{ij}$	$tr_n$	$tp_n$	$tr_o$	$T_{po}$	$R_p$	$R_v$
1-2	2	0	0	2	2	0	0
2-3	3	2	2	5	5	0	0
3-4	3	5	5	8	8	0	0
4-5	4	8	8	12	12	0	0
5-6	4	12	12	16	16	0	0
5-7	6	12	24	18	30	12	12
6-8	6	16	16	22	22	0	0
7-9	4	18	30	22	34	12	12
8-10	10	22	22	32	32	0	0
9-11	4	22	34	26	38	12	12
10-12	10	32	32	42	42	0	0
11-12	4	26	38	30	42	12	12
12-13	4	42	42	46	46	0	0
13-14	10	46	46	56	56	0	0
14-15	4	56	56	60	60	0	0

Таблиця 4.6—Параметри шляхів

Номер шляху	Номер події	Довжина шляху	Резерв шляху	$K_n$
1	1-2-3-4-5-6-8-10-12-13-14-15	60	0	1
2	1-2-3-4-5-7-9-11-12-13-14-15	55	36	0.53

Розрахунок коефіцієнта навантаження:

$$K_{\text{нн}} = \frac{Li - Li_{\text{к}}}{Li_{\text{п}} - Li_{\text{к}}}$$

$$K_{\text{нн}} = \frac{55 - 41}{67 - 41} = 0.53$$

В даному випадку згідно з розрахунками таблиці критичним є шлях № 1. Виконання робіт було мінімізовано на 18 днів.

### 4.3 Визначення витрат на виконання науково-дослідної роботи

Для визначення витрат на виконання НДР складають калькуляцію кошторисної вартості робіт, що включає статті:

- основна заробітна плата;
- додаткова заробітна плата;
- відрахування на соціальне страхування і до інших фондів;
- матеріали і комплектуючі вироби (за вирахуванням вартості зворотних відходів);
- витрати на відрядження;
- витрати на спеціальне устаткування;
- вартість послуг сторонніх організацій;
- інші прямі витрати;
- загальновиробничі витрати.

#### 4.3.1 Розрахунок заробітної плати

Розрахуємо заробітну плату всіх категорій працівників, які безпосередньо зайняті в процесі проведення всіх етапів НДР. Сума заробітної плати розраховується на основі зайнятості виконавців по окремих етапах робіт і середньоденного заробітку для кожної категорії персоналу. Результати розрахунку занесені в табл. 4.11. Кошторис НДР наведено в табл. 4.12.

Сума основної заробітної плати становить 38425 грн. Додаткова плата приймається 10% від основної заробітної плати, що становить 3842,5 грн. Сума основної та додаткової заробітної плати складає 42267,5 грн.

Таблиця 4.7 – Основна заробітна плата

Посада виконавців	Кількість людей	Місячний оклад, грн.	Зайнятість, дн.	Середньоденна зарплата, грн.	Сумарна зарплата, грн.
Ведучий інженер	1	6000	36	300	10800
Інженер	1	5000	20	250	5000
Інженер - технолог	1	5200	20	260	5200
Інженер – конструктор	1	5500	27	275	7425
Інженер – проектувальник	1	5000	18	250	4500
Консультант з економіки	1	6000	10	300	3000
Консультант з охорони праці	1	5000	10	250	2500
Разом	7	-	-	-	38425

Відрахування на ЄСВ складає 22%:

$$ЗП_{\text{осн}} \cdot 0,22 = 38425 \cdot 0,22 = 8453,50 \text{ грн}$$

#### 4.3.2 Визначення витрат на матеріали

У цю статтю включають вартість основних і допоміжних матеріалів, напівфабрикатів, що купуються, і комплектуючих виробів. Транспортно-заготовчі витрати приймають рівними 3-10% від вартості матеріалів.

Вихідні дані і розрахунок вартості матеріалів занесемо в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 - Витрати на матеріали

Матеріали	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн.
Набір Arduino Uno R3 kit extended	1	1920,00	1920,00
Термоелемент Пельтьє TEC1-12706, 12В 6А 77ВТ	2	85,00	170,00
Мікроконтролер PIC	1	190,00	190,00
Разом			2280,00
Транспортно-підготовчі роботи 5%			114,00
Разом матеріальних затрат			2394,00

#### 4.3.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Для розрахунку витрат на електроенергію використовуємо формулу:

$$E = \frac{P_y \cdot \Phi_{ef} \cdot K_e \cdot C_e}{\text{ККД}}, \quad (4.4)$$

Де  $P_y$  - встановлена потужність енергетичних струмоприймачів обладнання, кВт;

$\Phi_{ef}$  - ефективний фонд часу роботи даного виду обладнання, год.  
Оскільки обладнання буде працювати 60 днів (відповідно до мережевого графіку) по 8 год кожний день,  $\Phi_{ef} = 240$ ;

$K_e$  - Коефіцієнт використання енергетичних установок по потужності і часу (0,8);

$C_e$  - Ціна 1кВт/год електроенергії (2,68 грн. (з ПДВ));

ККД = 0,8.

$$E=0,45*240*0,8*2,68/0,8= 289,44 \text{ грн}$$

Розрахунок витрати електроенергії приведені в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Розрахунок вартості енергоресурсів

Найменування обладнання	Вид енерго-ресурсів	Установлена потужність, $P_y$ , кВт	Тривалість використання $\Phi_{\text{эф}}$ , ч.	Тариф, за кВт час, грн.	Вартість енерго-ресурсів, грн.
Комп'ютер	Е/енергія	0,45	240	2,68	643,20
Разом					643,20

#### 4.3.4 Розрахунок вартості спецобладнання

До спеціального обладнання належить таке обладнання, яке використовується тільки для проведення окремої дослідницької роботи. Вартість спеціального обладнання для проведення НДР визначають на підставі їх кількості, цін по прейскурантах. Результати розрахунку занесені в табл. 4.10. Результати розрахунку амортизаційних відрахувань наведень в табл. 4.11.

Таблиця 4.10 - Розрахунок вартості спецобладнання

Обладнання	Кількість на тему	Ціна за одиницю, грн.	Вартість, грн.
Комп'ютер	1	15000	15000
Принтер	1	4000	4000
Разом			19000
Транспортно-підготовчі роботи 5%			950
Разом			19950

Амортизаційні відрахування визначають за формулою (4.5):

$$A = \Phi_o \cdot \frac{H_a}{100}, \quad (4.5)$$

де  $\Phi_6$  - балансова вартість обчислювальної техніки, грн;

$H_a$  - норма амортизаційних відрахувань на повне відновлення обчислювальної техніки, приймаємо рівною 50%, оскільки строк корисного використання складає більше року, але вартість менша 20000 грн (малоцінні необоротні матеріальні активи).

Таблиця 4.11 – Розрахунок суми амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %.	Сума, грн.
Комп'ютер	15000	50	7500
Принтер	4000	50	2000
Разом			9500

#### 4.3.5 Загальновиробничі витрати

До загальновиробничих витрат відносять витрати на загальне управління і загальногосподарські потреби (на заробітну плату апарату управління, канцелярські витрати та ін.), на утримання та експлуатацію будівель і споруд. Загальновиробничі витрати включаються у вартість проведення роботи непрямым шляхом - у відсотках від основної заробітної плати співробітників.

Загальновиробничі витрати складають 40% від основної заробітної плати співробітників, що в нашому випадку становить:

$$ЗВ=38425*0,4=15370 \text{ грн}$$

#### 4.3.6 Загальний розрахунок затрат на виконання науково-дослідної роботи

Всі заплановані витрати на виконання НДР наведені в табл. 4.12.



Таблиця 4.12 – Кошторис затрат на виконання НДР

Стаття затрат	Сума, грн.	Структура, %
Матеріали	2394,00	3,04
Основна заробітна плата	38425,00	48,87
Додаткова заробітна плата	3842,50	4,89
Витрати на енергоресурси	643,20	0,82
Відрахування ЄСВ	8453,50	10,75
Витрати на амортизацію	9500,00	12,08
Загальновиробничі витрати	15370,00	19,55
Разом	78628,20	100

#### 4.4 Розрахунок економічної ефективності НДР

Для теоретичних досліджень в більшості випадків важко або навіть неможливо розрахувати економічний ефект, тому доцільно визначити їх техніко-економічну ефективність з урахуванням наступних показників: значимість дослідження для промисловості; складність розробки.

Значимість теоретичного дослідження оцінюють за його призначенням: вирішення проблемних питань; пошук принципово нових конструктивних і технологічних рішень тощо.

Складність виконання роботи визначають порівнянням отриманих результатів цього дослідження з результатами відомих аналогічних досліджень з урахуванням фінансових і трудових витрат на їх проведення.

Результативність проекту можна визначити по повноті рішень поставленого завдання: отриманий результат відповідає плановому, задовільний (часткове вирішення) або негативний.

Аналіз залежності між цими показниками і витратами на їх досягнення дає можливість кількісної оцінки техніко-економічної ефективності теоретичного дослідження за формулою:

$$K = \frac{J^n \cdot R \cdot T}{B \cdot t}, \quad (4.5)$$

де К - рівень ефективності дослідження (коефіцієнт техніко-економічної ефективності проекту);

J - значущість роботи;

R - результативність проекту;

T - технічна складність виконання проекту;

B - витрати на проведення дослідження, тис. грн.;

t - час, витрачений на проведення дослідження, років;

n - показник використання результатів дослідження:

n = 0 - результат дослідження не використовується;

n = 1 - результати дослідження використовуються частково;

n = 2 - результат використовуються в дослідницько-конструкторських роботах;

n = 3 - результати можуть бути використані без проведення дослідно-конструкторських робіт.

Відповідно до теми роботи, пов'язаної із дослідженням надійності термоелектричних модулів на основі елементів Пельтьє, значущість роботи вибираємо = 2; результативність = 3; технічна складність = 2; час, витрачений на проведення дослідження, років  $t = 0,23$ , а вартість НДР склала 78628,20 грн., n = 3 - результат використовуються в дослідницько-конструкторських роботах.

Питомий ефект ( ПЕ ) на кожен бал - 2000 грн.

$$K = 2000 \cdot 2^2 \cdot 3^2 / 78628,20 \cdot 0,23 = 2,65$$

При значенні  $K \geq 1$  дослідна робота є ефективною.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 5.1 Аналіз потенційних небезпек

В дипломному проєкті проводиться розробка методики підвищення надійності термоелектричних модулів на основі елементів Пельтьє.

При роботі у конструкторському бюро постійно або періодично діють наступні небезпечні і шкідливі чинники:

- підвищені статичні навантаження користувачів ПК, пов'язані з повторенням однотипних рухів кистями рук може призвести до защемлення нерву у зап'ястному каналі (тунельний синдром);
- невідповідність ергономічних характеристик устаткування нормованим величинам внаслідок нераціональної організації робочого місця;
- можливість ураження електрострумом внаслідок небезпечного рівня напруги в електричній мережі, тому у приміщенні можуть виникнути аварійні ситуації: замикання, загоряння проводки, ураження електрострумом, що може призвести до електротравм або летальних наслідків;
- невідповідність нормам параметрів мікроклімату;
- незадовільні умови освітлення робочого місця, внаслідок нерівномірного розподілу освітлювальних приладів;
- безпеки, пов'язані з підвищеним рівнем вібрації;
- можливість загорянь внаслідок порушень правил пожежної безпеки;
- непоінформованість персоналу у відповідній послідовності дій в умовах надзвичайної ситуації, що призводить до травмування та до інших непередбачених негативних наслідків.

## 5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Забезпечення безпеки праці, організації оптимальних умов праці, а також захисту навколишнього середовища досягається шляхом дотримання норм і проведення заходів, передбачених законодавчими актами України.

Згідно ПУЕ [15] приміщення виробництва відноситься до категорії «Приміщення без підвищеної небезпеки». При виконанні правил ПУЕ ураження електричним струмом можливо тільки у випадку несправності апаратури й живильних кабелів.

Апаратура, що перебуває під небезпечною для життя напругою, припускає забезпечення електробезпечності. Всі металеві частини заземлені на третій провід спеціальних триконтактних розеток. Струмопровідні кабелі розташовані під дерев'яною підлогою, зверху покритою лінолеумом, або у вигляді схованої проводки в стінах, таким чином, контакт із кабелем виключається. Над кожною розеткою попереджувачий надпис.

Відповідно до ПУЕ в електроустановках до 1000 В мінімальне значення опору ізоляції силових і освітлювальних електропроводок на ділянці між суміжними запобіжниками або за останніми запобіжниками між будь-яким проведенням і землею становить не менш 0,5 МОм.

Відповідно до ПУЕ захисне заземлення застосовується у всіх електроустановках змінного струму напругою 380В и вище й постійного струму 440В і вище. У приміщеннях з підвищеною небезпекою заземлення використовується в електроустановках змінного струму напругою 42 В та постійного струму 110 В [15].

Захисному заземленню підлягають корпуси трансформаторів, оболонки кабелів, металеві огороження електроустановок відповідно до ДСТУ 7237:2011 «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту». Електрична ізоляція забезпечується конструкціями пристроїв і способами їхнього підключення. У процесі експлуатації періодично проводиться перевірка якості ізоляції, шляхом вимірювання її опору [16].

Вирівнювання потенціалів досягаються шляхом устрою контурних заземлювачів. У приміщеннях вирівнювання потенціалів здійснюється з'єднанням металевих стоек ЕОМ, корпусів апаратів світильників і іншого устаткування з усіма доступними для дотику металевими конструкціями будинку, спорудження, а також з контуром шиною захисного заземлення.

Електричний поділ мережі припускає розділ мережі на окремі електрично непов'язані між собою ділянки за допомогою розділових трансформаторів. Підвищення електробезпечності відбувається за рахунок зменшення ємкості мережі й підвищення опору ізоляції фаз мережі щодо землі.

Подвійна ізоляція забезпечує застосування крім основної, робочої ізоляції струмоведучих частин ще одного шару додаткової ізоляції, що ізолює людину від металевих неструмоведучих частин, які можуть випадково виявитися під напругою. При застосуванні електроустаткування з подвійною ізоляцією не потрібно ні заземлення, ні занулення їхніх корпусів [16].

Згідно з завданням, вихідні дані для розрахунку захисного заземлення приведені нижче.

$$U = 380 \text{ В,}$$

$$\text{Розмір приміщення } L = 15 \text{ м, } B = 9 \text{ м}$$

$$R_c = -$$

$$\text{Параметри вертикально стрижня: } l_g = 3 \text{ м, } d = 0,014 \text{ м,}$$

$$\text{Ширина смуги } b_c = 0,04 \text{ м}$$

$$\rho_{\text{вим}} = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Кліматична зона II

Склад ґрунту – однорідний

Вологість повітря - нормальна

Визначаємо необхідний опір штучного заземлювача  $R_u$ , Ом, якщо передбачається використання також природного заземлювача  $R_u$ , за формулою:

$$R_u = \frac{R_e R_3}{R_e - R_3}, \text{ Ом};$$

де  $R_e$  – опір розтіканню струму природних заземлювачів, Ом;

$R_3$  – розрахунковий нормований опір заземлювального пристрою (ЗП), Ом;  $R_3 = 4$  Ом.

При відсутності природних заземлювачів необхідний опір штучного заземлювача дорівнює розрахованому нормованому опору  $Z_{\Pi}$ :  $R_u = R_3$ .

$$R_u = 4 \text{ Ом}$$

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту за формулою:

$$\rho = \rho_{\text{вим}} \cdot \Psi, \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

де  $\rho$  – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м;

$\rho_{\text{вим}}$  – питомий опір землі, отриманий у результаті вимірів, Ом·м;

$$\rho_{\text{вим}} = 80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$\Psi$  – коефіцієнт сезонності, що враховує промерзання чи висихання ґрунту;  $\Psi = 1,5$

$$\rho = \rho_{\text{вим}} \cdot \Psi = 80 \cdot 1,5 = 120 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

Обчислимо опір розтіканню струму одиночного вертикального заземлювача  $R_g$ , Ом. Для стрижневого заземлювача круглого перерізу, заглибленого в ґрунт розрахункова формула має вигляд:

$$R_g = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \left( \ln \frac{2 \cdot l_g}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t_g + l_g}{5 \cdot t_g - l_g} \right), \text{ Ом};$$

де  $\rho$  – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м;  $\rho = 120$  Ом·м;

$l_g$  – довжина вертикального стрижня, м;  $l_g = 3$  м;

$d$  – діаметр перерізу стрижня, м;  $d = 0,014$  м

$t_g$  – відстань від поверхні ґрунту до середини довжини вертикального стрижня, яка обчислюється за формулою:

$$t_g = 0,8 + \frac{1}{2}l_g, \text{ м.}$$

$$t_g = 0,8 + \frac{1}{2}l_g = 0,8 + 1/2 * 3 = 0,8 + 1,5 = 2,3 \text{ м}$$

Тоді  $R_g = 39,73 \text{ Ом}$ .

Розрахуємо наближену (мінімальну) кількість вертикальних стрижнів

$$n' = \frac{R_g}{R_u}, \text{ шт.};$$

де  $R_g$  – опір розтікання струму одиночного вертикального заземлювача, Ом;  $R_g = 39,73 \text{ Ом}$ ;

$R_u$  – необхідний опір штучного заземлювача, Ом;  $R_u = 4 \text{ Ом}$ .

$$n' = \frac{R_g}{R_u} = \frac{39,73}{4} = 9,93 \text{ шт.}$$

Якщо виходити з розмірів контуру:

$$n = \frac{P}{a}, \text{ шт.};$$

де  $P$  – периметр прямокутника (приміщення), м. Який визначається за формулою:

$$P = 2 \cdot (L + B), \text{ м.};$$

$L$  – довжина приміщення, м;

$B$  – ширина приміщення, м;

$$P = 2 * (15 + 9) = 48 \text{ м}$$

$a$  – відстань між стрижнями, обумовлена зі співвідношення, м:

$$a = k \cdot l_g;$$

де  $l_g$  – довжина вертикального стрижня, м;

$k$  – коефіцієнт кратності, який дорівнює 1, 2, 3 (для заглиблених стаціонарних заземлювачів  $k = 1$ ).

$$a = k \cdot l_g = 1 \cdot 3 = 3 \text{ м.}$$

$$\text{Тоді } n = \frac{P}{a} = \frac{48}{3} = 16, \text{ приймаємо } n = 16 \text{ шт.}$$

Отриману кількість стрижнів округляють до більшого довідкового значення, але не менше  $n'$ .

Визначаємо довжину горизонтальної смуги при конфігурації групового заземлювача – контур:

$$l_2 = 1,05 \cdot a \cdot n, \text{ м,}$$

де  $n$  – кількість вертикальних стрижнів;  $n = 16$  шт.

$a$  – відстань між вертикальними стрижнями, м;  $a = 3$  м

$$l_2 = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 16 \cdot 3 = 50,4 \text{ м.}$$

Обчислити опір розтіканню струму горизонтальної з'єднуючої смуги  $R_2$ , Ом. У випадку горизонтального смугового заземлювача розрахунок виконується за формулою:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_2} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_2^2}{b_c \cdot t_2}, \text{ Ом;}$$

де  $\rho$  – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м;  $\rho = 120$  Ом·м;

$l_2$  – довжина горизонтальної смуги, м;  $l_2 = 50,4$  м

$b_c$  – ширина смуги, м;  $b_c = 0,04$  м

$t_2$  – відстань від поверхні ґрунту до середини ширини горизонтальної смуги, яка обчислюється за формулою:

$$t_2 = 0,8 + \frac{1}{2} b_c, \text{ м.}$$

$$t_2 = 0,8 + \frac{1}{2} \cdot 0,04 = 0,82 \text{ м.}$$

Тоді:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_2} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_2^2}{b_c \cdot t_2} = 4,53 \text{ Ом.}$$



Розрахувати еквівалентний опір розтіканню струму групового заземлювача можна за формулою:

$$R_{zp} = \frac{R_g \cdot R_z}{R_g \cdot \eta_z + R_z \cdot \eta_g \cdot n}, \text{ Ом,}$$

де  $R_g$  – опір розтікання струму одиночного вертикального заземлювача, Ом;  $R_g = 39,73$  Ом;

$R_z$  – опір розтікання струму горизонтальної смуги, Ом;  $R_z = 4,53$  Ом;

$\eta_g, \eta_z$  – коефіцієнти використання вертикальних стрижнів і горизонтальної смуги, Ом (додаток Б, В);  $\eta_g = 0,51$ ;  $\eta_z = 0,298$ ;

$n$  – кількість вертикальних стрижнів;  $n = 16$  шт.

$$R_{zp} = \frac{R_g \cdot R_z}{R_g \cdot \eta_z + R_z \cdot \eta_g \cdot n} = 3,69 \text{ Ом.}$$

Отриманий опір розтіканню струму групового заземлювача не повинен перевищувати необхідний опір, визначений у пункті 2.

$$R_{zp} \leq R_u$$

$$3,69 \text{ Ом} \leq 4,00 \text{ Ом}$$

Умова виконана, рішення завдання вірне.

Для зниження величини виникаючих зарядів статичної електрики покриття технологічних підлог варто виконувати з одношарового полівінілхлоридного антистатичного лінолеуму. Іншим методом захисту є нейтралізація заряду статичної електрики іонізованим газом. До загальних мір захисту від статичної електрики можна віднести загальне й місцеве зволоження повітря.

### 5.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці

У відповідності до НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» передбачені гігієнічні вимоги до організації устаткування робочих місць ВДТ ЕОМ і ПЭВМ [17]. Дані правила поширюються на всіх суб'єктів

господарювання незалежно від форм власності, які у своїй діяльності здійснюють роботу, пов'язану з персональними комп'ютерами.

Площу приміщень, в яких розташовуються персональні комп'ютери визначають у відповідності до чинних нормативних документів. Згідно з Вимогами щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям розмір одного робочого місця обладнаного персональним комп'ютером становить не менше 6м<sup>2</sup>. Робочі місця розташовані на відстані не менше ніж 1м від стіни з вікном, а також 1,4 м від стіни, відстань між бічними поверхнями комп'ютера є не меншою за 1,2 м. Суміжні робочі місця працівників, у зв'язку з потребою особливої концентрації уваги, розділені перегородками висотою 1,5 – 2 м.

Робочі місця заборонено створювати у підвальних або цокольних приміщення будинків. У приміщеннях, де працюють з комп'ютерами, щодня здійснюється вологе прибирання, з метою запобігання запиленості підлоги та меблів. Покриття підлоги є матовим з антистатичними властивостями, а сама поверхня рівною та неслизькою.

Правильна кольорова гама також забезпечує підвищення продуктивності та психологічному комфорту. Найбільш сприятливими для нервової системи є світлі та пастельні тони – зеленувато-блакитний, ясно-сірий, золотавий. У той час як яскраві, контрастні поєднання (синій і жовтогарячий, червоний і фіолетовий) будуть викликати втому та роздратування у працівників.

За потреби та з урахуванням площі приміщення в ньому можуть бути встановлені додатково шафи, полиці, тумби чи інші системами для зберігання документів або особистих речей співробітників.

Конструкція робочого стола відповідає сучасним вимогам ергономіки й забезпечує оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного устаткування (дисплея, клавіатури, принтера) і документів.

Висота робочої поверхні робочого стола із ВДТ регулюється у межах 680...800 мм, а ширина й глибина - забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600...1400 мм,

глибина - 800..1000 мм). Приймаємо робочу поверхню з розмірами 1400x800. Щоб уникнути відблисків на екрані вікон розміщуємо робоче місце торцем до вікна не ближче чим на 1 м. Площа дозволяє нам розмістити додаткові меблі для зберігання документів, магнітних дисків, полками, стелажми, тумбами й т.п.

Під час організації робочого простору необхідно враховувати індивідуальні антропометричні параметри користувача з відповідними допусками на можливі зміни робочих поз та потребу у переміщеннях.

Для запобігання підвищеним статичним навантаженням, зокрема, «тунельному синдрому», користувачам ПК рекомендовано:

- для запобігання «тунельного синдрому» робоче місце має бути зручним і ергономічним;
- працюючи за клавіатурою, необхідно стежити, щоб кут згину руки в лікті був прямим, тобто 90°;
- дотримуватися оптимальної висоти клавіатури від підлоги – 65-75 см;
- користуватися ергономічними і зручними особисто для вас миші і клавіатури;
- використовувати силіконові подушки в якості опори для кисті [18].

Оптимальні норми температури повітря в робочій зоні виробничих приміщень у холодний і перехідний періоди року при II категорії робіт згідно ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [19] – 22...24° С, відносна вологість – 60...40%, швидкість руху повітря – 0.2 м/сек. У теплий період року температура – 23...25° С, відносна вологість – 60...40%, швидкість руху повітря – 0.2 м/с.

Для забезпечення вищевказаних параметрів передбачене застосування вентиляції - природної (аерації й провітрювання), механічної (загальнобмінної, місцевої приточної і витяжної), кондиціювання повітря.

У приміщенні забезпечений приплив свіжого повітря, кількість якого визначається техніко-економічним розрахунком і вибором схеми системи

вентиляції. Мінімальна витрата повітря визначається з розрахунку 50...60 м<sup>3</sup>/год на одну людину, але не менш дворазового повітрообміну в годину.

При невеликому забрудненні зовнішнього повітря кондиціонування приміщень здійснюється із перемінними витратами зовнішнього повітря й рециркуляційного.

Всі норми по освітленості беруться згідно ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [20]. Штучне освітлення в приміщеннях здійснюється системою загального рівномірного освітлення. При цьому штучне освітлення застосовують не тільки в темний, але й у світлий час доби.

Найбільш прийнятними для приміщень є люмінесцентні лампи ЛБ (білого світла) потужністю 20, 40 або 80 Вт, які встановлюються в світильники типу ЛСП. Допускається застосування ламп накаливання у світильниках місцевого освітлення.

Загальне освітлення варто виконувати у виді суцільних чи переривчастих ліній світильників, розташованих збоку від робочих місць.

Згідно з ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [21] зниження шуму, створюваного на робочих місцях внутрішніми джерелами, а також шуму проникаючого ззовні, є дуже важливим завданням. Зниження шуму в джерелі виникнення забезпечується застосуванням пружних прокладок між основою машини, приладу й опорною поверхнею. Як прокладки використовуються гума, повсть, пробка, різної конструкції амортизатори. Під настільні шумливі апарати можна підкладати м'які килимки із синтетичних матеріалів, а під ніжки столів, на яких вони встановлені, - прокладки з м'якої гуми, повсті, товщиною 6 - 8 мм.

Рівні вібрації під час виконання робіт з ЕОМ у виробничих приміщеннях не перевищують допустимих значень, визначених у ДСН 3.3.6-039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» [22].

Нормування технологічної вібрації (загальної і локальної) відбувається:

- в залежності від її спрямування у кожній октавній смузі (1,6-1000 Гц);
- з середньоквадратичними віброшвидкостями  $(1,4-0,28) \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ ;
- логарифмічними рівнями віброшвидкості (115-109 дБ);
- віброприскоренням  $(85-0,1) \text{ м/с}^2$ .

## **5.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях**

### **5.4.1 Заходи з пожежної безпеки**

Заходи щодо протипожежного захисту розділяються на організаційні, експлуатаційні, технічні й режимні (спеціальні).

Організаційні заходи: навчання робітників та службовців правилам пожежної безпеки, організація пожежної охорони, проведення бесід, лекцій, видання необхідних інструкцій, плакатів і т.п.

Технічні заходи передбачають дотримання протипожежних правил і норм при устрої систем опалення, вентиляції, кондиціонуванні повітря, блисковкозахисті при спорудженні будинків, установці технологічного устаткування й ін.

Експлуатаційні заходи передбачають правильну експлуатацію систем опалення, вентиляції й кондиціонування повітря, блисковкозахисту технологічних машин і устаткування, правильне утримання будинків і територій і т.п.

Режимні заходи передбачають заборону або обмеження застосування відкритого вогню в вогненебезпечних місцях, паління в невстановлених місцях, обов'язкове дотримання норм і правил при роботі з вогненебезпечними й вибухонебезпечними речовинами [22].

Клас пожежі для приміщень конструкторського бюро встановлюється згідно ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [23] – пожежі твердих речовин, переважно органічного походження, горіння яких супроводжується тлінням (деревина, пластмаси, папір) – і

визначається як клас А та клас Е – пожежі пов'язані з горінням електроустановок.

Відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [24], воно належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали. Оскільки приміщення належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 воно має II ступінь вогнестійкості.

Приміщення конструкторського бюро обладнано автоматичними пожежними сповіщувачами, що реагують на підвищення температури, дим, полум'я, наприклад, сповіщувачі моделей ДТЛ, ІТМ.

Для відводу надлишкового тепла від ЕОМ задіяні кондиціонування повітря і система вентиляції, що обладнана пристроєм, який забезпечує автоматичне відключення вентиляції, в разі виникнення пожежі.

Напруга до електроустановок подається по кабельним мережам, що прокладені під технологічною з'ємною підлогою з рівнем вогнестійкості не менше 0,5 год.

Для виявлення початкової стадії загоряння, швидкого й точного оповіщення служби пожежної охорони про час і місце виникнення пожежі встановлені системи автоматичної пожежної сигналізації (АПС). Вони можуть самостійно пускати в хід установки пожежогасіння, коли пожежа не досягла великих розмірів. Системи АПС складаються з пожежних сповіщувачів, ліній зв'язку й прийомних пультів (станцій). Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», в приміщенні конструкторського бюро встановлена система пожежної й охоронної сигналізації, яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика [25].

Оскільки приміщення конструкторського бюро має площу 135 м<sup>2</sup>, тому відповідно до вимог п. 3.8 розділу «Типові норми належності вогнегасників»

ДСТУ 4297:2004 «Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги» [25] для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 7 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3,5 кг і більше, на 20 м<sup>2</sup> площі приміщення). Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

#### 5.4.2 Заходи з цивільного захисту

Порядок дій робітників і службовців промислового об'єкта та непрацюючого населення при аварії на хімічно небезпечному об'єкті с викидом сильнодіючих отруйних речовин.

Особливістю хімічних надзвичайних ситуацій є висока швидкість формування і дія факторів ураження, що викликає необхідність прийняття цілого ряду оперативних і попереджувальних заходів, які спрямовані на захист населення і сил ЦО під час ліквідації їх наслідків. З урахуванням специфіки хімічних небезпечних надзвичайних ситуацій при локалізації і ліквідації їх наслідків приймаються заходи, які спрямовані спочатку на обмеження і призупинення викиду (випливу) СДОР, локалізації хімічного ураження, попередження зараження ґрунту і джерел водозабезпечення населення.

Для локалізації хімічного зараження, попередження розповсюдження СДОР та зараження ґрунту і джерел води можуть бути використані різні способи.

У зв'язку з цим захист населення і сил ЦО організується при можливості завчасно, а у разі виникнення хімічної надзвичайної ситуації проводиться в мінімально можливі строки. Він організується і проводиться управліннями (відділами) з питань надзвичайних ситуацій і цивільного захисту територій, штабами сил ЦО і суб'єктів господарської діяльності.

Захист населення і сил ЦО від сильнодіючих отруйних речовин – це комплекс організаційних, оперативних, попереджувальних і захисних заходів, що здійснюються з метою виключення або максимального послаблення дії

ураження СДОР населення і сил ЦО, збереження їх боєздатності і працездатності. Комплекс заходів з захисту населення і сил цивільної оборони від наслідків хімічної НС включає: організаційні і оперативні заходи з організації, планування і проведення заходів з захисту населення і сил цивільної оборони на підлеглий території; інженерно-технічні заходи щодо дотримання умов безпеки при використанні, зберіганні, транспортуванні СДОР;

- підготовку сил і засобів для ліквідації наслідків хімічних надзвичайних ситуацій;

- навчання населення порядку і правилам поведінки в умовах хімічних надзвичайних ситуацій;

- забезпечення засобами індивідуального і колективного захисту;

- забезпечення безпеки населення і використання засобів індивідуального і колективного захисту;

- повсякденний хімічний контроль;

- проведення попереджувальних і профілактичних заходів на хімічних небезпечних об'єктах;

- прогнозування можливих наслідків хімічної НС;

- попередження (оповіщення) про безпосередню небезпеку ураження СДОР;

- тимчасову евакуацію (відселення) населення і сил ЦО із небезпечних районів;

- хімічну розвідку району аварії;

- знаходження і надання медичної допомоги потерпілим;

- локалізацію і ліквідацію наслідків хімічної надзвичайної ситуації.

Отримавши інформацію про викид в атмосферу сильнодіючих отруйних речовин і про небезпеку хімічного зараження, надягніть засоби індивідуального захисту органів дихання, найпростіші засоби захисту шкіри (плащі, накидки), сховайтеся в найближчому притулку або покиньте район аварії.

Якщо відсутні засоби індивідуального захисту, немає поблизу притулку і вийти з району аварії неможливо, залишіться в приміщенні, ввімкніть



радіоточку: чекайте повідомлень штабу цивільного захисту. Щільно закрийте вікна і двері, димоходи, вентиляційні віддушини. На входні двері повісьте штори, використовуючи ковдри і будь-які щільні тканини. Заклейте щілини у вікнах і стики рам плівкою, лейкопластиром або звичайним папером.

Не можна ховатися на перших поверхах багатоповерхових будинків, підвальних і напівпідвальних приміщення. Аварія може застати вас на вулиці, в транспорті. Тому, почувши розпорядження про евакуацію, будьте уважні до вказівок штабу цивільного захисту.

Покидаючи квартиру, виключіть джерела електроенергії, візьміть з собою особисті документи, необхідні речі, надіньте протигаз або ватно-марлеву пов'язку, накидку або плащ, гумові чоботи.

Виходьте із зони хімічного зараження в бік, перпендикулярний напрямку вітру. Уникайте переходи через тунелі, яри, лощини – в низьких місцях вище концентрація сильнодіючих отруйних речовин.

При евакуації транспортом уточніть час і місце посадки. Не запізнюйтесь і не приходьте раніше призначеного строку.

Вийшовши із зони зараження, зніміть верхній одяг, залиште його на вулиці, прийміть душ, вмийтеся з милом, промийте очі і прополощіть рот.

При підозрі на ураження сильнодіючими отруйними речовинами виключайте будь-які фізичні навантаження, прийміть пиття (чай, молоко тощо) та зверніться до медичного працівника.

Особливості проведення рятувальних робіт в осередку хімічного ураження витікають з характеру зараження сильно діючими хімічними отруйними речовинами. В осередку хімічного зараження не буде розрухи та пожегів, тому рятувальні роботи зводяться до надання допомоги ураженим, їх евакуації у медичні заклади, позначенню та оточенню осередків ураження, знезараженню місцевості, транспорту, будівель, а також санітарної обробки людей.

Рятувальні роботи ведуть в першу чергу зведені загони (команди) спеціального захисту, а при їх відсутності – зведені загони (команди, групи)

загального призначення, на допомогу яким виділяються формування протихімічного захисту, медичні тощо.

Для оточення осередку хімічного зараження використовуються формування охорони громадського порядку. Крім того, на незараженій території допоміжні роботи можуть вести формування інших служб [26].

## ВИСНОВКИ

В ході дипломного проєктування було досліджено актуальну задачу - надійність елементів Пельтьє. Вона може бути підвищена конструктивними, технологічними та програмними засобами.

Для досягнення поставленої мети було досліджено фізичні принципи, на яких базуються ТЕМ Пельтьє; проаналізовано принцип роботи, будову і умови експлуатації ТЕМ.

Було вирішено розробити конструкцію та систему керування ТЕМ охолодження на базі елемента Пельтьє, що використовують управління за допомогою мікроконтролера PIC та плати Arduino, проведено опис структури, здійснено вибір елементів, наведено докладний опис програми керування. Визначено, що для побутового використання оптимальнішим є варіант із використанням плати Arduino, оскільки він дозволяє користувачу відстежувати параметри холодильної установки без підключення до ПК.

Було проаналізовано вплив різних чинників на надійність ТЕМ охолодження на основі елементів Пельтьє, зокрема, розглянуто вплив високих температур, температурних циклів, циклів вмикання/вимикання, механічних впливів. Розроблено ряд заходів, виконання яких сприятиме підвищенню надійності пристроїв на основі ТЕМ Пельтьє.

Також було надано економічне обґрунтування роботи, що довело економічну доцільність проведення подібних досліджень. Запропоновано заходи із забезпечення техніки безпеки, виробничої санітарії та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Choosing and Using Advanced Peltier Modules for Thermoelectric Cooling [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.digikey.com/en/articles/choosing-using-advanced-peltier-modules-thermoelectric-cooling>
2. Физическая энциклопедия. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. – Т.5. – 760 с.
3. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1960. — 188 с.
4. Устройство термоэлектрического модуля (элемента Пельтье) [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <http://kryothermtec.com/ru/technology/>
5. РС: настройка, оптимизация и разгон". 2-е изд., перераб. и доп., — СПб.: ВHV — Петербург. 2000. — 336 с.
6. РС: настройка, оптимизация и разгон". 2-е изд., перераб. и доп., — СПб.: ВHV — Петербург. 2000. — 336 с.
7. Чернова, А. А. Термоэлектрические охлаждающие устройства / А.А. Чернова, Е. Г. Богданов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 4 (294). — С. 68-71.
8. Современная технология охлаждения элементом Пельтье [Электронний ресурс]. – Режим доступу: [https://algimed.com/pdf/binder/kt53/2013\\_02\\_wp\\_Peltier\\_RU.pdf](https://algimed.com/pdf/binder/kt53/2013_02_wp_Peltier_RU.pdf)
9. Reliability of Thermoelectric Cooling Modules [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref10/>
10. Thermal Management Solutions. Thermoelectric Modules and Thermal Management. Subsystems and Assemblies [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref10/>

11. Полупроводниковые холодильники Пельтье [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ixbt.com/cpu/peltje.html>
12. Reliability Considerations for Peltier Modules [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cuidevices.com/blog/reliability-considerations-for-peltier-modules#peltier-module-reliability-improvements>
13. MIL-STD-105, Military standard: sampling procedures and tables for inspection by attributes [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://archive.org/details/MIL-STD-105E\\_1](https://archive.org/details/MIL-STD-105E_1)
14. MIL-Q-9858A, Military specification: quality program requirements [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-Q/MIL-Q-9858A\\_2889/](http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-Q/MIL-Q-9858A_2889/)
15. Правила улаштування електроустановок [Текст]. Міненерговугілля України, 2017. – 617с
16. ДСТУ 7237:2011 «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту». Київ: Держспоживстандарт України, 2011. – 10 с.
17. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. НПАОП 0.00-7.15-18. Державні санітарні правила і норми. / Харків: Форт, 2018 – 48 с.
18. Курс лекцій по «Ергономіці». Ю.М. Мадієвський. – Під ред. д-ра. техн. наук., проф. Березуцького В.В. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – 294 с.
19. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. / Харків: Форт, 2000 – 24 с.
20. ДБН В.2.5-28:2018. Природне та штучне освітлення. Посібник: проблеми природного і штучного освітлення. / К: Етін, 2019. – 180 с
21. ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку / МОЗ України, 1999 – 24 с.
22. Основи професійної безпеки та здоров'я людини : підручник / В. В. Березуцький [та ін.] ; під ред. проф. В. В. Березуцького. – Харків : НТУ «ХПИ», 2018. – 553 с.

23. ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги». / Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 39 с.
24. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Текст] : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. – На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2016. – 66 с.
25. Охорона праці: навч. посіб. / З. М. Яремко, С. В. Тимошук, О. І. Третяк, Р. М. Ковтун; за ред. проф. З. М. Яремка. - Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. - 374 с.
26. Васійчук В.О., Гончарук В.Є., Качан С.І., Мохняк С.М. Основи цивільного захисту: Навч. посібник / Львів, 2010.- 384 с.

## ДОДАТОК А

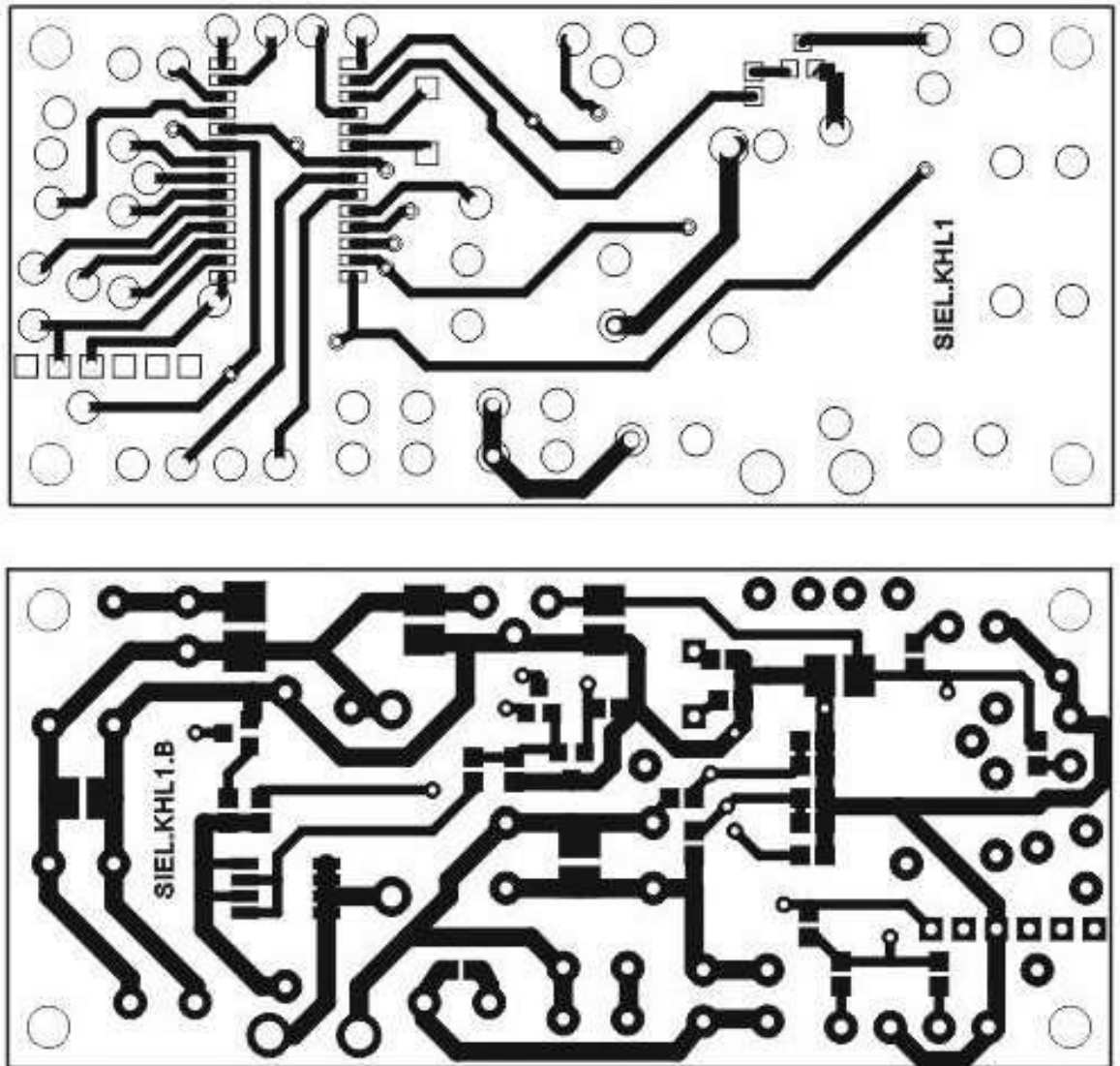


Рисунок А.1 – Зображення друкованої плати

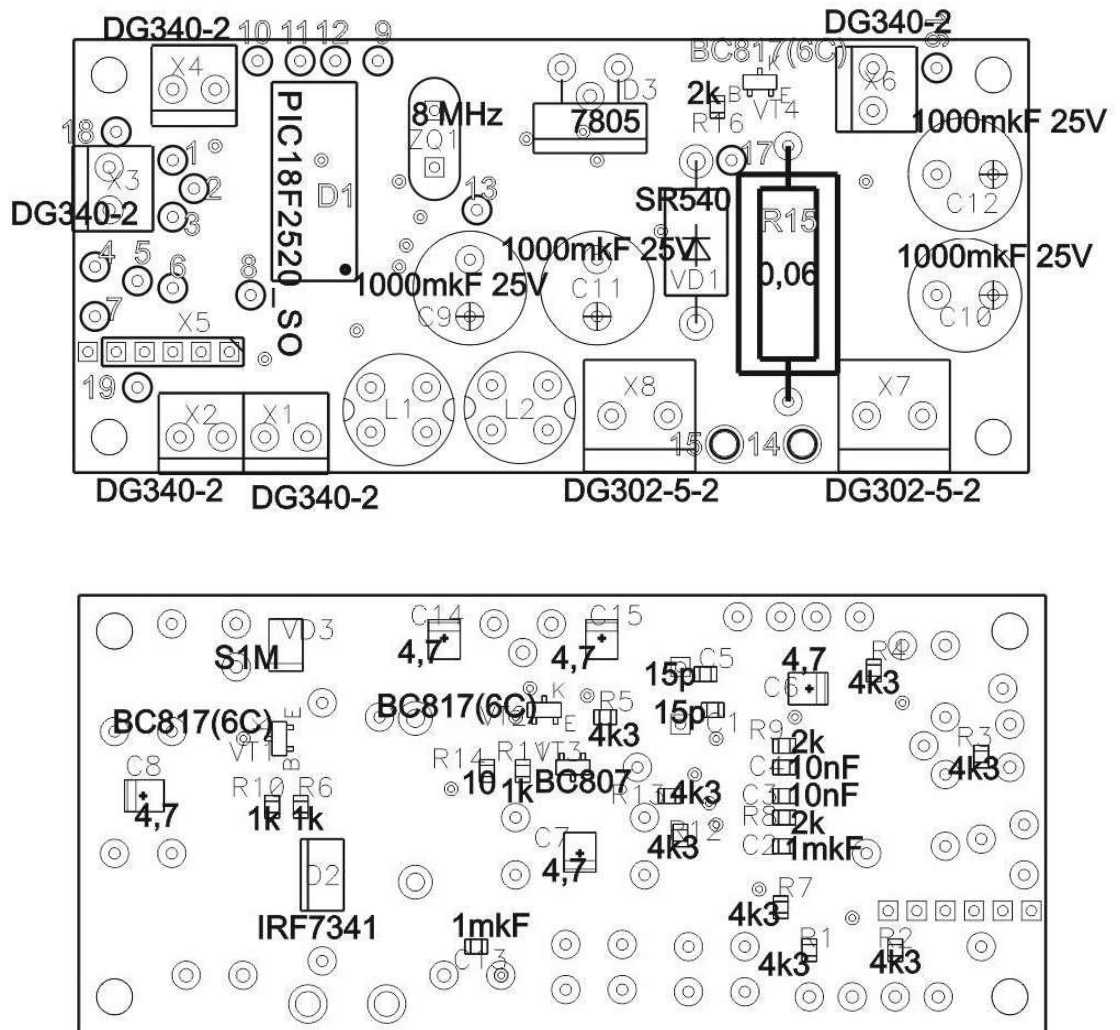


Рисунок А.2 – Складальне креслення плати



## ДОДАТОК Б

```
//----- основной цикл ----- void loop() {  
  
//----- цикл 20 мс ( регулятор мощности )  
if (flagReady == true) {  
    flagReady= false;  
  
    // операции цикла 20 мс  
  
    //----- выполнение распределенных операций в цикле 1 сек    cycle20mcCount++; //  
    счетчик циклов 20 мс  
    if (cycle20mcCount >= 50) cycle20mcCount= 0; // время цикла 1 сек  
  
    if (cycle20mcCount == 0) {  
//операции интервала 0  
    }  
  
    if (cycle20mcCount == 1) {  
//операции интервала 1  
//инициализации измерения температуры  
    }  
  
    if (cycle20mcCount == 25) {  
//операции интервала 25  
    }  
  
    if (cycle20mcCount == 48) {  
//операции интервала 48  
    //чтение температуры  
    }  
  
    }  
}
```

## ДОДАТОК В

```

// контроллер элемента Пельтье

#include <MsTimer2.h>
#include <avr/wdt.h>

#define powerU 12.11 // напряжение источника питания
#define koefU 0.01679 // масштабный коэффициент напряжения,
// koefU = 1.1 / R1 * (R1 + R2) / 1024 = 1.067/820*(820 + 12000)/1024 =0.01629
В/ед. АЦП
#define koefI 0.02148 // масштабный коэффициент тока
// koefI = 1,067 / R8 / 1024 = 0.02084 А/ед. АЦП

#define MEASURE_PERIOD 10 // время периода измерения (* 2 мс)

float measureU; // измеренное напряжение на нагрузке, В
float measureI; // измеренный ток потребления регулятора, А
float measureP; // измеренная мощность на нагрузке, Вт

byte interruptCount=0; // счетчик циклов прерываний
unsigned int sumU, sumI; // переменные для суммирования кодов АЦП
unsigned int averageU, averageI; // средние значения кодов АЦП
boolean flagReady; // признак готовности данных измерения
byte cycle20mсCount; // счетчик циклов 20 мс

void setup() {
// установка ШИМ 8 разрядов, 62,5 кГц
TCCR1A = TCCR1A & 0xe0 | 1;
TCCR1B = TCCR1B & 0xe0 | 0x09;

Serial.begin(19200); // инициализируем последовательный порт, скорость 19200
analogReference(INTERNAL); // опорное напряжение 1,1 В
MsTimer2::set(2, timerInterrupt); // прерывания по таймеру с периодом 2 мс
MsTimer2::start(); // разрешение прерывания
wdt_enable(WDTO_15MS); // разрешение работы сторожевого таймера, тайм-аут 15 мс
}

//----- основной цикл -----
void loop() {

//----- цикл 20 мс ( регулятор мощности )
if (flagReady == true) {
flagReady= false;

//----- вычисление измеренных значений
// вычисления напряжения
measureU = powerU - (float)(averageU / MEASURE_PERIOD) * koefU;
if (measureU < 0) measureU=0;

// вычисление тока
measureI = (float)(averageI / MEASURE_PERIOD) * koefI;

```

```

// вычисление мощности
measureP = powerU * measureI;

analogWrite(9, 191); // на выводе 9 ШИМ= 75%

//----- выполнение распределенных операций в цикле 1 сек -----
cycle20mcCount++; // счетчик циклов 20 мс
if (cycle20mcCount >= 50) cycle20mcCount= 0; // время цикла 1 сек

if (cycle20mcCount == 25) {
    //----- интервал 25, передача информации на компьютер
    Serial.print("U="); Serial.print(measureU, 2); // напряжение
    Serial.print(" I="); Serial.print(measureI, 2); // ток
    Serial.print(" P="); Serial.print(measureP, 2); // мощность
    Serial.println(" ");
}

}

}

//----- обработка прерывания по таймеру 2 мс
void timerInterrupt() {
    wdt_reset(); // сброс сторожевого таймера
    interruptCount++; // счетчик циклов прерываний

    // измерение напряжения и тока
    sumU += analogRead(A1); // суммирование выборок АЦП
    sumI += analogRead(A0); // суммирование выборок АЦП
    // проверка числа выборок усреднения
    if ( interruptCount >= MEASURE_PERIOD ) {
        interruptCount= 0;
        averageU = sumU; // перегрузка среднего значения
        averageI = sumI; // перегрузка среднего значения
        sumU= 0;
        sumI= 0;
        flagReady= true; // признак результат измерений готов
    }
}
}

```