

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра Електронних систем

КОСТИКА ГЕОРГІЯ ЄВГЕНОВИЧА

Керований термоелектричний кулер Пельтьє

Спеціальність 171 Електроніка
Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:
Тарас ЗАЯЦЬ
к.ф.-м.н., доцент
завідувач кафедри "ЕС"

Ужгород – 2025

Реєстрація _____
(номер)

« ____ » _____ 2025 р. _____ Тетяна СЕМАК
(підпис)

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

_____ Тарас ЗАЯЦЬ
(підпис)

д.ф.-м.н., доцент

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

_____ (підпис)

_____ Леонід СУСЛІКОВ
(Ім'я) (Прізвище)

_____ д.ф.-м.н., проф.
(науковий ступінь, вчене звання)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ « Ужгородський національний університет»
Інженерно-технічний факультет
кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. _____ (Заяць Т. М.)

“ ____ ” _____ 2025 року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему:

Керований термoeлектричний кулер Пельт'є.

Студента групи ЕС: Георгія КОСТИКА)

Керівник: канд. ф.-м.н. доцент кафедри ЕС)

Тарас ЗАЯЦЬ ()

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. _____ (Заяць Т. М.)

“ _____ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну бакалаврську роботу
студента Костика Георгія Євгеновича

1. Тема роботи «Керований термоелектричний кулер Пельт'є», керівник роботи Заяць Тарас Михайлович, канд. фіз.-мат наук, доц. кафедри ЕС. Затверджена на засіданні кафедри ЕС (протокол №3 від 18 жовтня 2024 року)

2. Термін подання студентом роботи 9. 03. 2025.

3. Термін закінчення роботи 23. 06. 2025.

4. Вихідні дані до роботи:

Створити керований термоелектричний кулер на базі модуля Пельт'є з застосуванням мікроконтролера Arduino, забезпечити наступні характеристики кулеру:

1. Температурний діапазон в робочій зоні від -20°C по $+30^{\circ}\text{C}$;
2. Температура нагріву до $+80^{\circ}\text{C}$;
3. Робоча напруга до 12 В;
4. Робочий струм до 15 А;
5. Можливість відображення температури робочої зони приладу за допомогою LCD дисплею;
6. Регулювання температури модуля Пельт'є за допомогою понижуючого модулю DC-DC;
7. Регулювання системи тепловідводу за допомогою модулю H-Bridge.

5. Зміст роботи (перелік питань, що підлягають розробці):

ВСТУП

- 1) Теоретичний огляд ефекту Пельт'є, огляд принципу роботи модуля Пельт'є та елементів схеми для кулеру;
- 2) Практична робота з реальним модулем Пельт'є та отримання експериментальних даних;
- 3) Моделювання схеми майбутнього пристрою;
- 4) Розробка програмного коду для контролю роботи кулеру за допомогою мікроконтролера Arduino;

- 5) Тестування розробленої схеми та коду в симуляторі;
- 6) Збірка приладу, його програмування та тестування на відповідність потрібним характеристикам при роботі.

Перелік посилань

ДОДАТКИ:

- Додаток А. Структурна схема _____
- Додаток Б. Принципова схема _____
- Додаток В. Перелік елементів _____
- Додаток Г. Специфікація _____
- Додаток Д. Звіт з COMSOL _____

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 18.10.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Постановка задачі	березень, 2025	
2	Огляд літературних джерел за темою роботи.	березень, 2025	
3	Пошук та аналіз аналогів об'єкта досліджень.	березень, 2025	
4	Вибір технічного рішення та обґрунтування технічної пропозиції.	квітень, 2025	
5	Синтез структурної та принципової схем	квітень, 2025	
6	Пошук та підбір модулів та елементів складових майбутнього приладу	квітень, 2025	
7	Моделювання схеми майбутнього пристрою засобами Proteus 8	травень, 2025	
8	Програмування роботи майбутнього пристрою та складання демонстраційної моделі	травень, 2025	
9	Оформлення кваліфікаційної бакалаврської роботи.	травень, 2025	
10	Захист на державній екзаменаційній комісії.	Згідно з графіком захисту	

Студент _____ (Георгій КОСТИК)

Керівник _____ (Тарас ЗАЯЦЬ)

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота на тему «Керований термоелектричний кулер Пельт'є» / УжНУ; Керівник Заяць Т. М.; Студент Костик Г.Є., група ЕС.

Пояснювальна записка: роботу викладено на 62 сторінках, вона містить 5 додатків, 43 рисунків, 5 таблиць та 21 джерел у переліку літератури.

Графічна частина: 2 листа формату А3, 13 листа формату А4.

Об'єктом дослідження є елемент Пельт'є, можливість його керування засобами мікроконтролера Ардуіно.

Предмет роботи – розробка та моделювання керованого засобами Arduino термоелектричного кулера на основі елемента Пельт'є.

Мета роботи – мета полягає у створенні термоелектричного кулера з можливістю отримання детальної інформації про його роботу.

В першому розділі описані теоретичні відомості фізичних законів та ефектів на яких базується робота елемента Пельт'є, також оглянуті компоненти схеми термоелектричного кулера з описом їх параметрів.

В другому розділі було проведено роботу з реальними елементами Пельт'є для отримання експериментальних даних для точних розрахунків температурного та електричного діапазону роботи реального елемента Пельт'є.

В третьому розділі проведено моделювання схеми пристрою універсального термоелектричного кулера на елементі Пельт'є.

В четвертому розділі був розроблений програмний код за допомогою якого мікроконтролер Arduino може контролювати роботу елемента Пельт'є та виводити дані на дисплей.

В п'ятому розділі проведено тестування роботи схеми за допомогою симулятора.

В шостому розділі була проведена зборка реального прототипу для отримання експериментальних даних роботи отриманого приладу.

Ключові слова: елемент Пельт'є, кулер, повітряне охолодження, термоелектронне охолодження, температурний та електричний діапазон, програмний код, мікроконтролер, Arduino, симулятор.

ABSTRACT

Qualification bachelor's thesis on "Controlled thermoelectric Peltier cooler" / UzhNU; Supervisor Zayats T. M.; Student Kostyk G.E., group ES.

Explanatory note: the work is presented on 62 pages, it contains 5 appendices, 43 figures, 5 tables and 21 sources in the list of literature.

Graphic part: 2 sheets of A3 format, 13 sheets of A4 format.

The object of research is the Peltier element, the possibility of its control by means of the Arduino microcontroller.

The subject of the work is the development and modeling of a thermoelectric cooler based on a Peltier element controlled by Arduino.

The purpose of the work is to create a thermoelectric cooler with the ability to obtain detailed information about its operation.

The first section describes the theoretical information on the physical laws and effects on which the operation of the Peltier element is based, and also reviews the components of the thermoelectric cooler circuit with a description of their parameters.

In the second section, work was carried out with real Peltier elements to obtain experimental data for accurate calculations of the temperature and electrical range of operation of a real Peltier element.

In the third section, the circuit of a universal thermoelectric cooler device based on a Peltier element was simulated.

In the fourth section, a program code was developed with the help of which the Arduino microcontroller can control the operation of the Peltier element and display data on the display.

In the fifth section, the operation of the circuit was tested using a simulator.

In the sixth section, a real prototype was assembled to obtain experimental data on the operation of the resulting device.

Keywords: Peltier element, cooler, air cooling, thermoelectric cooling, temperature and electrical range, program code, microcontroller, Arduino, simulator.

Розділ 3. Моделювання схеми майбутнього пристрою	40
3.1. Структурна схема кулера	40
3.2. Джерело живлення	42
3.3. Контролюючий вузол	42
3.4. Вузол зворотного зв'язку	44
3.5. Комутуючий вузол	45
3.6. Виконавчий вузол	47
Розділ 4. Програмування роботи майбутнього пристрою	48
4.1. Середовище програмування	48
4.2. Головна частина коду	49
4.3. Модуль кнопок	52
4.4. Модуль дисплея	54
4.5. Модуль сенсору	55
4.6. Модуль регуляції	55
4.7. Модуль змінних	56
4.8. Модуль зберігання даних	57
4.9. Модуль таймеру	58
Висновки	59
Перелік посилань	61

ПРОФІ
У
ЖЕНУ

ВСТУП

У сучасному світі, в якому технології постійно розвиваються, з'являються нові можливості для створення пристроїв і нові потреби для забезпечення охолодження цих пристроїв. Для вирішення проблеми охолодження електронних пристроїв приходять засоби допоміжного охолодження, що представляють собою окремі пристрої, задачею яких є здійснення як пасивного так і активного додаткового охолодження елементів комп'ютера. Одним з таких засобів є використання холодильного кулера з елементом Пельт'є.

Елементи Пельт'є застосовуються в ситуаціях, коли необхідно охолодження з невеликою різницею температур, або енергетична ефективність охолоджувача не важлива. Наприклад, елементи Пельт'є застосовуються в ПЛР-ампліфікаторах, маленьких автомобільних холодильниках, оскільки застосування компресора в цьому випадку неможливо через обмежені розміри, і, крім того, необхідна потужність охолодження невелика.

Аналізуючи ринок пропозицій можна знайти багато приладів та засобів використання охолоджуючих можливостей елемента Пельт'є, до яких можна віднести дрібну електроніку, портативні авто-холодильники і кондиціонери, дехто навіть використовує модуль Пельт'є для охолодження ноутбуків чи комп'ютерних систем, серверів. Проте можна знайти не дуже багато рішень в яких використовувався б керований елемент Пельт'є, здатний забезпечувати точне та стабільне керування температурою, хоча це теж важлива можливість використання термоелектричного ефекту.

Метою цієї роботи є розробка та подальше створення керованого термоелектричного холодильного кулера, який забезпечуватиме точне та стабільне керування температурою за допомогою модуля Пельт'є. Для програмного управління термоелектричним кулером використовується мікроконтролер Arduino Nano, що дозволяє зручно та ефективно налаштовувати його параметри та режими роботи. Термо-датчики дозволять нам відслідковувати температуру елемента у реальному часі, а мотор постійної напруги з пропелером забезпечить відвід тепла з елемента Пельт'є, збільшуючи

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

його холодильні можливості. Керування роботи модуля користувачем здійснюватиметься через кнопки та енкодер.

Отже, розробка термоелектричного холодильного кулера на основі модуля Пельт'є, що керується мікроконтролером Arduino Nano, є актуальною задачею, яка може знайти своє застосування в різних сферах. Дана робота має на меті запропонувати шлях реалізації та промоделювати роботу такого пристрою, який забезпечить точне та ефективне керування температурою з використанням доступних та економічних компонентів.

ЕКОНОМІЧНЕ

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Теоретичні Відомості

1.1. Термоелектричний ефект

Термоелектрика – це явище, яке описує перетворення теплової енергії в електричну, та навпаки. Вона заснована на трьох найважливіших транспортних ефектах: ефект Зеебека, ефект Пельтьє та ефект Томсона. Основним принципом термоелектрики є виробництво "чистої" електроенергії, а також виконання функції охолодження. Серед інших переваг, термоелектричні пристрої відзначаються безшумною роботою (відсутність рухомих частин) та багаторічним стабільним функціонуванням. Енергетична ефективність термоелектричних пристроїв визначається якістю термоелектричних матеріалів, з яких вони виготовлені [1].

За наявності різних температур з кожного боку термоелектричного пристрою генерується напруга, а коли до нього подається напруга, тепло переноситься з одного боку на інший, створюючи різницю температур. Термоелектричний ефект може бути використаний для перетворення різниці температур в електричну напругу та навпаки, застосовуючи термопару. Застосування термоелектричних пристроїв може включати виробництво електроенергії, вимірювання температури та регулювання температури об'єктів. Цей ефект включає три окремі впливи: ефект Зеебека, ефект Пельтьє та ефект Томсона. Ефекти Пельтьє -Зеебека та Томсона є термодинамічно оберненими, тоді як Джоулеве нагрівання, що виникає під час проходження струму крізь провідний матеріал, не зараховується до термоелектричного ефекту.

1.2. Ефект Зеебека

Ефект Зеебека, чи термоелектричний ефект, полягає в тому, що в замкнутому колі, яке складається з двох різних напівпровідників 1 і 2, місця з'єднань котрих розташовуються при різних температурах (рис. 1.1), з'являється електричний струм, що зветься термоелектричним. На краях такого розімкнутого кола виникає різниця потенціалів, яка зветься ТЕРС (термоелектрорушійна сила).

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

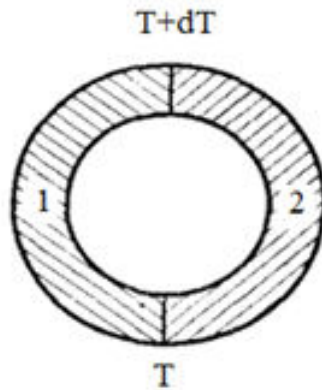


Рисунок 1.1. – Замкнутий ланцюг двох провідників

Термо-різниця потенціалів, що залежить від різниці температур і виду матеріалу, характеризується коефіцієнтом:

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT} \quad (1.1)$$

Коефіцієнт α називається питомою термо-ЕРС і являє собою термо-ЕРС, віднесену до одиничної різниці температури.

Ефект Зеебека виникає в колі, яке складається із двох спаяних між собою провідників (термопара). Один із контактів нагрівають, і тоді в колі виникає електричний струм. Різниця потенціалів (електрорушійна сила), яка виникає між контактами, залежить від роду провідників контактів та від різниці температури між контактами. Її можна подати у вигляді загальної формули [2]:

$$\varepsilon = f(T_1) - f(T_2) \quad (1.2)$$

де $T_1 > T_2$

Похідна функції $f(T)$

$$\beta = \frac{df(T)}{dT} \quad (1.3)$$

називається коефіцієнтом термоелектрорушійної сили контакту.

ЕРС Зеебека, і його взаємозв'язок з різницею температур відображається коефіцієнтом Зеебека. Термопара, складена з двох різних матеріалів, може

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювати різницю потенціалів на нагрітому та охолодженому кінцях. Ця різниця потенціалів пропорційна різниці температур між кінцями (1.4):

$$dU = T_3 \cdot dT \quad (1.4a)$$

або

$$U = T_3(T_1 - T_2) \quad (1.4b)$$

де T_3 - термоелектричний коефіцієнт Зеебека

$$T_3 = \frac{dU}{dT} \quad (1.5)$$

1.3. Ефект Пельтьє

Ефект Пельтьє полягає в тому, що при проходженні електричного струму через контакт двох речовин в ньому в залежності від напрямку струму виділяється або поглинається теплота. Кількість теплоти при ефекті Пельтьє пропорційне щільності струму і часу [3]:

$$Q_{\text{П}} = \Pi j t \quad (1.6)$$

де Π - коефіцієнт Пельтьє, він визначає залежність між тепловим потоком і електричним струмом, який протікає через матеріал.

Формула для розрахунку коефіцієнта Пельтьє для з'єднання двох матеріалів з електричним струмом I , при температурній різниці ΔT , має вигляд (1.7):

$$\Pi = \frac{\Delta V}{(I - \Delta T)} \quad (1.7)$$

де ΔV - це відносна різниця потенціалів на з'єднанні матеріалів при наявності температурної різниці ΔT .

Ефект Пельтьє є зворотним до ефекту Зеебека. При прикладенні електричного струму до з'єднання двох провідників з різними градусами нагрівання, в одному провіднику відбувається нагрівання, а в іншому – охолодження. Це явище базується на тому, що електрони, які переносять електричний струм, при переході з одного провідника до іншого, змінюють свою кінетичну енергію. Це

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зумовлює зміну температури провідників, через які проходить електричний струм.

1.4. Ефект Томсона

Коефіцієнт Зеебека залежить від температури і може різнитись у різних матеріалах. Якщо матеріал піддається просторовому градієнту температури, то коефіцієнт Зеебека також може змінюватись. Якщо через такий градієнт пропустити електричний струм, то виникне ефект Пельт'є з неперервними змінами в напрямку теплового потоку. Ефект Томсона описує зміну температури провідника під струмом при наявності градієнту температури [4].

Якщо через однорідний провідник пропускається струм густиною J буде вироблятися певна кількість тепла на одиницю об'єму (1.8):

$$\dot{q} = -KJ \cdot \nabla T \quad (1.8)$$

де ∇T – градієнт температури, K – коефіцієнт Томсона.

Коефіцієнт Томсона пов'язується з коефіцієнтом Зеебека за допомогою формули:

$$K = T \frac{dS}{dT} \quad (1.9)$$

1.5. Елемент Пельт'є

Елемент Пельт'є — це термоелектричний пристрій, також відомий як термоелектричний модуль (ТЕМ) або Peltier Cooler. Цей пристрій заснований на термоелектричному ефекті, який виявив французький фізик Жан Чарльз Атанасіус Пельт'є у 1834 році [5].

У ТЕМ знаходиться коло, що складається з двох напівпровідників n- і p-типів, зібраних у відповідну схему (рис. 1.2). Якщо виникне потік тепла Q_h та відводиться потік Q_c , то у колі виникне струм I відповідно до закону

збереження енергії. Електрична потужність може бути обчислена за формулою (1.10):

$$P = Q_h - Q_c \quad (1.10)$$

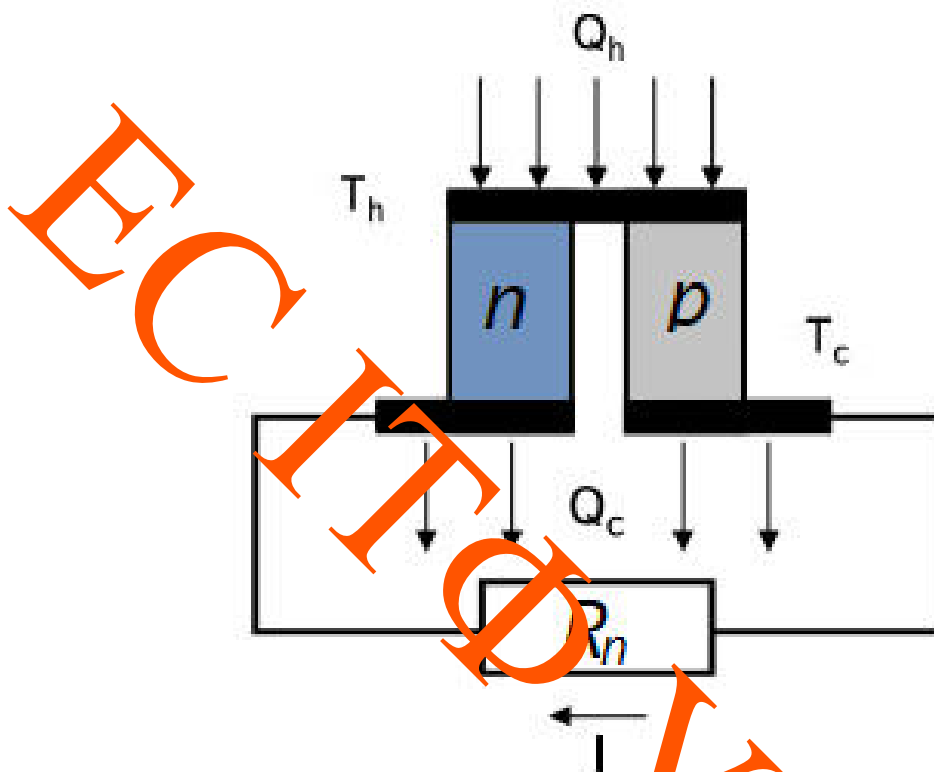
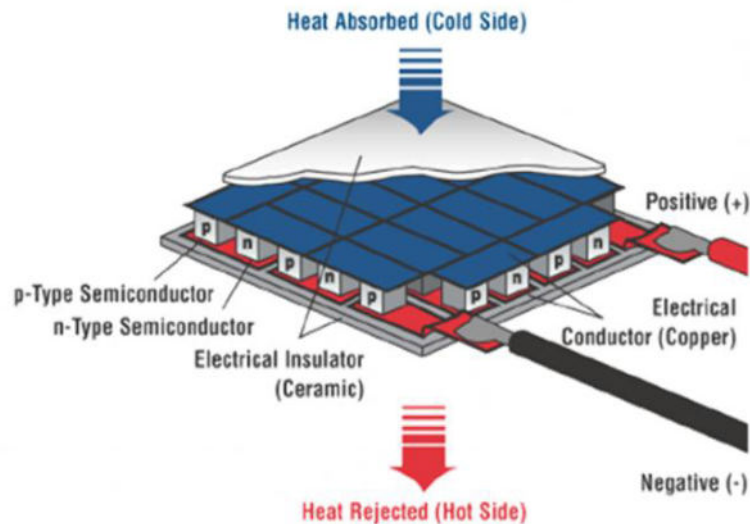


Рисунок 1.2. – Приклад роботи модуля на одиничному елементі TEM

Застосування багатьох пар напівпровідників р- та n-типу дозволяє створювати модулі Пельтьє, які здатні забезпечувати чималу потужність охолодження та нагрівання. Це дає змогу здобувати охолодження до від'єсних температур при невеликих розмірах модуля, що є важливою перевагою. Структуру такого модуля представлена на рисунку 1.3.

Для того, щоб підвищити холодопровідність не вдаючись до значного збільшення I , всі елементи Пельтьє послідовно з'єднуються в пристрій, що отримав назву батареї.



Зображення 1.3. – Конструктивна будова модуля Пельтьє

Таким чином, сьогоденній модуль складається з двох пластин, виконаних з кераміки та виконують роль ізоляторів, між якими розташовані термопари, з'єднані послідовним чином.

При цьому розташування елементів у подібній батареї здійснюється наступним чином:

- Нижня гаряча сторона (Hot Side)
- Верхня, холодна сторона (Cold Side).
- Напівпровідники, що функціонують на основі n-переходу (n-Type Semiconductor).
- Напівпровідники, що функціонують на основі p-переходу (p-Type Semiconductor).
- Провідники із міді (Conductor, Copper).
- Ізолююче керамічне покриття (Electrical isolator, Ceramic)/
- Клеми (контакти), що служать для приєднання до ДЖ (джерела живлення) (Positive+ та Negative-).

Тут p-n переходом (positive-negative) прийнято вважати електронно-дірковий перехід у місці з'єднання напівпровідників n-типу, носії зарядів якого є електрони та p-типу (дірки з позитивним зарядом, що виникають у процесі

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відриву електрона від атома). При p-n виникає перехід від одного виду провідності до іншого.

Залежно від розташування кожна зі сторін (гаряча або холодна) має контакт тільки з переходом p-n або n-p. При цьому здійснюються такі функції:

- p-n – нагрівання;
- n-p – охолодження;
- Або наоборот.

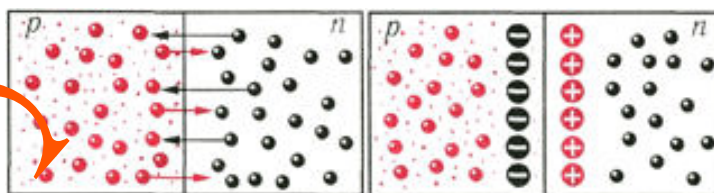


Рисунок 1.4 – Ілюстративне зображення p-n переходу

Завдяки перенесенню Q з одного боку батареї в іншу, між ними виникає дельта температур (ΔT). Як було зазначено вище, якщо змінити полярність, то гаряча і холодна поверхні просто зміняться місцями.

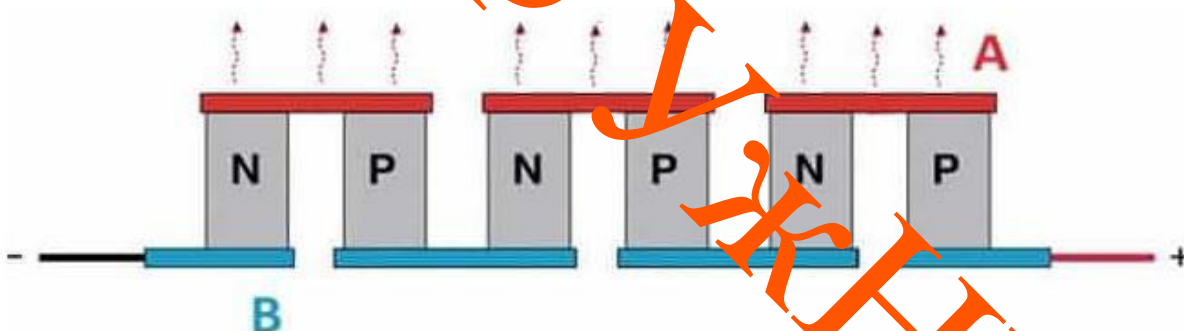


Рисунок 1.5. – Батарея Пельтьє

На цьому малюнку холодна сторона батареї позначена як B (синім кольором), гаряча – як A (червоним кольором відповідно).

Всім термоелектричним модулям з елементом Пельтьє властиві такі характеристики:

- Q_{max} (холодопродуктивність) – є максимально допустимим I і різницею T двох сторін батареї. Одиниця виміру – Ватти. Вважають, що кількість теплової Q , що надходить на холодну сторону, передається на гарячу миттєво, з нульовими втратами.

- ΔT_{max} – максимум перепаду температур між пластинами, що вимірюється в градусах. При цьому даний параметр враховується за ідеальних умов роботи: гаряча сторона - 27С, холодна – віддача тепла дорівнює нулю.
- I_{max} – максимальний I , необхідний для забезпечення ΔT_{max} , вимірюється в Амперах.
- U_{max} – величина напруги, яка матиме місце при I_{max} та ΔT_{max} (вимірюється у Вольтах).
- *Resistance* – внутрішній опір модуля постійного струму DC, вимірюється в Омах.
- COP (*Coefficient Of Performance*) – коефіцієнт, що є відношенням Q охолодження до Q , яке споживає весь елемент і є нічим іншим, як ККЛ, зазвичай його величина коливається від 0,3 до 0,5.

Приклад маркування модулів Пельть'є наведений на Рис.1.3, шифр позначає наступні його характеристики:

1. Позначення елемента, де дві перші літери завжди залишаються незмінними (TE), що означає термоелемент. Наступна літера вказує на розмір, який може бути "С" (стандартний) або "М" (маленький), а остання цифра вказує на кількість шарів (каскадів) у елементі.
2. Кількість термопар у модулі, зображеному на фото, їх кількість дорівнює 127.
3. Розмір номінального струму в Амперах, у даному випадку - 6 А.

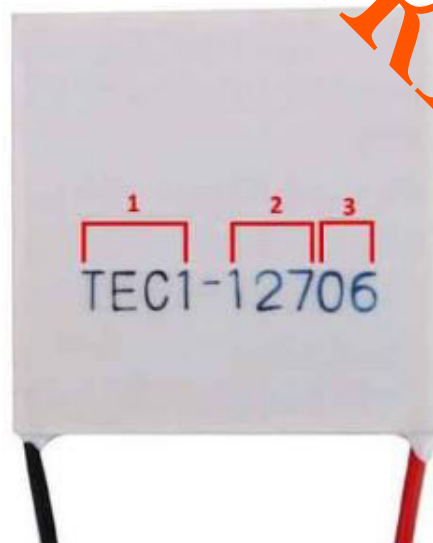


Рисунок 1.6. – Приклад модулю Пельть'є з відповідним маркуванням моделі

1.6. Плата Arduino nano

Arduino Nano — це повнофункціональний мініатюрний пристрій на базі мікроконтролера ATmega328 (Arduino Nano 3.0) або ATmega168 (Arduino Nano 2.x), адаптований для використання з макетної плати. За функціональністю пристрій схожий на Arduino Duemilanove, і відрізняється від нього розмірами, відсутністю роз'єму живлення, а також іншим типом (Mini-B) USB-кабелю. Arduino Nano розроблено і випускається фірмою Gravitech [6].

Таблиця 1.1 – Характеристичні дані Arduino Nano

Мікроконтролер	Atmel ATmega168 або ATmega328
Робоча напруга (логічний рівень)	5В
Напруга живлення (рекомендована)	7-12В
Напруга живлення (гранична)	6-20В
Цифрові входи / виходи	14 (з яких 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи)
Аналогові входи	8
Максимальний струм одного виводу	40 мА
Flash-пам'ять	16 КБ (ATmega168) або 32 КБ (ATmega328) з яких 2 КБ використовуються завантажувачем
SRAM	1 КБ (ATmega168) або 2 КБ (ATmega328)
EEPROM	12 байт (ATmega168) або 1 КБ (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Розміри плати	1.85 см x 4.3 см

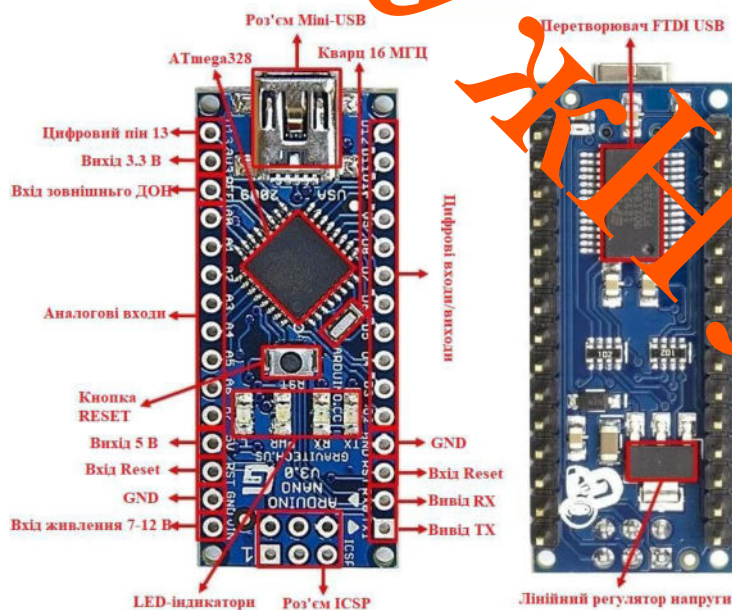


Рисунок 1.7а. – Структура мікроконтролеру Arduino Nano

Arduino використовується для розробки електронних пристроїв, які здатні приймати сигнали від цифрових та аналогових пристроїв підключених до неї, а

Характеристики:

- Сумісність з контролерами: Arduino Nano
- Вхідна напруга стабілізатора напруги: від 7,5 до 12В
- Вихідна напруга стабілізатора напруги: 5В
- Максимальний струм навантаження стабілізатора: 450 мА

1.7. Датчик температури

Для вимірювання температури, як поодиночки, так і в групі (наприклад, у системі контролю температури в будинках), використовується цифровий термометр-перетворювач з програмованою роздільною здатністю. Для коректної роботи датчика необхідно створити макет, який включає підключення живлення, контролера та помещення датчика у середовище, де вимірюється температура. Після цього, на контролер слід завантажити спеціальну бібліотеку, яка забезпечує взаємодію з датчиком. Без цієї бібліотеки, датчик не зможе обмінюватись даними з контролером, оскільки він використовує спеціальний протокол комунікації.

Датчик DHT11 – це цифровий датчик температури та вологості, що дозволяє калібрувати цифровий сигнал на виході. Складається з емнісного датчика вологості та термістора. Також, датчик містить собі АЦП для перетворення аналогових значень вологості та температури [7].

Управління датчиком DHT11 може бути здійснене за допомогою контролера Arduino або іншого керуючого мікропроцесорного пристрою, використовуючи спеціальні програми. Кожен датчик цієї моделі проходить температурну компенсацію та калібрування в камері точного калібрування, а калібрувальний коефіцієнт зберігається в пам'яті OTP.

Таблиця 1.2. – Характеристичні дані DHT11

Модель	DHT11
Джерело живлення	3-5.5 V DC
Вихідний сигнал	цифровий сигнал через одну шину
Чутливий елемент	Полімерний резистор
Діапазон вимірювання	вологість 20-90%RH;

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

	температура 0-50 Цельсія
Точність	вологість +4%RH (макс. +5%RH); температура +2,0 за Цельсієм
Роздільна здатність (або чутливість)	вологість 1%RH; температура 0,1 Цельсія
Повторюваність	вологість +1%RH; температура +1 за Цельсієм
Гістерезис вологості	+1%RH
Довгострокова стабільність	+0,5% RH/рік
Період зондування	Середній: 2 с
Взаємозамінність	повністю взаємозамінний
Розміри	12*15,5*5,5 мм

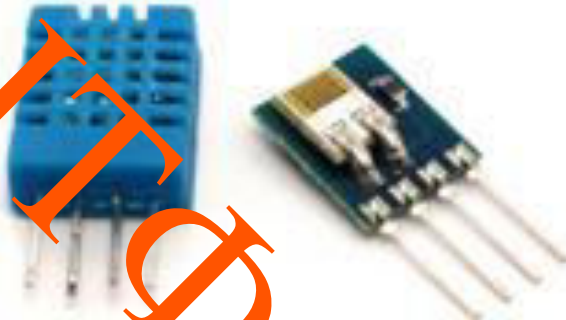


Рисунок 1.8. – Зображення термодатчика DHT11

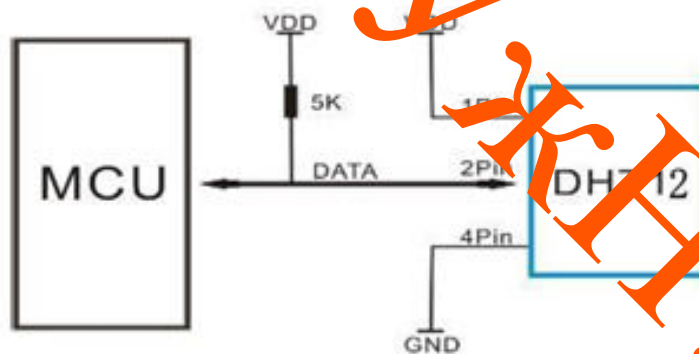


Рисунок 1.9. – Типове застосування термодатчика DHT11 (3Pin=NULL, MCU=мікрокомп'ютер або однокристальний комп'ютер, Arduino)

Модуль датчика температури і вологості підвищеної точності DHT22. Містить всі необхідні додаткові компоненти для підключення датчика до мікроконтролера. Підходить для підключення як до контролерів Arduino так і до інших мікроконтролерів з напругою логічних рівнів 5В і 3.3В. Для зменшення споживаного струму модулем, необхідно відключити світлодіод індикатора

напруги живлення на платі модуля. Датчик модуля вимірює вологість та температуру точніше свого попередника - датчика вологості та температури DHT11 [7].

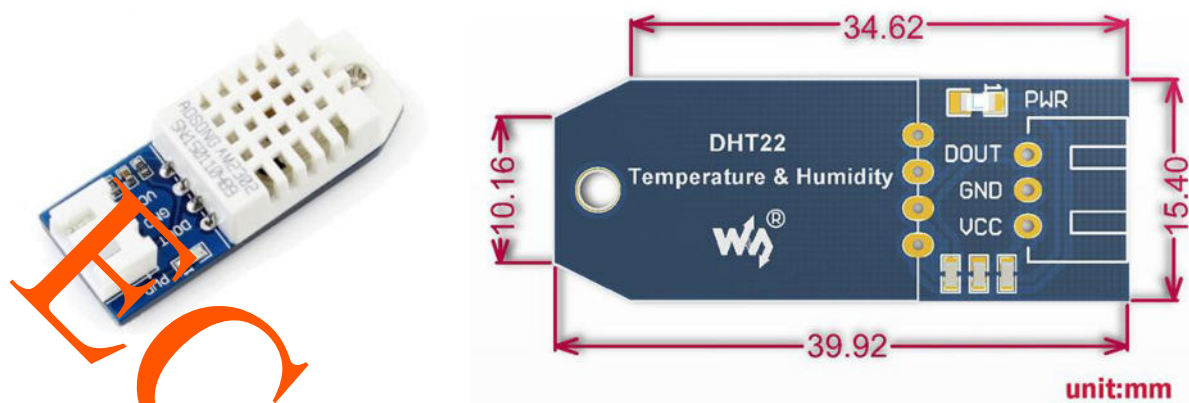


Рисунок 1.10. – Зображення термодатчика DHT22, та його структура

Характеристики термодатчик DHT22:

Температура:

Роздільна здатність виміру: 0.1 °C

Точність вимірювання: ± 0.5

Вимірюваний діапазон: $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$

Вологість:

Роздільна здатність виміру: 0.1% RH

Точність вимірювання: $\pm 2\%$ RH (25°C)

Вимірюваний діапазон: 0% RH \sim 99.9% RH

Робоча напруга: від 3.3В до 5.5 В

Рекомендовані умови зберігання:

Температура: $10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$

Вологість: 60% RH або нижче

Код виробника: DHT22 Temperature-Humidity Sensor

Застосування:

Метеостанції

Контролер вологості повітря

Пристрої контролю та управління

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Призначення виводів:

VCC ↔ Напруга живлення 3.3V ~ 5.5V

GND ↔ Загальний

DOUT ↔ Інтерфейсний висновок (підключення до мікроконтролера)

При підключенні до мікроконтролера, ви можете між виводами Vcc і Data розмістити підтягуючий pull-up резистор номіналом 10 кОм. Плата Arduino має вбудовані pull-up, однак вони дуже слабенькі - близько 100 кОм.

1.8. Дисплей LCD 1602 I2C

LCD I2C QC1602A дисплей для підключення до Arduino. Має два рядки по 16 символів в кожному. Працює зі стандартною бібліотекою LiquidCrystal з поставки Arduino IDE [7].

Текстовий дисплей використовується для відображення інформації з датчиків, створення меню або вікна. На екрані LCD 1602 відображаються чорні символи розміром 5×8 пікселів. Вбудоване підсвічування включається під час подачі живлення на контакти модуля. Текстовий дисплей без модуля i2c підключається до мікроконтролера Ардуно через 8 контактів. Приклад підключення lcd з модулем i2c показаний на зображенні нижче.

Характеристики дисплею LCD I2C QC1602:

- Розміри 80 x 36 мм
- Робоча температура 0 ~ 50 ° C
- Підсвітка блакитна
- Колір символів білий
- Розмір символу 4.35 x 2.95мм
- Формат 16 x 2
- Розміри точки 0.5 x 0.5мм
- Інтерфейс I2C
- Видима область 64.5 x 13.8мм
- Живлення 5В

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

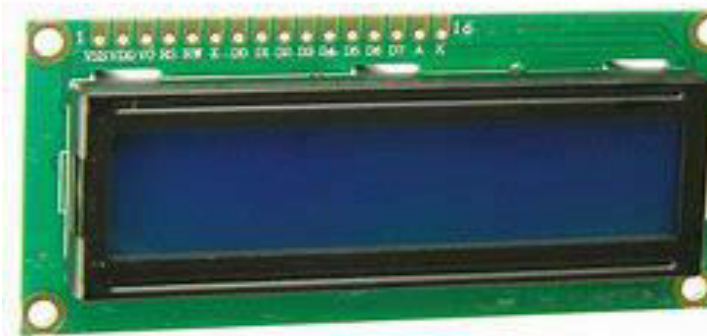


Рис. 1.11. – Зображення дисплею LCD I2C QC1602, та модуля розширення виводів для підключення до Arduino

I2C модуль розширення виводів Arduino для підключення LCD дисплея. Відмінний I2C інтерфейсний модуль на мікросхемі PCF8574T для розширення кількості портів вводу/виводу для контролерів Arduino, мікроконтролерів STM8 та STM32 і мінікомп'ютерів Raspberry Pi та Orange Pi. Може використовуватися як інтерфейсна плата для підключення РКІ 1602 і 2004, так і як самостійний пристрій. Для регулювання контрастності дисплея встановлений змінний резистор. Для нормальної роботи дисплея потрібно відрегулювати його контрастність [7].

При використанні модуля як розширювач портів вводу/виводу слід враховувати те, що вивід P3 має інверсний вихід з відкритим колектором.

У деяких партіях розширювачів встановлені мікросхеми PCF8574AT, які повністю ідентичні за функціональними можливостями але відрізняються діапазоном адрес шини I2C замість 0x20-0x27, вони відгукуються на адреси 0x38-0x3f.

Характеристики модуля розширення виводів I2C:

- Інтерфейсна мікросхема: PCF8574AT/T
- Інтерфейс: I2C
- Діапазон адрес I2C: PCF8574T - 0x20-0x27, PCF8574AT - 0x38-0x3f
- Максимальна кількість під'єднаних однотипних модулів: 8

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Напруга живлення: 5 В
- Розмір: 5.2 x 1.8 x 1.4 см
- Сумісність: РКІ 1602 и 2004

РК дисплей 1602 і2с підключається до плати Ардуїно всього 4 проводами — 2 провoda для обміну даними та 2 для живлення. Підключення дисплея QAPASS 1602a до Arduino здійснюється стандартним для шини і2с способом: виведення SDA підключається до порту А4 (SDA), висновок SCL до порту А5 (SCL). Живлення дисплея здійснюється від 5 Вольт.

1.9. L298N Модуль драйвера двигуна

L298N — це модуль драйвера двигуна високої потужності для керування двигунами постійного струму та кроковими двигунами. Цей модуль складається з мікросхеми драйвера двигуна L298 і регулятора 78M05 5 В. Модуль L298N може керувати до 4 двигунів постійного струму або 2 двигунів постійного струму з регулюванням напрямку та швидкості.

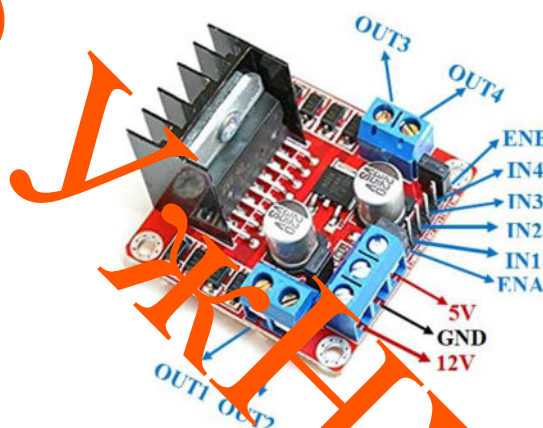
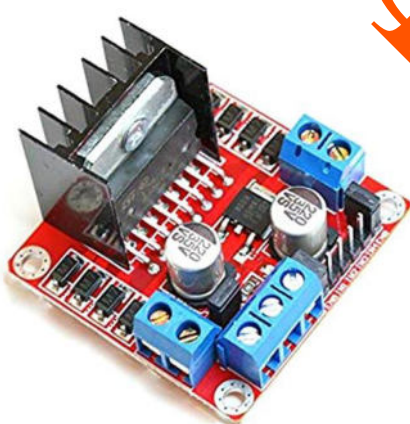


Рисунок 1.12. – Зображення модулю драйвера двигуна, та його Pinout

Таблиця 1.3. – Конфігурація контактів модуля L298N

Назва	Опис
IN1 & IN2	Вхідні контакти двигуна А. Використовується для керування напрямком обертання двигуна А
IN3 & IN4	Вхідні контакти двигуна В. Використовується для керування напрямком обертання двигуна В
ENA	Вмикає сигнал ШІМ для двигуна А

ENB	Вмикає сигнал ШІМ для двигуна В
OUT1 & OUT2	Вихідні контакти двигуна А
OUT3 & OUT4	Вихідні контакти двигуна В
12V	Вхід 12 В від джерела постійного струму
5V	Постачає живлення для логічної схеми перемикачів всередині мікросхеми L298N
GND	Штифт заземлення

Характеристики модулю драйвера двигуна:

- Модель драйвера: L298N 2А,
- Чіп драйвера: Double H Bridge L298N,
- Напруга живлення двигуна (максимальна): 46 В,
- Струм живлення двигуна (максимум): 2 А,
- Логічна напруга: 5 В,
- Напруга драйвера: 5-35 В,
- Струм драйвера: 2 А,
- Логічний струм: 0-36 мА,
- Максимальна потужність (Вт): 25 Вт,
- Датчик струму для кожного двигуна,
- Радіатор для кращої продуктивності,
- Світлодіодний індикатор увімкнення.

Коротко про модуль L298N

Модуль драйвера двигуна L298N складається з мікросхеми драйвера двигуна L298, регулятора напруги 78M05, резисторів, конденсатора, світлодіоду живлення, перемички 5В в інтегральній схемі. 78M05 Регулятор напруги буде ввімкнено лише після встановлення перемички.

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

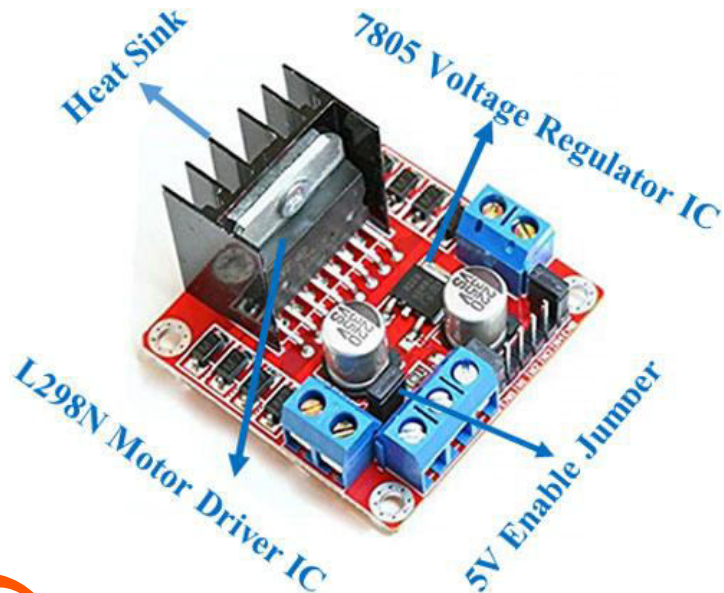


Рисунок 1.13. – Будова модулю драйвера двигуна L298N 2A

Коли джерело живлення менше або дорівнює 12 В, тоді внутрішня схема живиться від регулятора напруги, а пін 5 В можна використовувати як вихідний контакт для живлення мікроконтролера. Перемичку не можна встановлювати, якщо напруга джерела живлення перевищує 12 В, а для живлення внутрішньої схеми необхідно подавати окремі 5 В через клему 5 В.

Піни ENA та ENB є пінами керування швидкістю для двигуна А та В, тоді як IN1 та IN2 та IN3 та IN4 є пінами керування напрямком для двигуна А та В.

Внутрішня електрична схема модуля L298N драйвер двигуна наведена нижче:

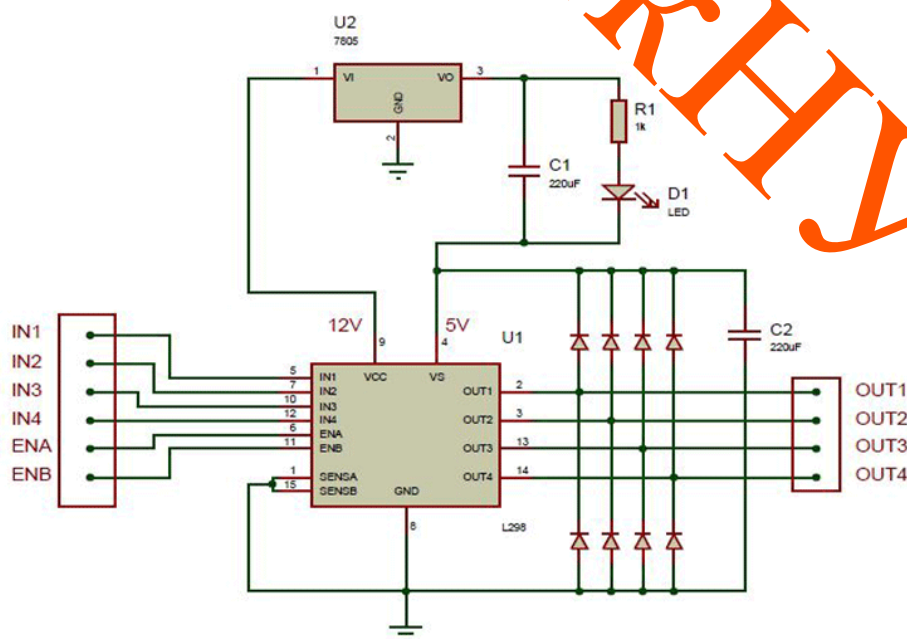


Рисунок 1.14. – електрична схема модуля L298N 2A

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.10. Енкодер

Енкодер (перетворювач кутових переміщень) – це електронний пристрій, який дозволяє з необхідною точністю виміряти різні параметри обертання будь-якої деталі, як правило, валу електродвигуна або редуктора [8].

Існують два види енкодерів – інкрементальний та абсолютний.

Інкрементальний енкодер або давач кута повороту – це електромеханічний пристрій, призначений для перетворення кутового положення вала або осі в електричні сигнали. Інкрементальний енкодер при обертанні формує імпульси, число яких пропорційне куту повороту. Підрахунок числа цих імпульсів дає величину кута повороту вала енкодера щодо його початкового положення. Цей тип енкодерів не формує вихідні імпульси, коли його вал знаходиться в спокої. Інкрементальні енкодери знаходять широке застосування в промислових засобах керування, побутовій та музичній техніці.



Рисунок 1.16. – Енкодер EC11 з кнопкою

1.11. Реле електромеханічне, Songle SRD-05VDC-SL-C

SRD-05VDC-SL-C – це модель електромеханічного реле від компанії Songle. Характеристики якого [9]:

Таблиця 1.4. – Характеристики електромеханічного реле SRD-05VDC-SL-C

Номінальна робоча напруга котушки	5В
Номінальний робочий струм котушки	71 мА
Опір котушки	70 Ом
Потужність	0,36 Вт
Максимальний комутований струм	10А
Максимальна напруга, що комутується (постійна)	28 В
Максимальна напруга, що комутується (перемінна)	250 В
Робоча температура -25°C..+70°C	-25°C..+70°C

1.12. DC мотор з пропелером

Двигун постійного струму (англійською DC мотор) влаштований за принципом взаємодії магнітних полів. Два найбільш поширених типи двигунів постійного струму – щіткові, або колекторні і без щіткові, або вентильні двигуни.

Щіткові двигуни є найпростішими і часто використовуваними двигунами, особливо для промислового обладнання і для товарів народного споживання.

Безщіткові електромотори менш вимогливі в обслуговуванні, працюють тихіше та більш надійні.

Керування електро-двигуном зводиться до реверсу (зміна напрямку обертання валу) та регулювання обертів. Реверс здійснюється зміною полярності струму в колі якоря. Регулювання швидкості може здійснюватися зміною опору кола якоря за допомогою реостата в обмотці збудження або електронних схем управління. Переваги та недоліки:

Плюси:

- *хороші пускові характеристики;*
- *компактні розміри і невелика маса;*
- *простота в управлінні.*

Мінуси:

- *необхідність випрямлення струму;*
- *підвищений знос графітових щіток і колектора;*
- *крутний момент знижується з ростом оборотів;*
- *заміна ротора обходиться недешево.*



Рисунок 1.17. –
Мотор з пропелером,
розмір тіла: 6x16мм,
розмір вала: 0,8x7мм,
максимальна
швидкість: 50000об /
хв

1.13. Области застосування елементів Пельтьє

Хоча всі такі батареї, засновані на елементах Пельтьє, мають COP, що дорівнює 0,3-0,5, що фактично відповідає їх ККД, вони активно використовуються у вимірювальних системах, різноманітній обчислювальній техніці, а також як елемент багатьох побутових приладів, а саме :

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Як складові холодильних пристроїв.
- У обчислювальній техніці, відеокартах.
- У побутових кулерах для води.
- Як генератор електроенергії, при цьому одна із сторін елемента має примусово нагріватися.
- У всіх видах цифрових пристроїв, де дуже важливим є якісне охолодження (відеокамери, мікросхеми, прилади для здійснення зв'язку).
- У системах кондиціонування.
- Для телескопічної техніки, яка потребує охолодження.
- Як складник приладів нічного бачення.

Останнім часом термоелектричні модулі почали активно використовувати для охолодження центрального CPU процесора в персональних комп'ютерах. Зважаючи на низьку ефективність термо елементів, вигода таких конструкцій залежить від моделі та конкретної реалізації. Для використання таких систем охолодження необхідний досить потужний блок живлення, що вже є істотним недоліком при виборі системи охолодження. Навіть значну частину потужності забирає CPU та GPU, а необхідні блоки живлення можуть бути дорогими.



Рисунок 1.18. – Области застосування елементів Пельтьє: а) - ПЛР-ампліфікатор Gentier 96E/96R, б) міні-чиллер та с) система водяного охолодження на елементах Пельтьє

2. Розрахунок термоелектричного модуля Пельт'є

2.1. Робота тепла в модулі Пельт'є

Модуль Пельт'є, являє собою 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 має тепловий контакт з одним з двох радіаторів. В результаті проходження електричного струму певної полярності утворюється перепад температур між радіаторами модуля Пельт'є [10].

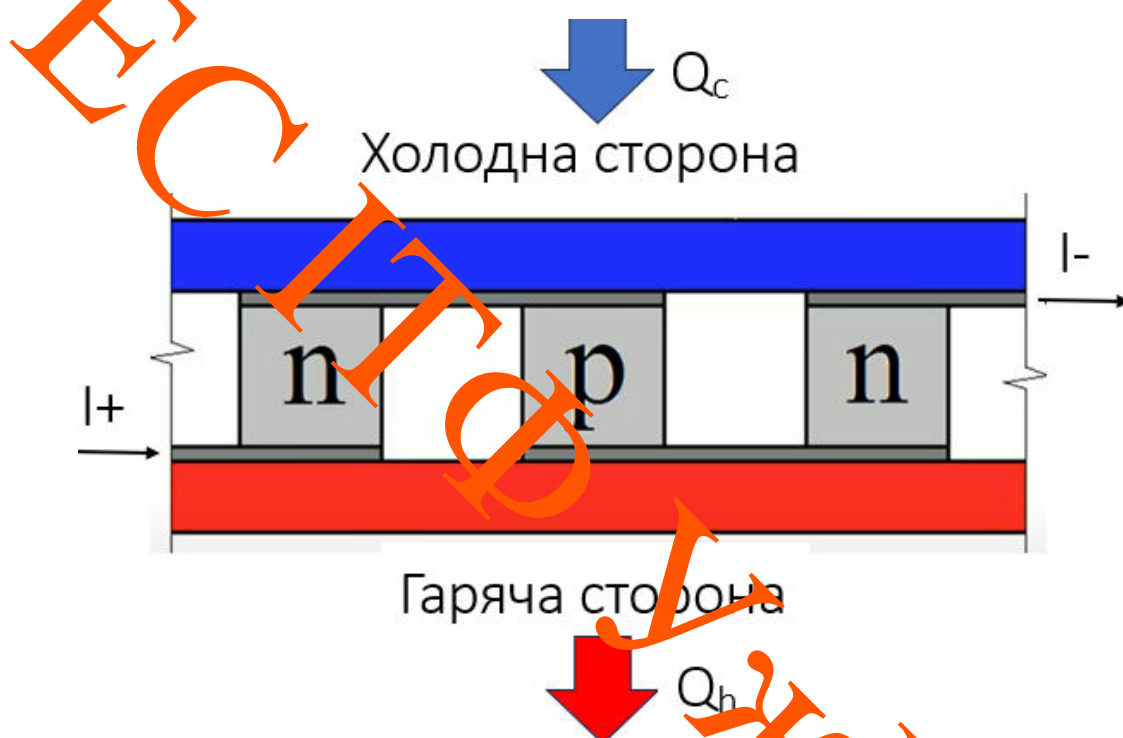


Рисунок 2.1. – Принцип роботи модуля Пельт'є

Кількість тепла, що виділяється модулем завжди більша за кількість тепла, що поглинається тим самим модулем.

Додаткове тепло Q_h , що виділяється в об'ємі провідника при протіканні через нього електронного струму, визначається згідно закону Джоуля-Ленса:

$$Q_h = Q_J + Q_c \quad (2.1)$$

де Q_h - тепло, що виділяється; Q_c - тепло, що поглинається; Q_J - Джоулеве тепло, яке дорівнює

$$Q_J \approx P = U \cdot I \quad (2.2)$$

Енергоефективність приладу β знаходиться по формулі:

$$\beta = \frac{Q_c}{P} \quad (2.3)$$

Характеристики повного модуля Пельть'є можна вичислити за допомогою результатів розрахунку окремої термо-пари модулю Пельть'є.

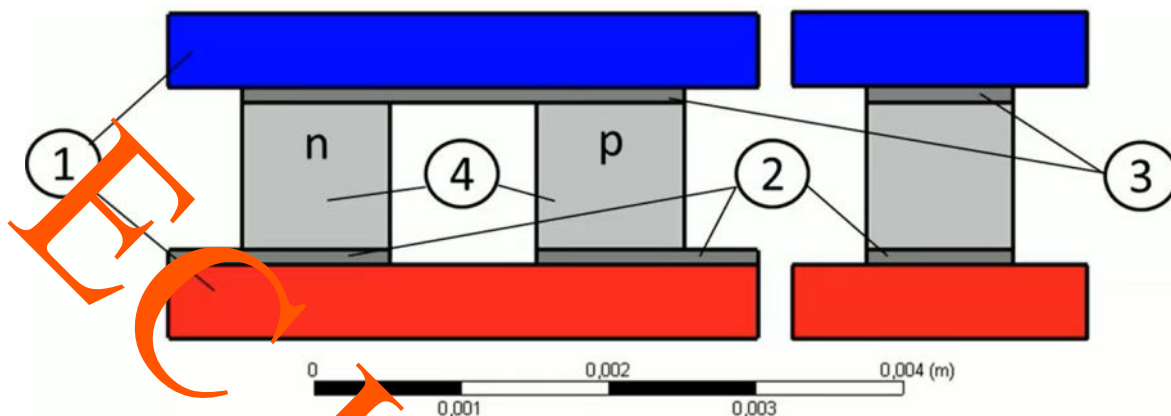
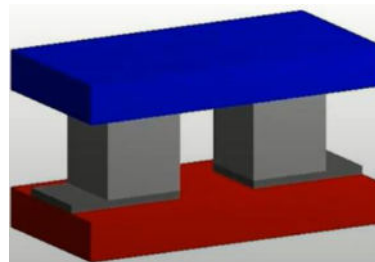


Рисунок 2.2 – Геометрична модель термо-пари модулю Пельть'є

Елементи термо-пари:

1. керамічні пластини (4 x 2 x 0,5 мм);
2. мідні пластини (1,5 x 1,0 x 0,1 мм);
3. мідна пластина (3,0 x 1,0 x 0,1 мм);
4. напівпровідникові елементи (1,0 x 1,0 x 1,0 мм).



Моделювання термоелектричних явищ, які відбуваються в термо-парі елемента Пельть'є засновуються в наступній математичній моделі:

2.2. Математична модель

В термоелектричному аналізі рівняння теплопровідності

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = q' \quad (2.4)$$

та рівняння неперервності електронного заряду

$$\nabla \cdot \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.5)$$

пов'язані за допомогою визначальних рівнянь

$$q = [\Pi] \cdot J - [\lambda] \cdot \nabla T \quad (2.6)$$

$$J = [\sigma](E - [\alpha] \cdot \nabla T) \quad (2.7)$$

та визначального рівняння для діелектричного середовища

$$D = [\epsilon] \cdot E \quad (2.8)$$

де q' - тепловиділення на одиницю об'єму, Вт/м³; q - вектор теплового потоку, Вт/м²; J - вектор щільності електронного струму, А/м²; E - вектор інтенсивності електронного поля, В/м; D - вектор густини електронного потоку, Кл/м²; $[\lambda]$ - матриця теплопровідності, Вт/(м·К); $[\sigma]$ - матриця електропровідності, См/м; $[\alpha]$ - матриця коефіцієнтів Засбека, В/К; $[\Pi]=T[\alpha]$ - матриця коефіцієнтів Пельтьє, В; $[\epsilon]$ - матриця коефіцієнтів діелектричної проникності, Ф/м. В цій моделі ефект Томпсона може бути прийнятий як залежність коефіцієнта Засбека від температури.

За незмінності в часі магнітних полів електричне поле E стає безвихровим ($\nabla \times E=0$) та може бути обчислене за допомогою скалярного електричного потенціалу φ :

$$E = -\nabla\varphi \quad (2.9)$$

Використовуючи підстановку (2.6) (2.9) в (2.4) – (2.5) ми отримуємо систему роздільних рівнянь для зв'язного термоелектричного аналізу:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot ([\Pi] \cdot J) - \nabla \cdot ([\lambda] \cdot \nabla T) = q' \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot ([\epsilon] \cdot \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t}) + \nabla \cdot ([\sigma] \cdot [\alpha] \cdot \nabla T) + \nabla \cdot ([\sigma] \cdot \nabla \varphi) = 0 \quad (2.11)$$

де q' в рівнянні (2.10) включає електричну потужність $J \cdot E$, що витрачається на генерацію тепла (Джоулеве тепло) та виконання роботи полем Засбека $[\alpha] \cdot \nabla T$.

2.3. Теплові граничні умови

В якості теплових граничних умов в розрахунку можуть бути використані:

- *Конвекція (закон Ньютона-Рихмана):*

$$-\vec{\lambda} \vec{n} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha (T_w - T^e) \quad (2.12)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С); n – нормаль до поверхні; T_w – температура твердої стінки, °С; T^e – температура навколишньої середовища, °С.

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Температура, °C
- Тепловий потік, Вт
- Щільність теплового потоку, Вт/м²
- Відсутність теплових потоків (абіотичні ГУ):

$$\vec{\lambda} \vec{n} \frac{dT(x,y,z,t)}{dn} \Big|_{\Gamma} = 0 \quad (2.13)$$

Початкова температура: 22°C по всій розрахунковій області.

В електронній частині моделі найчастіше використовуються такі граничні умови:

- Напруга, В
- Ток, А
- Та інші

2.4. Температурні характеристики матеріалів

Таблиця 2.1. – Електрофізичні характеристики матеріалів

Назва	Кераміка	Мідь	Полупроводник	
			n-тип	p-тип
Щільність, ρ, кг/м ³	3250,0	8300,0	2300,0	2300,0
Коефіцієнт теплопровідності, λ, Вт/(м·К)	f(T)	f(T)	f(T)	f(T)
Питома теплоємність с, Дж/(кг·К)	800,0	385,0	800,0	800,0
Питомий опір γ, Ом·м	1,0·10 ⁻¹⁰	f(T)	f(T)	f(T)
Коефіцієнт Заєбека s, В/К	-	-	f(T)	f(T)

Для розрахунків було використано наступні температурні залежності матеріалів:

1) Коефіцієнт теплопровідності

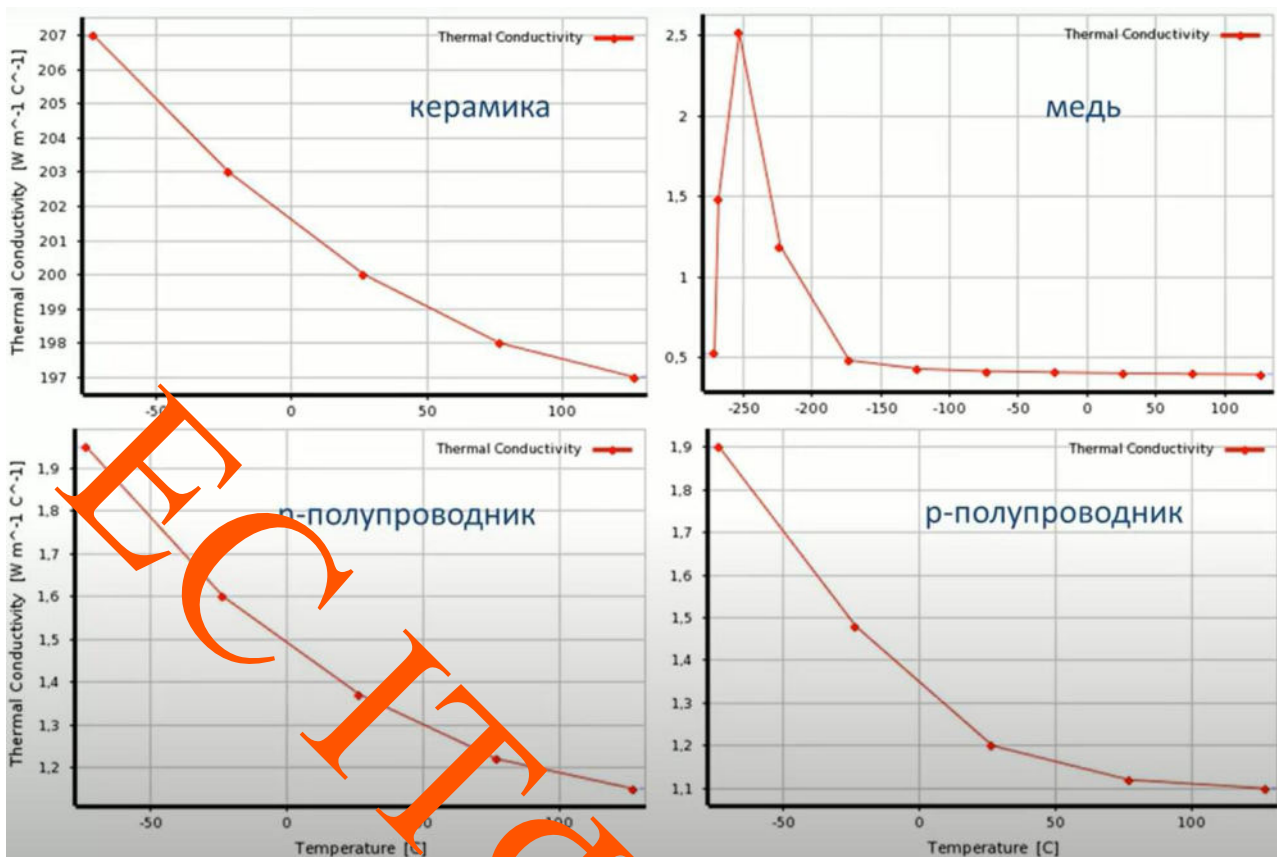


Рисунок 2.3. – Коефіцієнт теплопровідності

2) Питомий опір

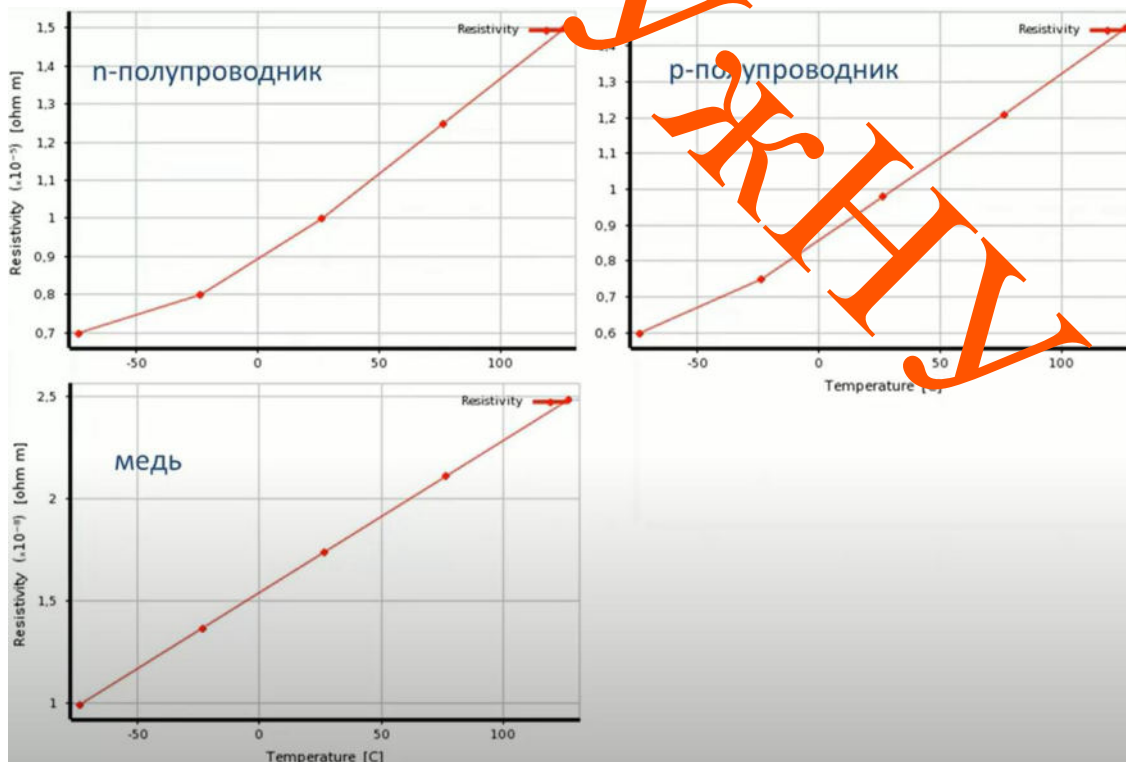


Рисунок 2.4. – Питомий опір

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3) Коефіцієнт Засебека

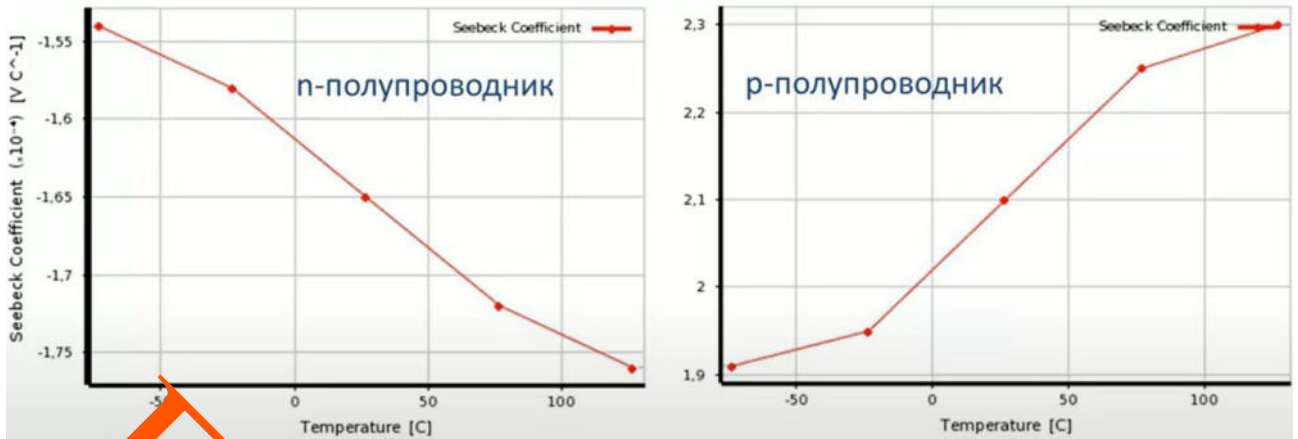


Рисунок 2.5. – Коефіцієнт Засебека

2.5. Моделювання роботи елемента Пельтьє

Для виконання розрахунків та моделювання використовується програма COMSOL 6.1. Застосовуючи можливості програми створено графічну модель елемента Пельтьє з такими параметрами:

Name	Expression	Value	Description
length	40[mm]	0.04 m	Total length
width	40[mm]	0.04 m	Total width
height	2.5[mm]	0.0025 m	Total height
d_conduc...	100[um]	1E-4 m	Conductor thickness
d_ceramics	0.3[mm]	3E-4 m	Ceramics thickness
leg_length	1[mm]	0.001 m	Leg cross section in length
leg_width	1.2[mm]	0.0012 m	Leg cross section in width
leg_height	height-2*(d_co...	0.0017 m	Leg height
pitch	0.5[mm]	5E-4 m	Pitch
n_length	floor((length-2*...	26	Number of legs in length
n_width	floor((width-2*...	23	Number of legs in width
network_l...	(leg_length+pit...	0.0385 m	Length of legs network
network_...	(leg_width+pitc...	0.0386 m	Width of legs network
N	(floor((length-2...	299	Number of thermocouples
Tref	323.15[K]	323.15 K	Hot side temperature
dT0	50[K]	50 K	Prescribed temperature d...
I0	1	1	Prescribed relative electri...

Рисунок 2.6. – Задані параметри елемента Пельтьє

Отримана графічна модель елемента Пельт'є:

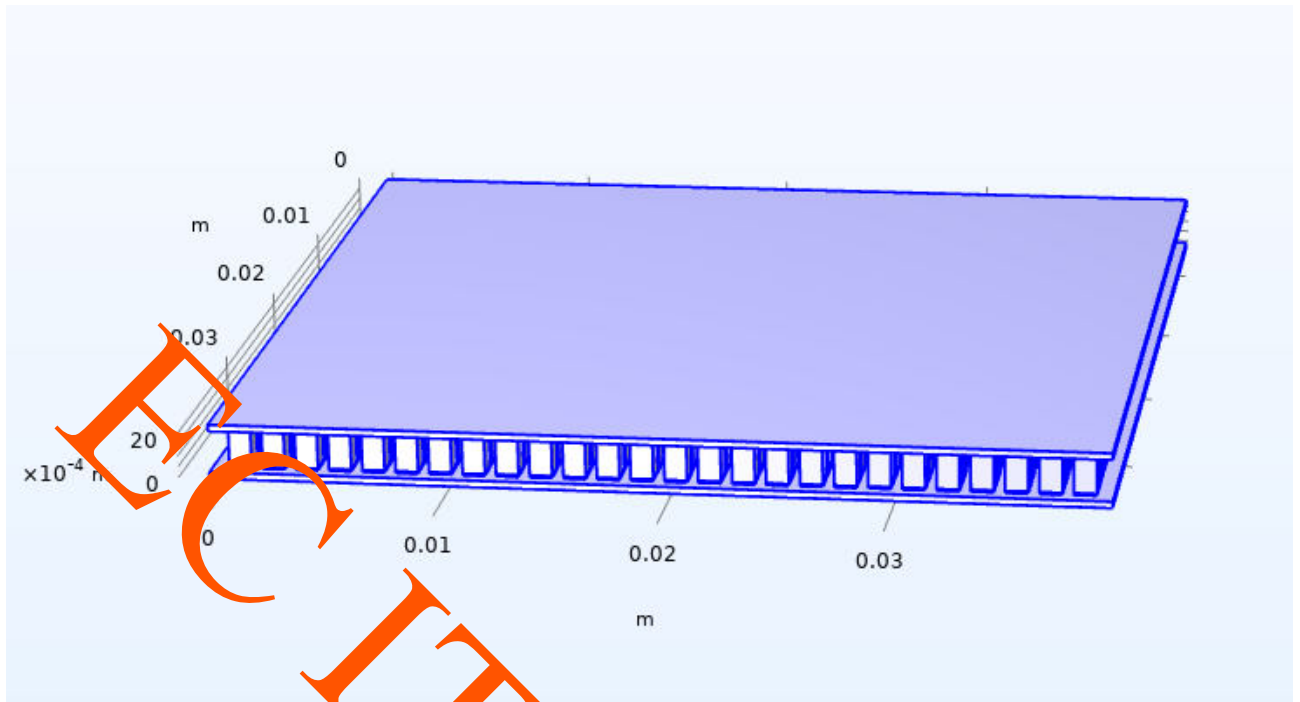


Рисунок 2.7. – Графічна модель елемента Пельт'є

Отримані визначні параметри елемента Пельт'є:

Maximum temperature difference (K)		73.171	
Required current for maximum temperature difference (A)	Required voltage for maximum temperature difference (V)		1.4923
2.9849			
Overall electrical resistance (Ω)	Maximum heat dissipation (W)	Figure of merit (1/K)	
0.46979	2.5510	0.0023177	
IO (1)	dT0=20 K, Coefficient of performance (1)	dT0=40 K, Coefficient of performance (1)	dT0=60 K, Coefficient of performance (1)
0.10000	-1.1221	-6.3230	-9.0809
0.15000	0.98446	-2.4532	-4.4000
0.20000	1.5283	-0.92112	-2.3824
dT0 (K)	Maximum: Maximum coefficient of performance (1)		
20.000	1.6325		
40.000	0.50687		
60.000	0.12833		

Рисунок 2.8. – Робочі параметри

Звідки можна зробити вивід, що представлений елемент Пельт'є здатен підтримувати температурну різницю більше 70 градусів та має найкращий ККД в проміжку від 20 по 40 градусів Кельвіну при умові надання 3А та 1.5В. До елемента Пельт'є в схемі підводиться 12В та 5А.

Отримані залежності за струмом та за опором:

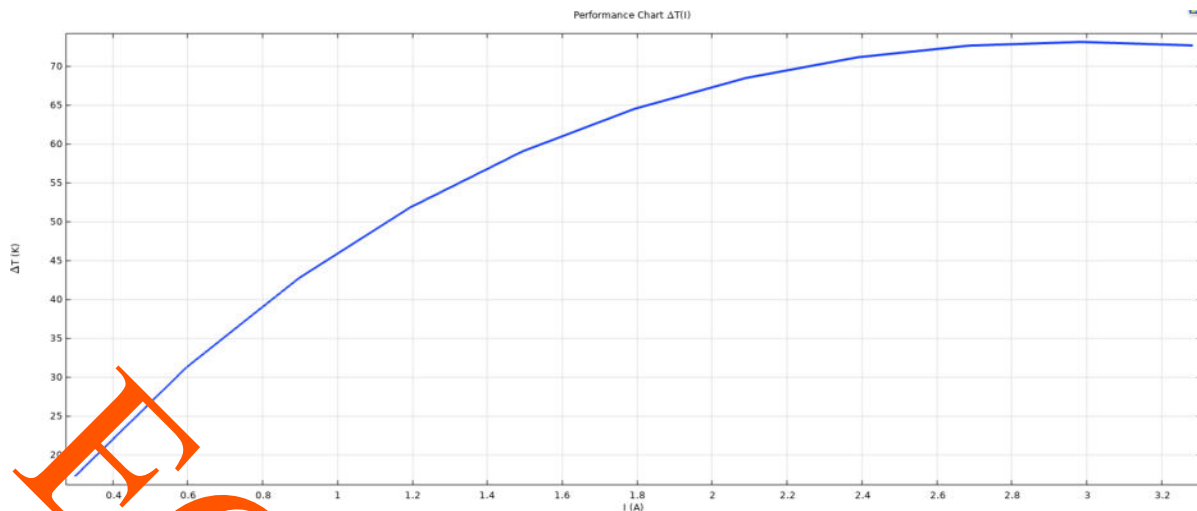


Рисунок 2.9. – Залежність за струмом

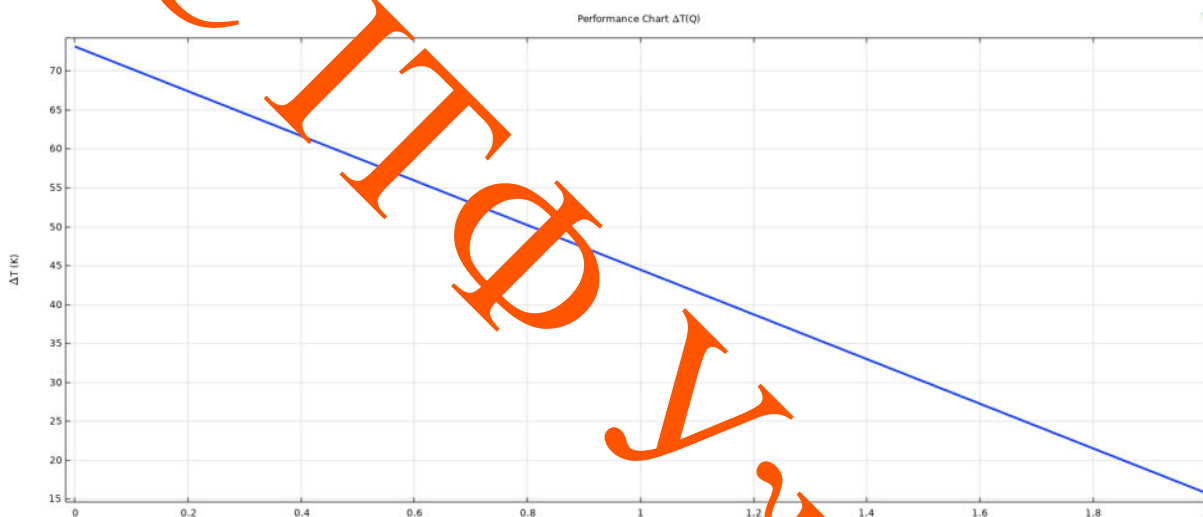


Рисунок 2.10. – Залежність за опором

Коефіцієнт корисної дії елемента:

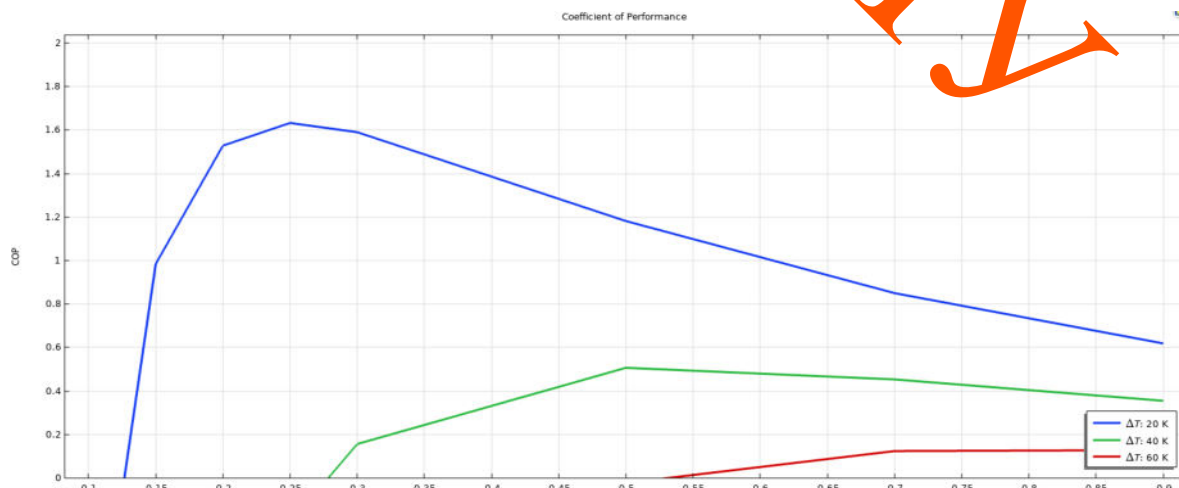


Рисунок 2.11. – ККД елемента Пельть'є

3. Моделювання схеми майбутнього пристрою

3.1. Структурна схема кулеру

Структурна схема — схема, яка визначає основні функціональні частини виробу, їх взаємозв'язки та призначення [11]. Вона призначена для відображення загальної структури пристрою, тобто його основних блоків, вузлів, частин та головних зв'язків між ними. Із структурної схеми повинно бути зрозуміло, навіщо потрібний даний пристрій і як він працює в основних режимах роботи, як взаємодіють його частини. Позначення елементів структурної схеми можуть обиратись довільно, хоча загальноприйнятих правил виконання схем слід дотримуватись.

На структурних електричних схемах (ГОСТ 2.702-75) у вигляді прямокутників або умовних графічних позначень зображають усі головні частини виробу (елементи, пристрої, функціональні групи) та показують взаємозв'язок між ними. При цьому графічна побудова схеми повинна надавати наочне уявлення про послідовність взаємодії функціональних частин виробу, що відслідковується за допомогою стрілок, які наносяться на лініях взаємозв'язку.

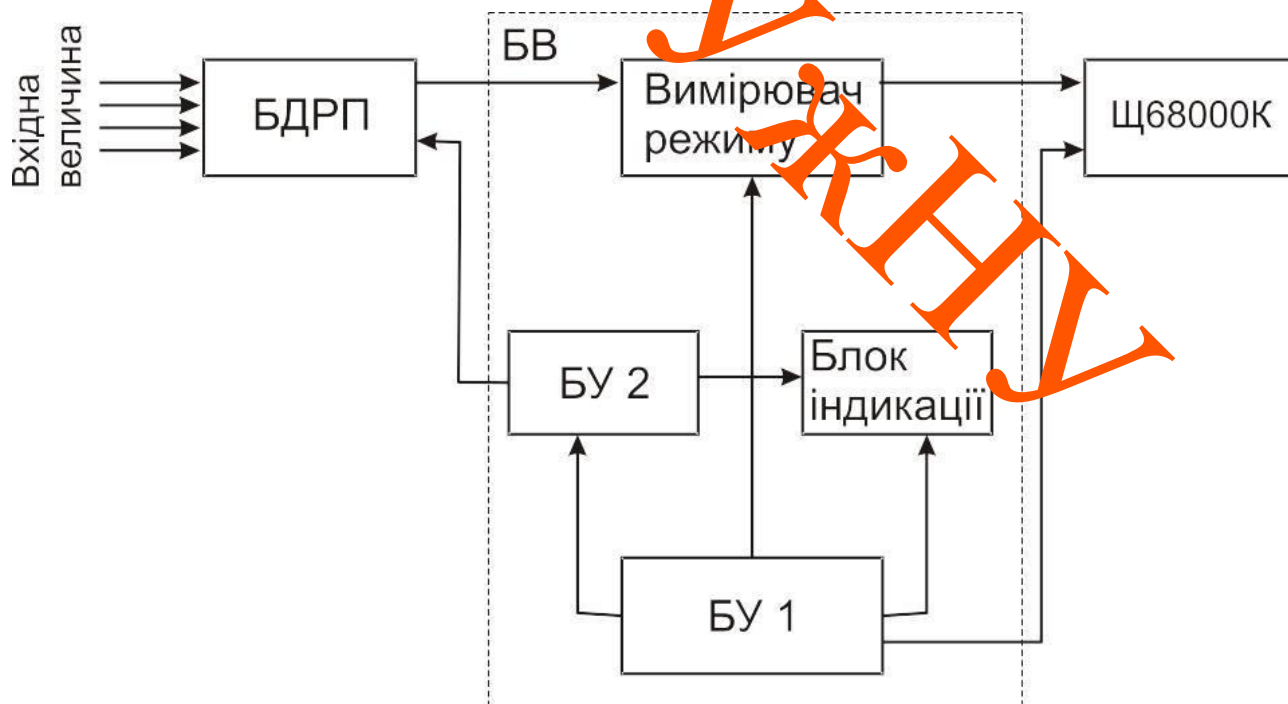


Рисунок 3.1. – Приклад структурної схеми

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно поставлених задач було складено наступну структурну схему:

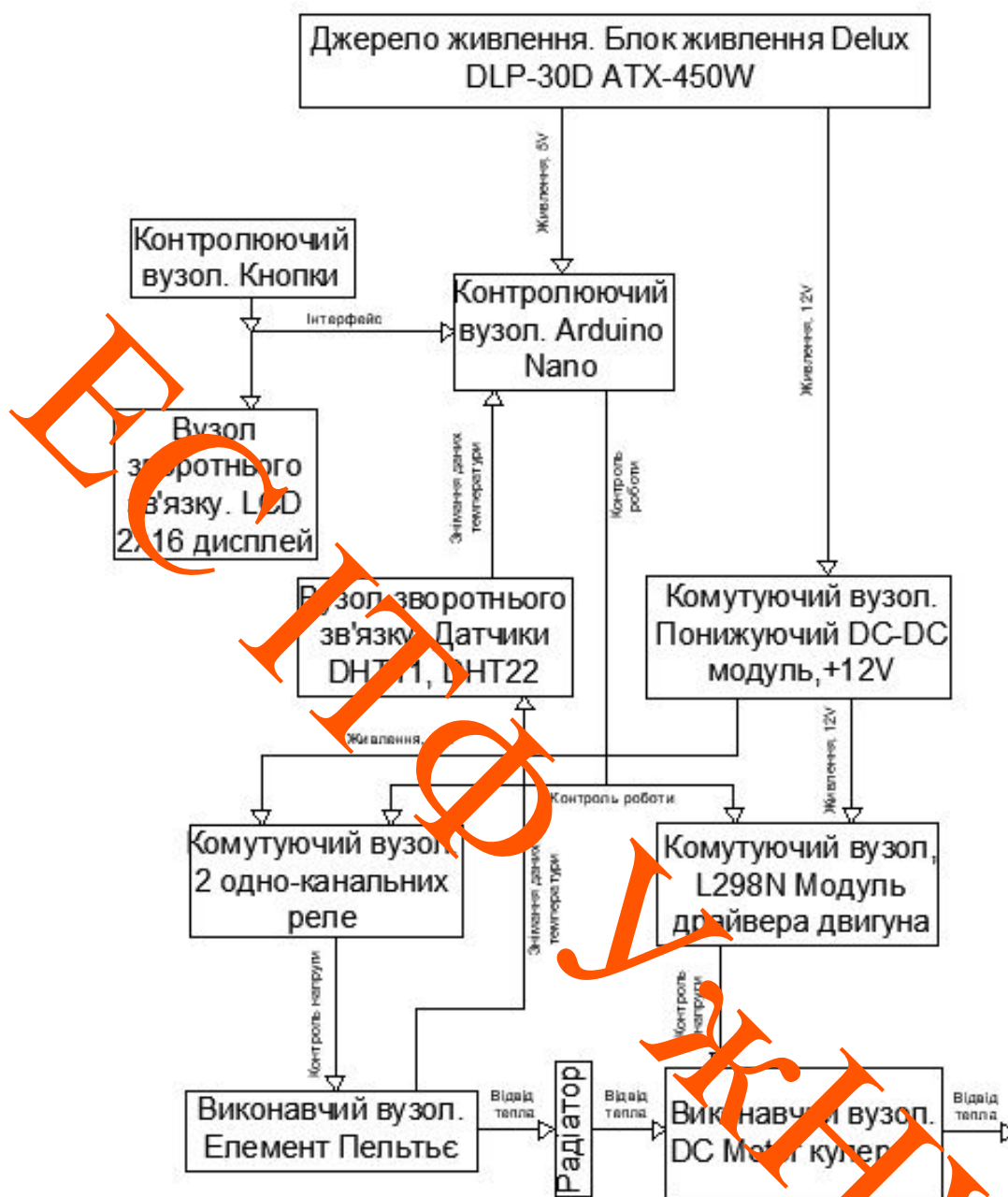


Рисунок 3.2. – Структурна схема кулера

Згідно структурної схеми прилад складається з наступних вузлів:

- *Джерело живлення*
- *Контролюючий вузол*
- *Вузол зворотного зв'язку*
- *Комутуючий вузол*
- *Виконавчий вузол*

3.2. Джерело живлення

В якості джерела живлення використовується комп'ютерний блок живлення моделі DELUX DLP-30D ATX-450W.



Рисунок 3.3. – DELUX DLP-30D ATX-450W

Блок живлення DELUX 450W (DLP-30D) - це якісне джерело електроживлення, призначений для постачання різних комп'ютера електричною енергією. У його завдання входить перетворення мережевої напруги до заданих значень, їх стабілізація та захист від незначних перешкод напруги живлення. Основним параметром блоку живлення є максимальна потужність, що віддається у навантаження. У DELUX 450W (DLP-30D) вона становить 450W, що забезпечить живленням усі елементи системи [12].

Для забезпечення приладу електричною енергією з блока живлення знімається дві напруги – 5В для плати Arduino nano та 12В для роботи виконавчих елементів.

3.3. Контролюючий вузол

Контролюючий вузол складається з плати Arduino nano встановленої на плату розширення виходів Arduino Shield для підключення всіх елементів пристрою та трьох кнопок – select, up, down. Кнопка select вибирає режим роботи приладу (Mode), кнопки up і down встановлюють значення бажаної температури (Tset)

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.4. – Контролюючий вузол в структурній схемі

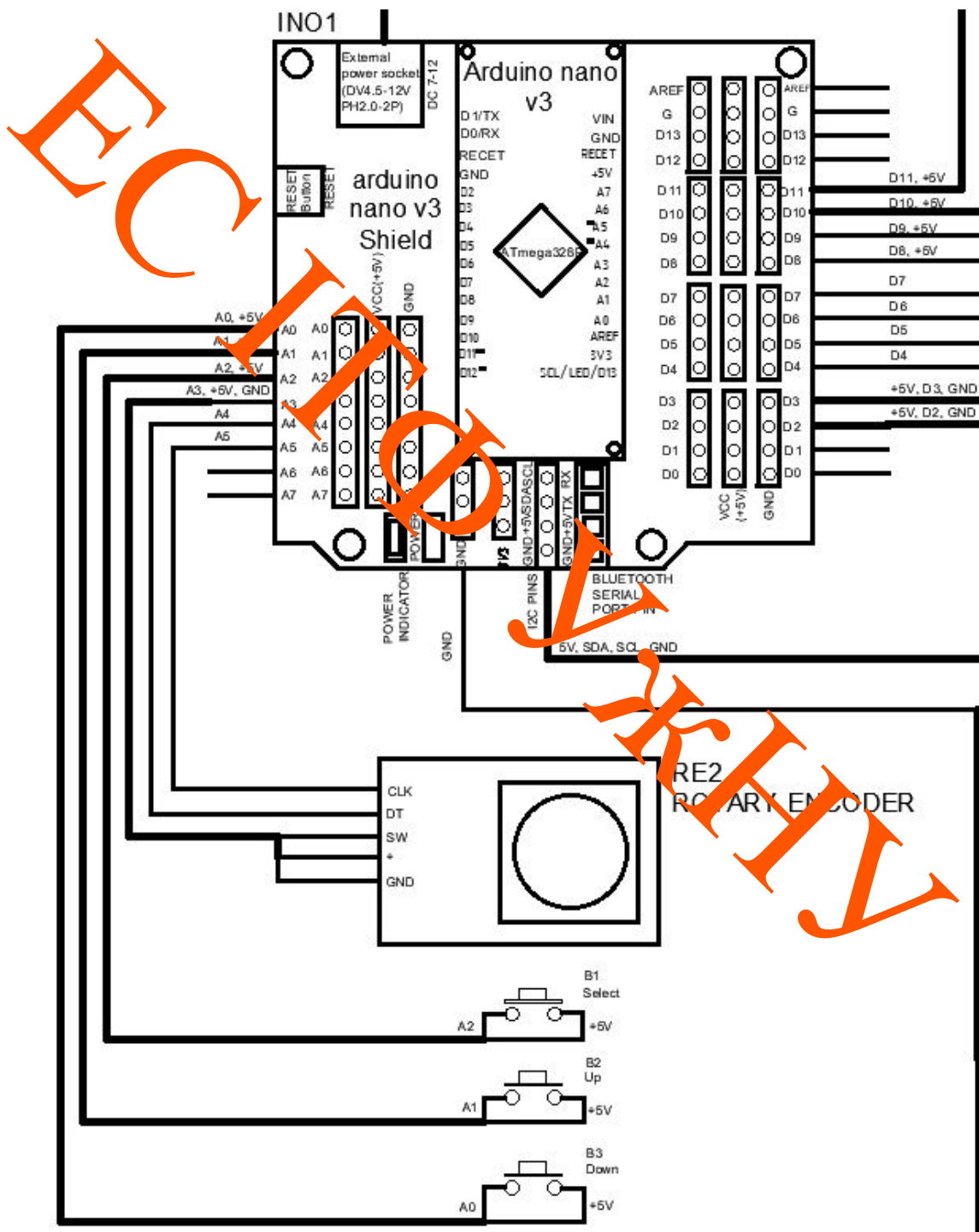


Рисунок 3.5. – Контролюючий вузол в принциповій схемі

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Вузол зворотного зв'язку

Зворотний зв'язок (англ. feedback) — вплив результату функціонування будь-якої системи на характер її подальшого функціонування. Термін «зворотний зв'язок» використовують стосовно перебігу процесів у соціальних, біологічних, технічних, економічних та інших системах, а також у кібернетиці та теорії автоматичного регулювання та управління [13].

Вузол зворотного зв'язку зчитує інформацію про кількість тепла як зовні прилад, використовуючи давач DHT11, так і в робочій зоні охолодження кулеру завдяки давачу моделі DHT22. Для відображення зчитаних даних про температуру, а також для відображення вибраного робочого режиму та настройок бажаної температури, використовується LCD дисплей 2x16:

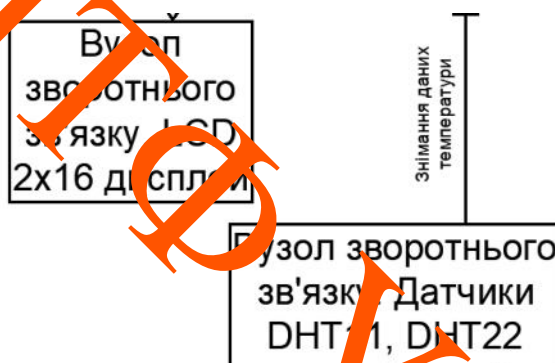


Рисунок 3.6. – Вузол зворотного зв'язку в структурній схемі

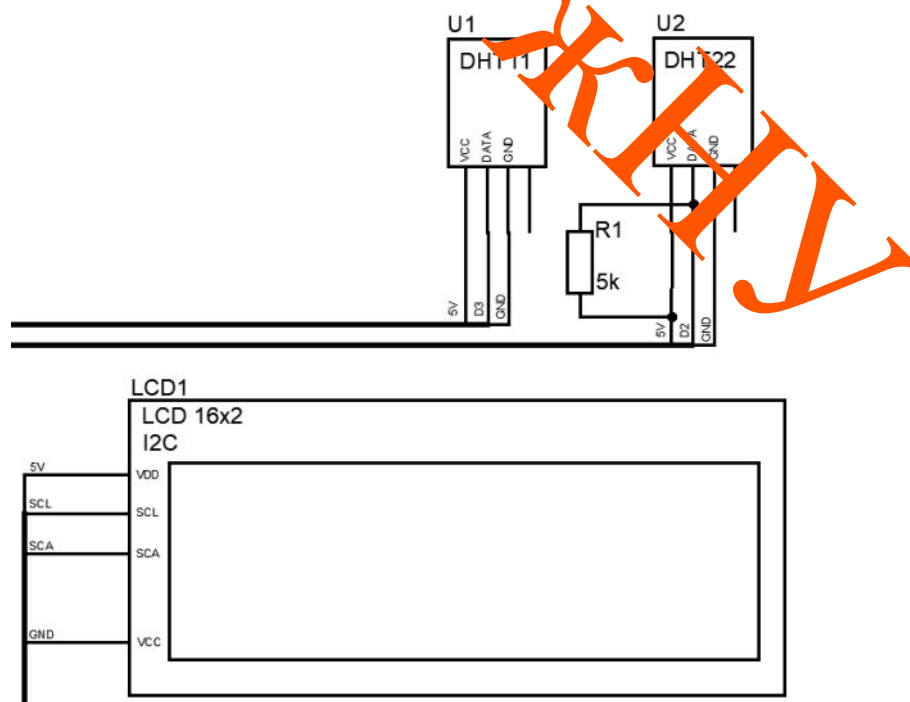


Рисунок 3.7. – Вузол зворотного зв'язку в принциповій схемі

3.5. Комутуючий вузол

Комутація в електротехніці – це процес зміни стану електричних кіл, наприклад, перемикання контактів, зміни напрямку струму або зміни способу роботи пристрою. Вона використовується в різноманітних приладах, починаючи від простих перемикачів та вимикачів, і закінчуючи складними комутаційними системами в електроенергетиці та телекомунікаціях. Комутація в приладі забезпечує контроль виконавчих елементів схеми шляхом зміни напруги на робочих елементах та за допомогою використання системи ШИМ контролю.

Всього комутацію забезпечують три модулі:

- SZBF 07 понижуючий DC-DC модуль використовується для регулювання напруги та струму на вході приладу, він забезпечує безпечну роботу 12В-ного кола в складі приладу. DC-DC понижувач потрібен, якщо джерело живлення не надає напругу в 12В, інакше його можна не включати;
- L298N драйвер двох двигунів контролює роботу двох повітряних кулерів, в складі драйверу є система ШИМ контролю;
- Два одно-канальних реле SRD-05V DC-SI-C для роботи з елементом Пельт'є.



Рисунок 3.7. – Комутуючий вузол в структурній схемі

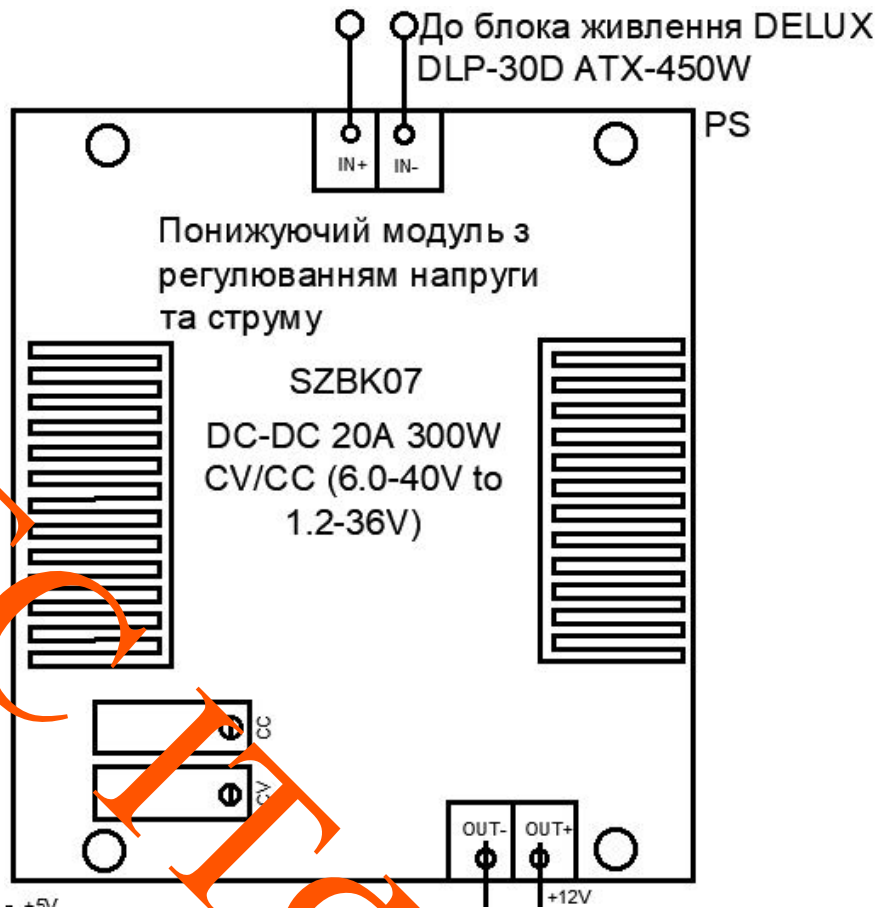


Рисунок 3.8.а – понижуючий DC-DC в комутуючому вузлові в принциповій схемі

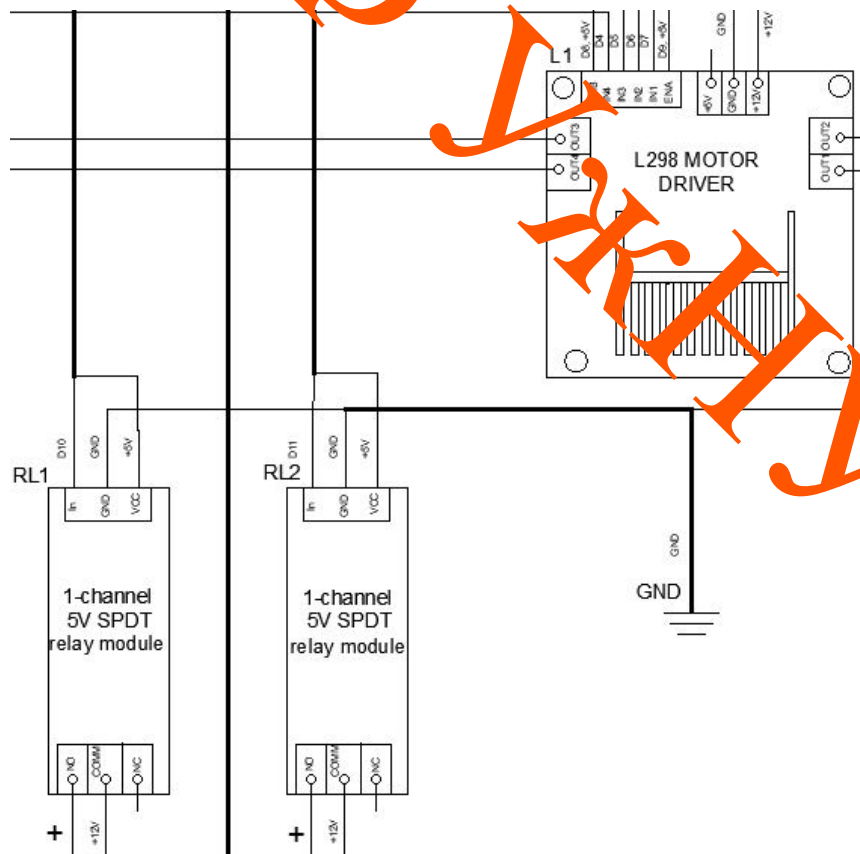


Рисунок 3.8.б – реле та драйвер двох двигунів в комутуючому вузлові в принциповій схемі

3.6. Виконавчий вузол

Виконавчий елемент (англ. actuator) - це частина системи, що безпосередньо реалізує вплив керуючого сигналу на об'єкт, змінюючи його стан. Іншими словами, виконавчий елемент - це механізм, який виконує дію, задану керуючим сигналом, перетворюючи один вид енергії (наприклад, електричну) в інший (наприклад, механічну).

В якості основного виконавчого елемента в схемі виступає модуль Пельтьє, який забезпечує охолодження робочої зони. Додатково в схемі знаходиться система тепловідводу в вигляді радіаторів та моторів повітряного охолодження.

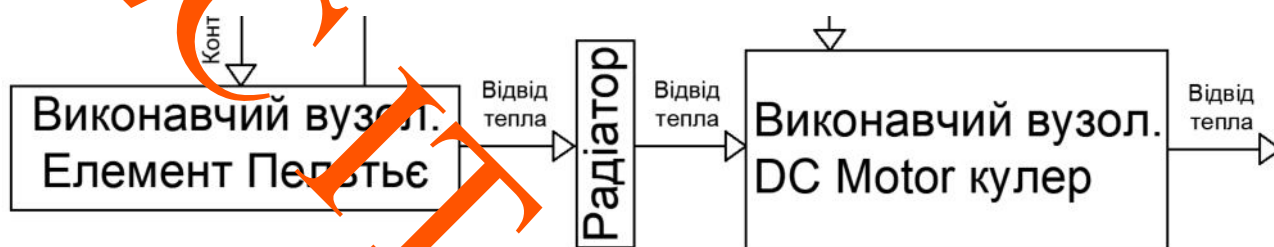


Рисунок 3.9. – Виконавчий вузол в структурній схемі

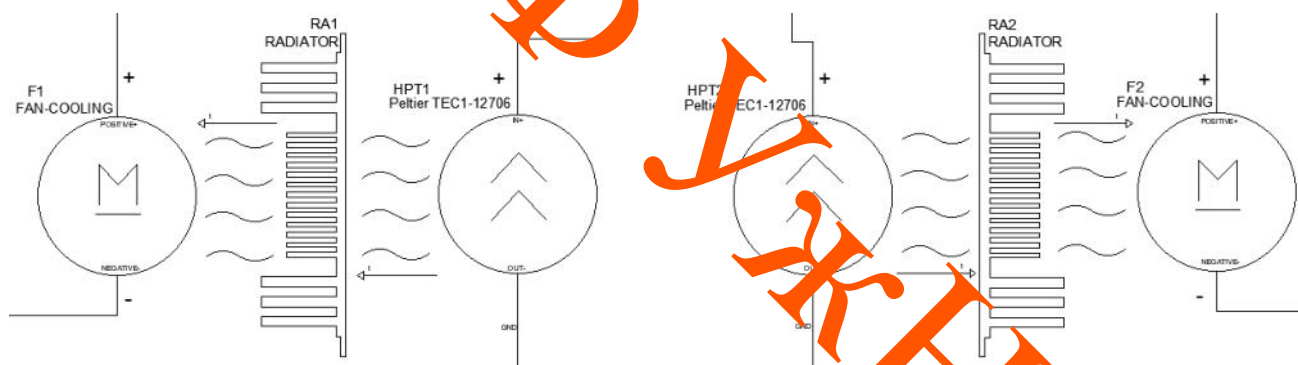


Рисунок 3.10. – Виконавчий вузол в принциповій схемі

Для кращого охолодження в приладі використовується дубльований виконавчий вузол з двома елементами Пельтьє. Робоча зона приладу знаходиться між модулями Пельтьє.

Повна принципова та структурна схеми приведені в доданках до кваліфікаційної роботи.

4. Програмування роботи майбутнього пристрою

4.1. Середовище програмування

Інтегроване середовище розробки Arduino - Arduino IDE це багатоплатформовий додаток на Java, що включає в себе редактор коду, компілятор і модуль передачі прошивки в плату. Середовище розробки засноване на мові програмування Processing та спроектоване для програмування новачками, не знайомими близько з розробкою програмного забезпечення. Програми обробляються за допомогою препроцесора, а потім компілюються за допомогою AVR-GCC [14].

Програми Arduino пишуться мовою програмування C або C++. Середовище розробки Arduino поставляється разом із бібліотекою програм «Wiring» (бере початок від проекту Wiring, який дозволяє робити багато стандартних операцій вводу/виводу значно простіше). Користувачам необхідно визначити лише дві функції для того, аби створити програму, яка буде працювати за принципом циклічного виконання:

- `setup()`: функція виконується лише раз при старті програми і дозволяє задати початкові параметри
- `loop()`: функція виконується періодично, доки плата не буде вимкнена

Типова найпростіша програма для мікроконтролера, яка посилає команду блимати світловому діоду в середовищі Arduino, буде виглядати так:

```
#define LED_PIN 13

void setup () {
  pinMode (LED_PIN, OUTPUT); // Ввімкнути контакт 13 для цифрового
  виводу
}

void loop () {
  digitalWrite (LED_PIN, HIGH); // Ввімкнути світлодіод
  delay (1000); // Зачекати одну секунду (1000 мілісекунд)
  digitalWrite (LED_PIN, LOW); // Вимкнути світлодіод
  delay (1000); // Зачекати одну секунду
}
```

Рисунок 4.1а. – Приклад програми в Arduino IDE



Рисунок 4.1б. – Інтегрований світлодіод (вивід 13 LED)

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2. Головна частина коду

Мова програмування пристроїв Ардуїно заснована на C/C++ і скомпонована з бібліотекою AVR Libc і дозволяє використовувати будь-які її функції.

Мова програмування Arduino поділяється на чотири розділи: оператори, дані (змінні та константи), функції та бібліотеки.

Бібліотека - це окрема частина програми, виділена в окремий файл або набір файлів та яка містить функції, класи, макроси, типи даних та інші сутності. Підключивши бібліотеку до своєї програми, можна використовувати її можливості.

Основна ідея бібліотеки в тому, що вона не пов'язана з конкретним проектом – це універсальний інструмент, який можна використовувати у різних програмах. По суті Arduino - це ж у своєму роді бібліотека: Arduino IDE автоматично підключається файл Arduino.h, в інших IDE його потрібно підключати вручну. З нього нам стають доступні функції та інші інструменти Ардуїно-фреймворку, розібрані в рамках цього розділу урочив та у довіднику.

```
#include <Arduino.h> // підключення "бібліотеки" Arduino

void setup() {
}

void loop() {
}
```

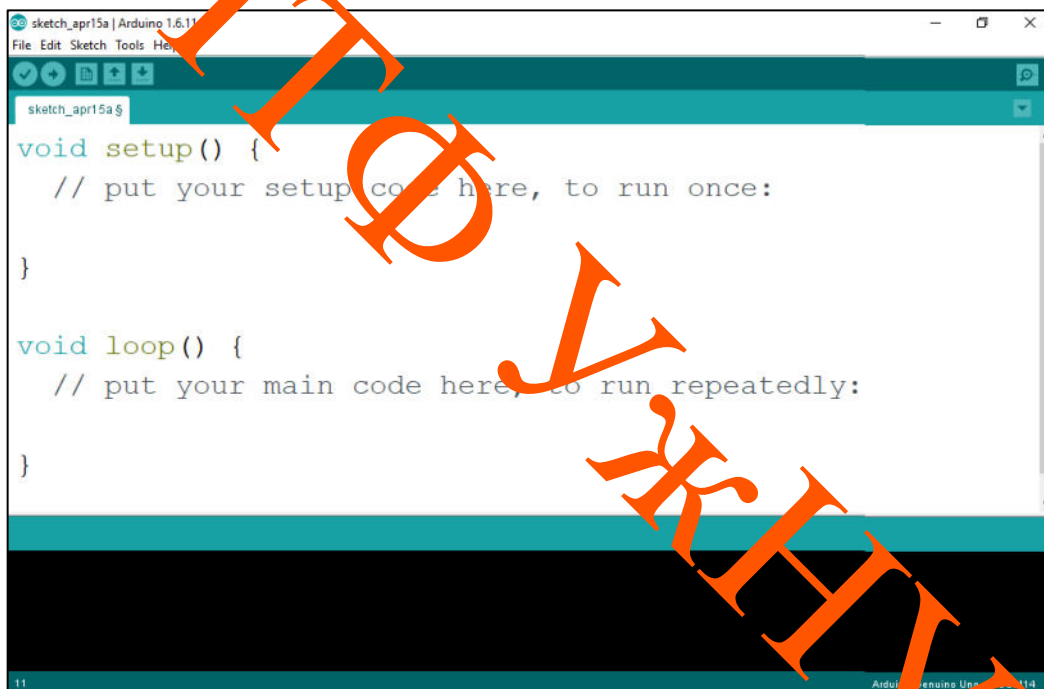
Рисунок 4.2. – Підключення бібліотеки до Arduino IDE

Для коректної роботи програми в проекті використовуються наступні бібліотеки:

- "EEPROMAnything.h" [15]
- "OneButton.h" [16]
- <LiquidCrystal_I2C.h> [17]
- бібліотека Adafruit Unified Sensor Driver [18]
- "Adafruit_BME280.h" [19]
- "DHT Sensor Library" включає три різновиди сенсору DHT:11,22,21 [20]

На початку роботи програма IDE автоматично створює дві функції: void setup та void loop. Ці функції є головними в програмі та використовуються завжди.

- Функція setup() використовується для ініціалізації змінних, визначення режимів роботи висновків, запуску бібліотек, що використовуються, і т.д. Функція setup запускає лише один раз після кожної подачі живлення або скидання плати Arduino.
- Після виклику функції setup(), яка ініціалізує та встановлює початкові значення, функція loop() робить точнісінько те, що означає її назву, і крутиться в циклі, дозволяючи вашій програмі здійснювати обчислення та реагувати на них. Використовується її для активного керування платою Arduino.



```
sketch_apr15a | Arduino 1.6.11
File Edit Sketch Tools Help
sketch_apr15a $
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

Рисунок 4.3. – Початок роботи в Arduino IDE

Основою для програми служить програма для терморегулятора написана Обушенко Олександром Андрійовичем, автором каналу Engineering room [21]

Для зручності програмування програма поділена на декілька модулів-підпрограм:

- 00_V7.3PEL_Termo_Regulator.ino
- Buttons.h

- LCD 16x2.h
- Regulator.h
- Sensor DHT.h
- Variables.h
- setEEPROM.h
- timers

00_V7.3PEL_Termo_Regulator.ino – це безпосередньо сама програма, а саме частина, що компілює всі інші програмні модулі та налагоджує їх роботу.

Частина , що додає програмні модулі:

```
#include "Variables.h" // Підключаємо вкладку зі змінними
#include "timers.h" // Підключаємо вкладку з функцією таймера
#include "Regulator.h" // Підключаємо вкладку з кодом Термо-регулятора
#include "setEEPROM.h" // Підключаємо вкладку з кодом EEPROM
#include "LCD16x2.h" // Підключаємо вкладку із кодом LCD екрану
#include "Buttons.h" // Підключаємо вкладку з кодом кнопок
```

Частина , що підключає сенсор:

```
// Вибираємо сенсор з яким працюватимемо
#define USE_BME280
#define USE_DHT11
#define USE_DHT11

#elif defined(USE_DHT11) // Або

#warning "Sensor_DHT11 selected"
#include "Sensor_DHT11.h" // Підключаємо вкладку з кодом датчика DHT22.
//В вкладці можна вибрати один з трьох видів DHT: 11, 22, 22

#else
#error "No Sensor selected"
#endif
```

Ініціалізація змінних та підключення програмних модулів:

```
void setup() {
// Налаштовуємо GPIO Реле
pinMode(GPIO_Relay1, OUTPUT);
pinMode(GPIO_Relay2, OUTPUT);

// Підключаємо монітор порту
Serial.begin(9600);
Serial.println("Termo_Regulator!");

// Підключаємо EEPROM
setupEEPROM();
```

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

// Підключаємо кнопки
setupButtons();

// Підключаємо давач температури
setupSensor();

// Підключаємо екран
setupLCD16x2();
}

```

Робоче “тіло” програми:

```

void loop()
// терморегулятор
if (Error == false) {
  ms = millis(); // Час з початку роботи МК

// Якщо довго не натискали не одну кнопку, то вимкнемо підсвічування екрану
// Якщо довго не натискали жодну кнопку, то заблокуємо їх

  checkButtonLock();

  loopTempIn1(TempIn1); // Читання Температури від датчика до змінної TempIn1
  loopButtons(); // Считування кнопок
  Menu(); // Меню

// Функція регулятора температури
  Regulator(RegulatorType, ModeAuto, TempIn1, Ts, D, StateRelay1, GPIO_Relay1, RLL);
  Regulator(RegulatorType, ModeAuto, TempIn1, Ts, I, StateRelay1, GPIO_Relay2, RLL);

  ButtonsLOW(); // Тут обнуляються прапори як могли бути підняті у разі натискання кнопки
у попередньому циклі
}
else {
  ErrorScreen();
}
}

```

4.3. Модуль кнопок

Для управління роботою програми використовуються три тактові кнопки: Select, UP, DOWN. Їх достатньо для навігації та налаштування терморегулятора.

В цьому блоці використовується бібліотека OneButton.h:

```

#include "OneButton.h"
// Конструктор класу OneButton
OneButton Select (GPIO_B_Select, true);
OneButton UP (GPIO_B_UP, true);
OneButton DOWN (GPIO_B_DOWN, true);

```

В програмному модулі кнопок програмуються 3 наступні функції приладу – його меню, блокування кнопок та виключення дисплею.

Короткий опис меню:

- Головний екран (Виводиться поточна температура від датчика, Настроєна температура регулятора)
- (Вихід реле: Увімкнено/Вимкнено, Режим роботи: Автоматичний/Ручний)
- Налаштування <SETTINGS>
- Exit (Вихід із меню налаштувань)
- Temp setting (Уставка температури, до якої прагнуть регулятор)
- Hysteresis (Гістерезис. Захист від брязкоту реле)
- Mode (Автоматичний/Ручний)
- Regulator Type (Тип регулятора HEATER/COOLER)
- Delay Light (Час, через який підсвічування екрана згасне)
- RelayLogicLevel (Вибір рівня Логіки Реле)
- Reset Factory (Скидання налаштувань на заводські)

Наприклад функція блокування кнопок:

```
// Якщо довго не натискали ні одну кнопку, то вимкнемо підсвічування екрану
// Якщо довго не натискали ні одну кнопку, то заблокуємо їх
void checkButtonLock(){
    if (timer(msBacklight, DELAY_Backlight, false) && DELAY_Backlight!=0){ // Якщо
    довго не натискали не одну кнопку, то вимкнемо підсвічування екрану
        lcd.noBacklight();
    }
    if (timer(msBL, DELAY_ButtonLock, false) && Buttonlock==false){ // Якщо довго не
    натискали не одну кнопку, то заблокуємо їх
        m=0;
        lcd.clear();
        Buttonlock=true; //Заблокувати кнопки
        Serial.println("Button lock ON");
    }
}
```

Знімається блокування утриманням кнопки Select

```
// Зняти блокування кнопок тривалим утриманням кнопки Select
void SelectButtonlock() {
  lcd.backlight(); msBacklight=ms; // Увімкнення підсвічування

  Serial.println("Button lock OFF");
  Buttonlock=false;
  msBL=ms; // Час останнього натискання кнопки
} // SelectButtonlock
```

4.4. Модуль дисплею

Модуль дисплею спільно з модулем кнопок виконують роль інтерфейсу приладу, саме дисплей відображає інформацію з меню: температури з датчика, установлені температури, режиму роботи та ін.:

```
// Налаштування екрана LCD16x2
void setupLCD16x2(){
  Serial.print("LCD16x2 Begin!");

  lcd.begin(16,2); // Ініціалізуємо LCD
  lcd.backlight(); // Включаємо підсвічування.

  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Thermostat");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Version V7 ");
  delay(2000);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("of 04/02/2019.");

  lcd.clear();
  Serial.println(" Done!");
}
```

Меню налаштування температури та гістерезису “Temp setting” та “Hysteresis” мають можливість встановлення шагу налаштування змінної від 0.1 до 10.

```
void SettingsScreen(String S, float Val, String Suf){
  if(timer(msLCD1, DELAY_LCD1)){

    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print(S);
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print(Val, 1);
    lcd.print(Suf);

    lcd.print(" +/-");
    lcd.print(Rank, 1);
  }
}
```

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.5. Модуль сенсору

Модуль сенсору DHT11 потрібен для підключення двох бібліотек – “Adafruit Unified Sensor Driver” та спеціалізованої під DHT – “DHT Sensor Library”. Використання Adafruit дозволяє перемикатися між моделями датчиків з дуже незначним впливом на решту системи, що може допомогти зменшити деякі ризики та проблеми, пов'язані з доступністю датчиків та повторним використанням коду. “DHT Sensor Library” спеціалізує Adafruit під датчики DHT.

Модуль сенсору спочатку уточнює конкретний тип датчика, в нас це DHT22, потім ініціалізує його за допомогою функції millis таймеру. Далі відбувається зчитування та вивід інформації отриманої датчиком:

```
void loopTempIn1(float &TempIn1) {
    // замінюємо для роботи з millis();
    if (timer(msTempIn1, DELAY_TempIn1)){
        static int countError=0;

        // Читання температури в градусах Цельсія (за замовчуванням)
        float tDHT1 = dht.readTemperature();

        // Перевірка, чи вдалося виконати читання, і завершити роботу якщо не вдалося
        (щоб повторити спробу).
        if (isnan(TempIn1)) {
            Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
            countError++;
            if (countError==5){Error=true;}
            return;
        }

        countError=0;
        Serial.print("Temperature: ");
        Serial.print(tDHT1);
        Serial.println(" *C ");

        TempIn1=tDHT1;
    }
}
```

4.6. Модуль регуляції

Перемикає тип регулятора – на нагрів (HEATER) або на охолодження (COOLER)

```
void RegulatorTypeSwitch(bool Direction){
    if (Direction) {RegulatorType++;
    if (RegulatorType > COOLER) {RegulatorType=COOLER;}}
    else {RegulatorType--;
```

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.8. Модуль зберігання даних

У мікроконтролері Arduino є EEPROM - пам'ять, в якій інформація зберігається навіть після вимкнення пристрою (як невеликий жорсткий диск). Ця бібліотека дозволяє записувати та читати інформацію з цієї пам'яті.

Об'єм пам'яті EEPROM різних мікроконтролерів, які складають Arduino, може відрізнятися: у Atmega328 всього 1024 байт.

Для зберігання даних використовується бібліотека EEPROM.h. Заповнення масиву адресів EEPROM:

```
void setupAdrEEPROM(){
  a[a_Recorded]=addr;      addr+=sizeof(Recorded);
  a[a_ModeAuto]=addr;     addr+=sizeof(ModeAuto);
  a[a_RLL]=addr;          addr+=sizeof(RLL);
  a[a_Ts]=addr;           addr+=sizeof(Ts);
  a[a_D]=addr;            addr+=sizeof(D);
  a[a_RegulatorType]=addr; addr+=sizeof(RegulatorType);
  a[a_DELAY_Backlight]=addr; addr+=sizeof(DELAY_Backlight);
}
```

Для запису збереження даних до бібліотека EEPROM.h додається розширення EEPROMWRITEAnything.h. EEPROMWRITEAnything.h досить стара бібліотека тому вона має проблеми з підключенням до сьогоденних версій Arduino IDE, для вирішення цієї проблеми функції з бібліотеки EEPROMWRITEAnything.h було записано напряму в модуль EEPROM:

```
#if ARDUINO >= 100 // Пряме підключення EEPROMAnything
#include <Arduino.h>
#else
#include <WProgram.h>
#endif // для визначення типів

template <class T> int EEPROM_writeAnything(int ee, const T& value)
{
  const byte* p = (const byte*)(const void*)&value;
  unsigned int i;
  for (i = 0; i < sizeof(value); i++)
    EEPROM.write(ee++, *p++);
  return i;
}

template <class T> int EEPROM_readAnything(int ee, T& value)
{
  byte* p = (byte*)(void*)&value;
  unsigned int i;
  for (i = 0; i < sizeof(value); i++)
    *p++ = EEPROM.read(ee++);
  return i;
} // кінець прямого підключення EEPROMAnything
```

4.9. Модуль таймеру

Функція millis() повертає кількість мілісекунд, які минули з початку програми Arduino. Повернене число буде переповнене (впав на 0) приблизно через 50 днів.

Для запобігання переповнення функція використана в програмі була перепрофільована для повертання змінних true або false

```
bool timer(uint32_t &msF, uint32_t timeOut, bool refresh_ms=true){
    if ((int32_t)(ms - msF) >= timeOut){
        if (refresh_ms) {msF = ms;} //Якщо refresh_ms=true (значення за замовчуванням),
        оновимо час у змінній &msF
        return true;
    }
    else{
        return false;
    }
}
```

Приклад програмування функції millis():

```
/*
//Глобальні змінні
uint32_t ms=0; // Час з початку роботи МК

uint32_t msTempIn1=0; // Час опитування термометра
uint32_t DELAY_TempIn1=2000; // Як часто опитувати датчик (затримка або time
out) вказуємо у мілісекундах

uint32_t msBacklight=0; // Час від останнього натискання на будь-яку
клавішу
uint32_t DELAY_Backlight=30000; // Через скільки мілісекунд вимкнути
підсвічування екрану

//Не Забудьте вставити рядок у void loop()
void loop(){
    ms = millis(); // Час з початку роботи МК
    //...
    // ваш код
    //...
```

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У даній роботі було підбрано усі необхідні компоненти для принципової схеми керованого термоелектричного кулеру на елементі Пельт'є. Було обрано до схеми приладу мікроконтролер Arduino Nano, дисплей LCD16x2 з модулем зв'язку I2C, два термо-датчика DHT11 та DHT22, два DC мотора з пропелером для системи повітряного охолодження елемента Пельт'є, L298N драйвер мотору двох двигунів для комутації роботи пропелерів та два одно-канальних реле для комутації роботи двох модулів Пельт'є. Також до системи було підбрано модуль з регулюванням напруги та струму SZBK07 в якості понижуючого модулю DC-DC для забезпечення роботи 12В кола приладу.

Засобами COMSOL було проведено відповідні розрахунки, які показали відповідну різницю температур в 73,17 градуси, що відповідає заданому завданні керованого кулеру від -20 до +30 градусів.

На основі принципової схеми було підбрано демонстраційну модель:

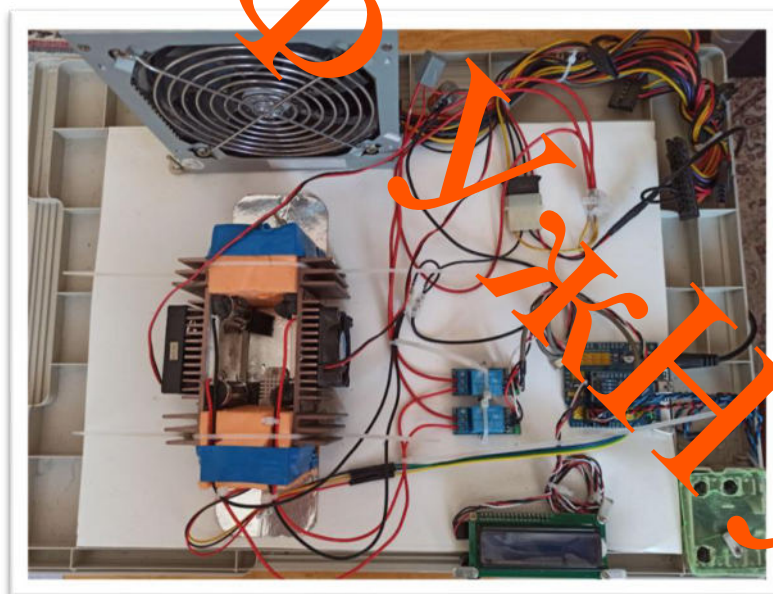


Рисунок 5.1. – Демонстраційна модель

В складі демонстраційної моделі знаходиться мікроконтролер Arduino nano, два елемента Пельт'є, прикріплених до радіаторів та коматованих за допомогою двох одно-канальних реле, інтерфейс моделі виконано засобами дисплею LCD16x2 та трьома тактовими кнопками в зеленому коробі, засобом зворотного зв'язку виступає датчик температури та вологості DHT22, розміщений всередині

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

робочої зони. Додаткове повітряне охолодження виконують два мотора з пропелером підключених напряму до джерела живлення.

Від комп'ютерного блоку живлення DELUX знімається два кола напруги – на ардуїно знімається 5В, а на елементи Пельт'є та фени повітряного охолодження йде 12В.

Зроблена демонстраційна модель виконує мінімальне завдання по запуску та комутації елемента Пельт'є та виведення результатів отриманої температури на дисплей.

Модель є масштабованою, і має можливість підтримки 4-ьох і більше модулів Пельт'є. Також до моделі можливо додати декілька нових функцій:

- Модуль драйверу двох двигунів L298N дозволить регулювати швидкість роботи фенів повітряного охолодження за допомогою системи ШИМ – контролю. Безпосередньо контроль можна оформити як відповідними змінами в програмі моделі, так і використовуючи потенціометр чи енкодер повороту
- В ситуації коли модель потребує зняття живлення з більшим номіналом ніж 12В до конструкції може бути доданий понижуючий DC-DC модуль регулювання напруги та струму, як о SZBK07

Однак, хоча модель і виконує поставлені завдання, для повноцінної роботи доданих модулів конструкція потребує доопрацювання. А саме вибору потужнішого варіанту мікроконтролера, так як в поточній моделі вже використовує всі ресурси напруги та струму Arduino nano. Також потребується доопрацювання комірки робочої зони – для досягнення найкращого коефіцієнта корисної дії елемент Пельт'є потребує відповідних систем відводу тепла та холоду, і бажано відокремити холодну та гарячу зони Пельт'є конструкцією схожою з термосом.

Отже, розроблений керований термоелектронний кулер Пельт'є відповідає всім заданим технічним умовам і здатен виконувати поставлене завдання, доказом чого слугує зібрана на його основі демонстраційна модель

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Лекція-9.-Термоелектрика, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
- [2] стаття “Ефект Зеєбека”, Вікіпедія;
- [3] Основи мікроелектроніки, С.М. Павлов;
- [4] Стенд для температурних досліджень на основі елементів Пельтьє, Радчук Віталій Володимирович;
- [5] Що таке "елемент Пельтьє": переваги технології, сайт Ventalab;
- [6] стаття “Arduino Uno”, Вікіпедія;
- [7] Каталог, сайт магазину ARDUINO.UA;
- [8] Призначення та типи енкадерів, довідник сайту ТехПривод;
- [9] Реле та силові модулі, сайт МІЦІ-ТЕХ;
- [10] Модулі Пельт’є, сайт StudFiles;
- [11] стаття “Структурна схема”, Вікіпедія;
- [12] Блок живлення Delux 450W (DLP-30D) каталог магазину ESERVER;
- [13] стаття “Зворотний зв'язок”, Вікіпедія;
- [14] стаття “Arduino”, Вікіпедія;
- [15] сайт github, проєкт SemIoT, Бібліотека EEPROMAnything.h, <https://github.com/semiotproject/Arduino-libraries/tree/master/EEPROMAnything>;
- [16] сайт github, проєкт SemIoT, Бібліотека OneButton.h, <https://github.com/mathertel/OneButton.git>;
- [17] сайт github, проєкт SemIoT, Бібліотека LCD16.2-I2C, <https://github.com/fdebrabander/Arduino-LiquidCrystal-I2C-library.git>;
- [18] сайт github, проєкт SemIoT, Бібліотека Adafruit для сенсорів, https://github.com/adafruit/Adafruit_Sensor.git;

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк. 62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[19] сайт github, проект SemIoT, Бібліотека Adafruit для сенсору BME280,
https://github.com/adafruit/Adafruit_BME280_Library.git;

[20] сайт github, проект SemIoT, Бібліотека Adafruit для сенсорів DHT,
<https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library.git>;

[21] #090 Універсальний Регулятор Температури, канал Engineering room,
<https://www.youtube.com/channel/UCih0Gcl9IEdkR8deDJCiodg>;

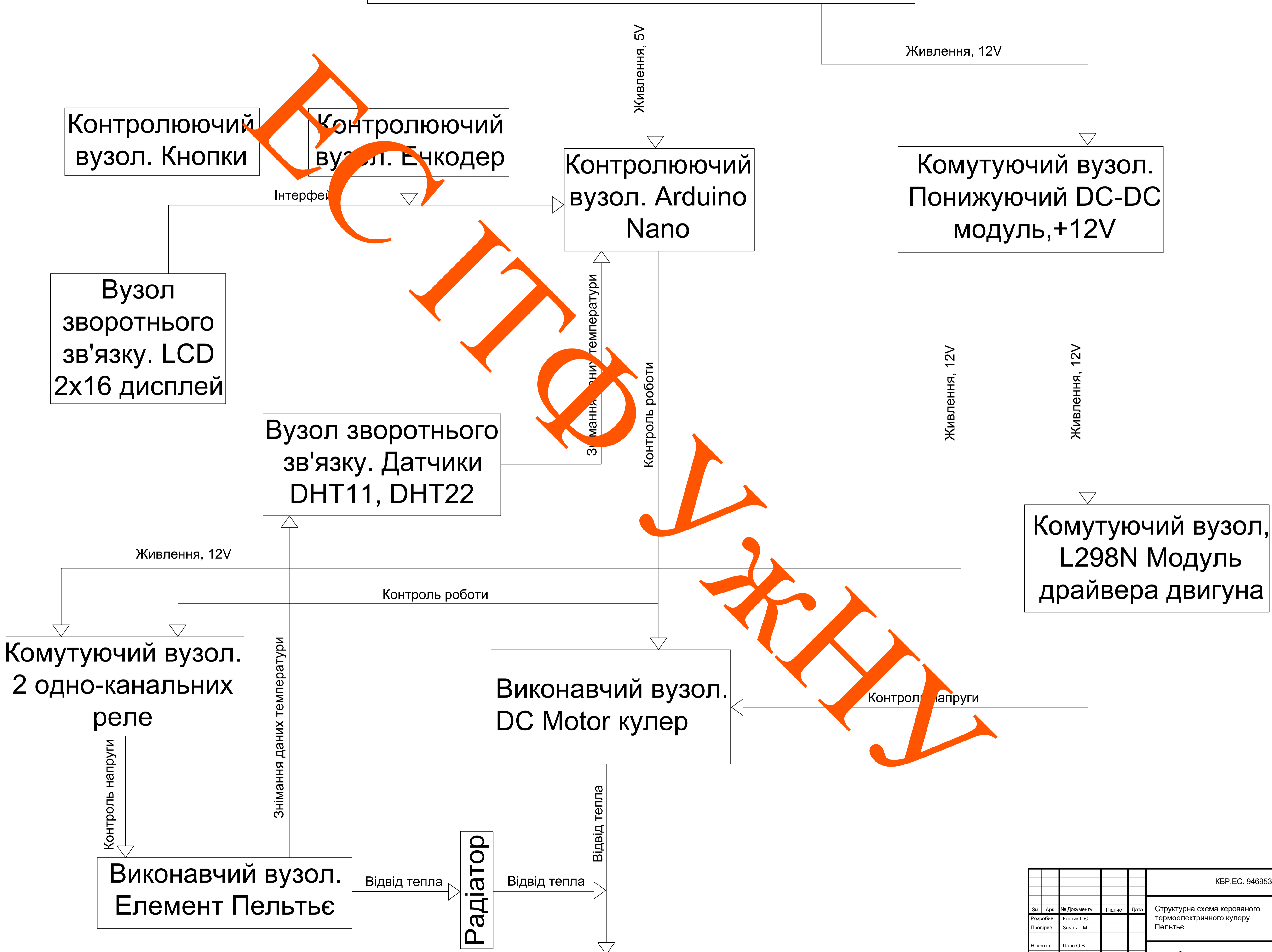
ЕОС ПТФ УЖЕНУ

					КРБ.ЕС. 9469536.001.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
	Елемент пельтьє		
HPT1, HPT2	TEC1-12706 6A 12B	2	SLE
	Мікроконтролер		
INO1	Arduino nano V3 AVR ATmega328P	1	Arduino
	Дисплей		
LCD1	LED QC1602A	1	Arduino
	Модулі розширення виводів		
LCD1	I2C	1	Arduino
INO1	Arduino nano Shield	1	Arduino
	Давачі		
U1	DHT11	1	UNIVERSAL
U2	DHT22	1	UNIVERSAL
	Кнопки		
B1..B3	Button	3	
	Радіатори		
RA1, RA2	RADIATOR	2	
	Кулери повітряного охолодження		
F1, F2	FAN COOLER	2	

					КРБ.ЕС. 9469536.004.ПЕ			
					Перелір елементів керованого термоелектричного кулери Пельтьє	Літера	Маса	Масштаб
Зм.	Аркуш	Недокумента	Підпис	Дата		у		
Розробив		Костик Г.Є.				Аркуш 1		Аркушів 2
Перевірив		Заяць Т.М.						
					Перелір елементів	УжНУ, ІТФ, ЕС, 4-й курс		
Н.Контр.		Папп О.В.						
Затвер.		Заяць Т.М.						

Джерело живлення. Блок живлення Delux DLP-30D ATX-450W



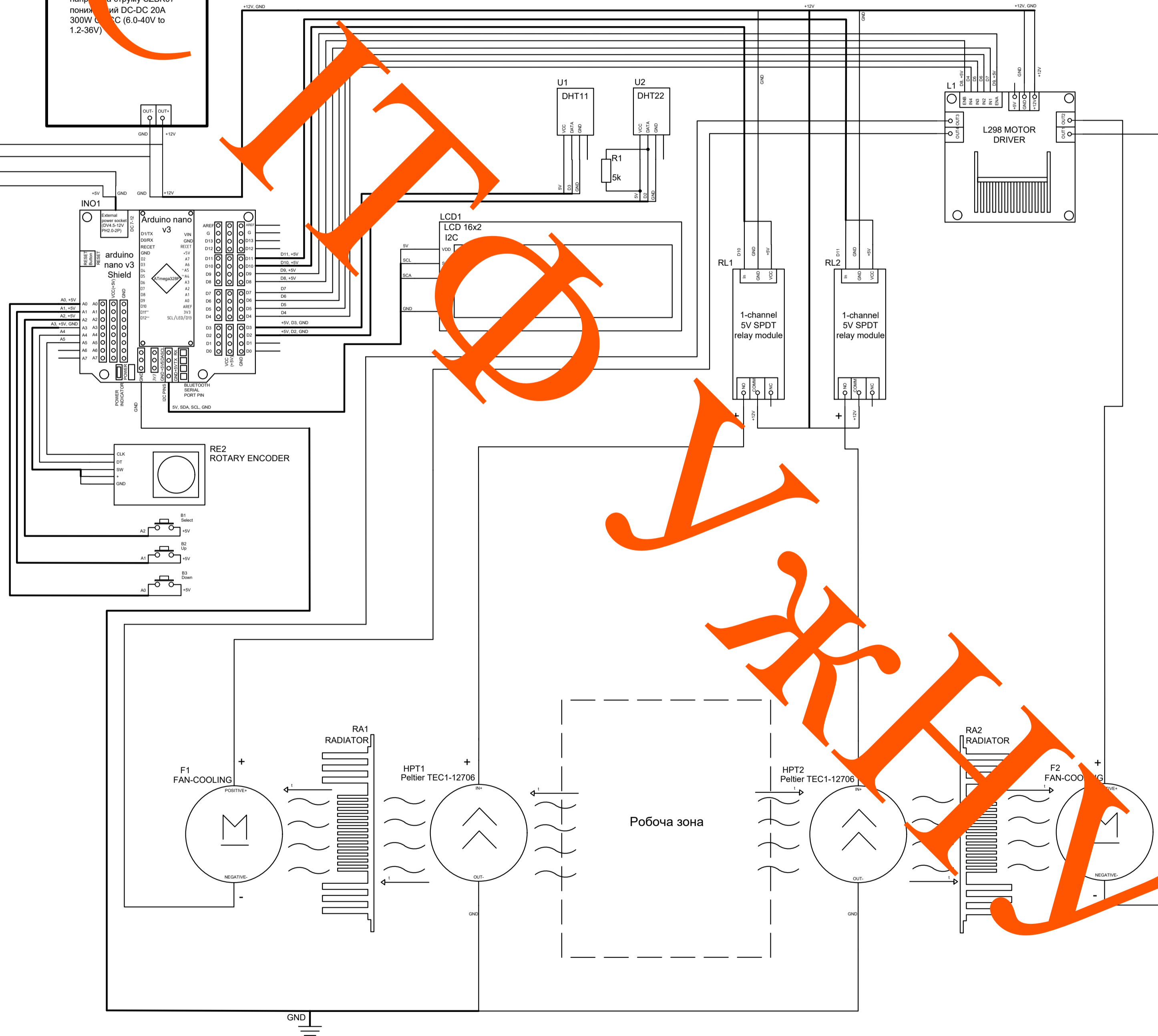
ПРОЕКТ

КБР.ЕС. 9469536.004.Е1				
Зм.	Арх.	№ Документу	Підпис	Дата
Розробив		Костик Г.Є.		
Перевірив		Зяць Т.М.		
Н. контр.		Палп О.В.		
Затвердив		Зяць Т.М.		
Структурна схема керованого термоелектричного кулера Пельтьє				Літера
Структурна схема				Маса
				Масштаб
				Аркуш 1
				Аркушів 1
				УжНУ, ІТФ, ЕС, 4-й курс

Блок живлення
DELUX DLP-30D ATX-450W

PS1

Модуль регулювання
напряження струму SZBK07
понижувачий DC-DC 20A
300W 0.5% (6.0-40V to
1.2-36V)



КБР.ЕС. 9469536.004.Е3				
Зм.	Арх.	№ Документу	Підпис	Дата
Розробив		Костик Г.Є.		
Проверив		Зяць Т.М.		
Н. контр.		Пап О.В.		
Затвердив		Зяць Т.М.		
Принципова схема керуваного термоелектричного кулера Пельтьє			Літера	Маса
Принципова схема			Аркушів 1	Аркушів 1
			УжНУ, ІТФ, ЕС, 4-й курс	

Додаток 1

Завідувачу кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ

к.ф.-м.н.доц. Заяць Тарас Михайлович

Студента (-ки) 4-го курсу
спеціальності 171 Електроніка
Костика Теодія Євгеновича
(прізвище, ініціали)

ЗАЯВА

щодо самостійного виконання
навчальної/кваліфікаційної роботи здобувачем освіти

Я, Костик Теодій Євгенович
(прізвище, ім'я, по батькові),

Студент(-ка) денна інженерно-технічний факультет, 4-й курс
(формування, факультет, курс)

заявляю: моя письмова робота на тему: Керований термостат-
ричний кулер ТР-615

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату.

Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше робіт мають відповідні посилання. Я ознайомлений(а) з діючим Положенням, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску навчальної/кваліфікаційної роботи до захисту та притягнення до академічної відповідальності.

18.06.2015
Дата

[Підпис]
Підпис

Додаток 2.

ДОВІДКА
про результати перевірки на унікальність
кваліфікаційної, навчальної (курсової) роботи

Автор роботи	Костик Теорій Євгенович
Назва роботи	Керований термoeлектро- чний кулер Пелюк
Спеціальність	171 Електроніка
Курс	4
Факультет	Інженерно-технічний
Кафедра	Електронних Систем
Керівник роботи	Зацьків Тарас Михайлович
Роботу перевірено в програмі	АКТИРЛА
Додано до бази даних	
Ідентифікаційний номер роботи	2025-КРБ-Костик Т. Є.
Результат перевірки	
Показник унікальності тексту через перевірку роботи у внутрішній базі кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ	
Показник унікальності тексту в мережі Інтернет	80%

Відповідальна особа/
Науковий керівник роботи

18.06.2025
Дата

Зацьків Т. М.
(прізвище, ініціали)


Підпис



Автентифіковано засобом перевірки на плагіат ANTIPLA
Дата видачі: середа, 18 червня 2025, 18:18
Доступно через www.antip.la

Плагіатограма

Результат (відсоток плагіату)	12%
Назва документа	2025_КРБ_Костик Г. Є..pdf
Кількість символів	48,358
Кількість спеціальних символів	606
Кількість слів	7,584
Унікальна кількість слів	2,762
Кількість речень	2,555
Найпоширеніші слова	., Арк., та, в, •
Середня довжина слова	5.4
Середня кількість слів у реченні	3.0
Всього посилань	0
Кількість слів із плагіатом	841

18.06.2025

(дата)

Георгій Євгенович Костик

(підпис)

Thermoelectric Cooler

Author

COMSOL

Report date

Jun 21, 2025, 12:05:47 PM

SUMMARY

This app demonstrates the following:

- Visualizing material appearance, color, and texture
- Showing info below the graphics about geometry parameters, results and performance depending on the selected plot action.

Thermoelectric coolers are widely used for electronics cooling in various application areas, ranging from consumer products to spacecraft design. A thermoelectric module is a common type of component used in thermoelectricity applications. A typical module consists of several thermoelectric legs sandwiched between two thermally conductive plates, one cold and one hot. The device that needs to be cooled down must be attached to the cold face.

Due to the variety of applications, there can be many different thermoelectric cooler configurations. This app covers the basic design of a single-stage thermoelectric cooler of different sizes with different thermocouple sizes and distributions. It also serves as a starting point for more detailed calculations with additional input options and can be extended to multistage thermoelectric coolers.

Contents

1. Software Information	3
2. Input Data	4
3. Model	7
4. Results	8

ЕОСІТФУЖЕНУ

1 Software Information

Date	Jun 18, 2025, 4:42:41 PM
------	--------------------------

GLOBAL SETTINGS

Version	COMSOL Multiphysics 6.1 (Build: 282)
---------	--------------------------------------

COMPUTER INFORMATION

CPU	Intel64 Family 6 Model 151 Stepping 5, 6 cores, 31.75 GB RAM
Operating system	Windows 10

1.1.1 Study 1

Computes the optimal operating conditions for maximum cooling, that is, when the temperature difference between the ceramics plates reaches its maximum value. This study uses an optimization solver to find the applied current that gives the maximum temperature difference. The corresponding voltage and electrical resistance are also returned.

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	40 s
------------------	------

1.1.2 Study 2

In this study, the optimal electric current is the operating current in the thermoelectric cooler. Under such a condition, the study computes the limiting dissipative power at which the temperature difference between the ceramics plates is zero.

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	13 s
------------------	------

1.1.3 Study 3

Computes the temperature difference between the ceramics plates for different prescribed applied currents. The parametric sweep over the applied current goes from $0.1 I_{max}$ to $1.1 I_{max}$. The results are used to produce the performance chart of temperature difference vs electric current.

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	1 min 26 s
------------------	------------

1.1.4 Study 4

Computes the dissipative heat rate and electrical power for different prescribed applied currents at a temperature difference of 20 K, 40 K, and 60 K. This is performed by a double parametric sweep. The results are used to produce curves of coefficient of performance, ratio of dissipative heat rate and electrical power, at different values of temperature difference.

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	40 s
------------------	------

2 Input Data

PARAMETERS 1

Name	Expression	Value	Description
length	40[mm]	0.04 m	Total length
width	40[mm]	0.04 m	Total width
height	2.5[mm]	0.0025 m	Total height
d_conductor	100[um]	1E-4 m	Conductor thickness
d_ceramics	0.3[mm]	3E-4 m	Ceramics thickness
leg_length	1[mm]	0.001 m	Leg cross section in length
leg_width	1.2[mm]	0.0012 m	Leg cross section in width
leg_height	$height - 2*(d_conductor + d_ceramics)$	0.0017 m	Leg height
pitch	0.5[mm]	5E-4 m	Pitch
n_length	$\text{floor}((\text{length} - 2*\text{pitch} - \text{leg_length})/(\text{leg_length} + \text{pitch})) + 1 - \text{mod}(\text{floor}((\text{length} - 2*\text{pitch} - \text{leg_length})/(\text{leg_length} + \text{pitch})) + 1, 2)$	26	Number of legs in length
n_width	$\text{floor}((\text{width} - 2*\text{pitch} - \text{leg_width})/(\text{leg_width} + \text{pitch})) + 1$	23	Number of legs in width
network_length	$(\text{leg_length} + \text{pitch}) * \text{n_length} - \text{pitch}$	0.0385 m	Length of legs network
network_width	$(\text{leg_width} + \text{pitch}) * \text{n_width} - \text{pitch}$	0.0386 m	Width of legs network
N	$(\text{floor}((\text{length} - 2*\text{pitch} - \text{leg_length})/(\text{leg_length} + \text{pitch})) + 1 - \text{mod}(\text{floor}((\text{length} - 2*\text{pitch} - \text{leg_length})/(\text{leg_length} + \text{pitch})) + 1, 2)) * ((\text{floor}((\text{width} - 2*\text{pitch} - \text{leg_width})/(\text{leg_width} + \text{pitch})) + 1))/2$	299	Number of thermocouples

PARAMETERS 1

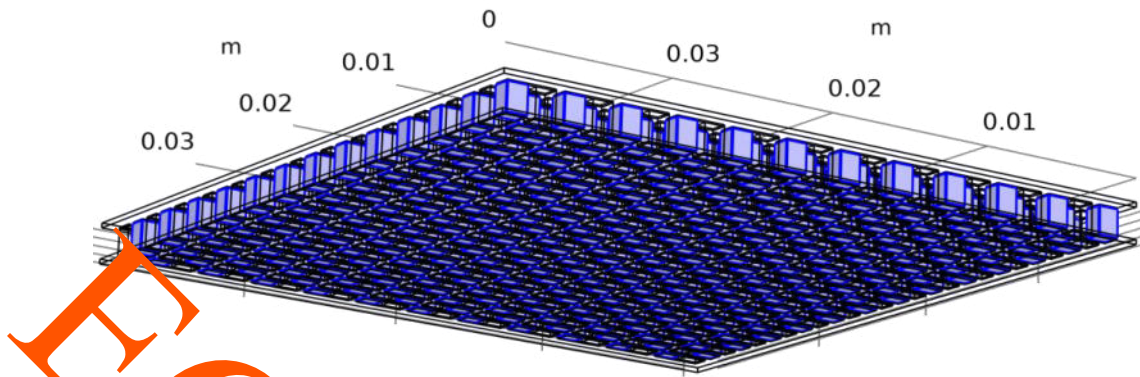
Name	Expression	Value	Description
Tref	323.15[K]	323.15 K	Hot side temperature
dT0	50[K]	50 K	Prescribed temperature difference
I0	1	1	Prescribed relative electrical current

2.1 MATERIALS

For p-type semiconductor materials, a Seebeck coefficient with negative sign is used. For n-type semiconductors, the Seebeck coefficient should be positive.

LINK SETTINGS

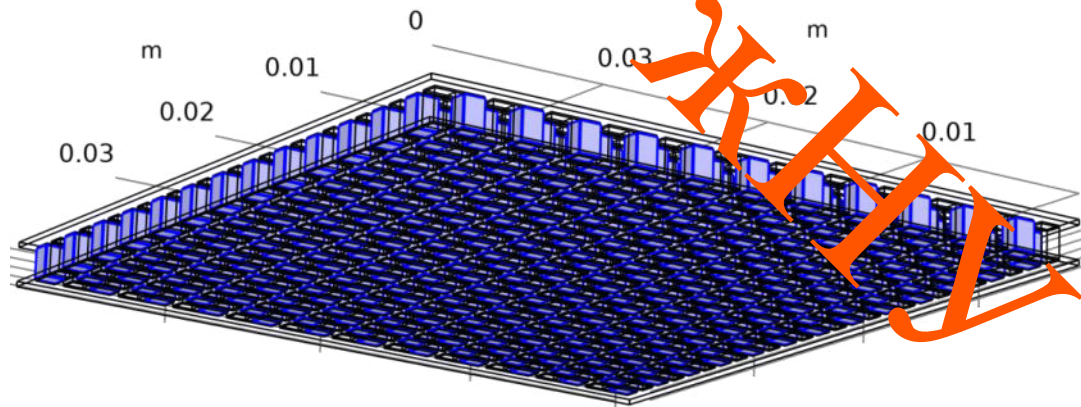
Material	Bismuth Telluride - Bi2Te3, P-Type (mat1)
----------	---



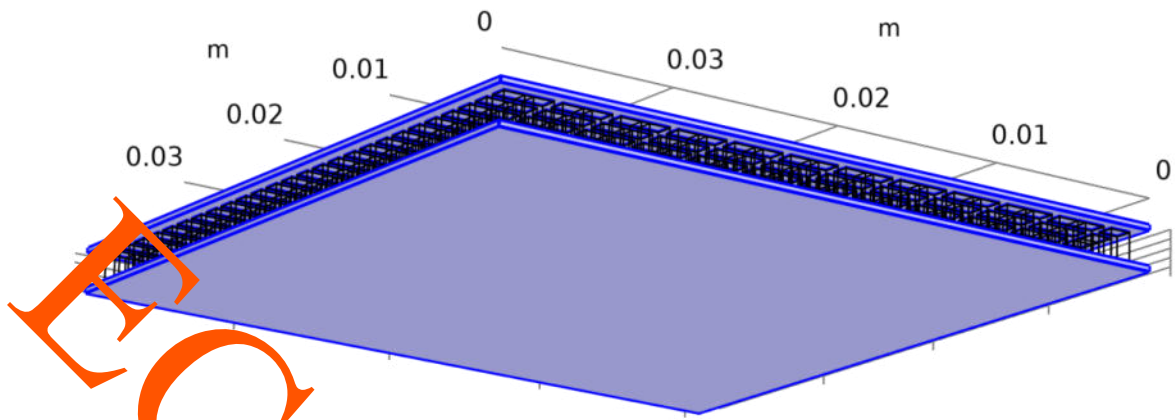
P-Type Legs

LINK SETTINGS

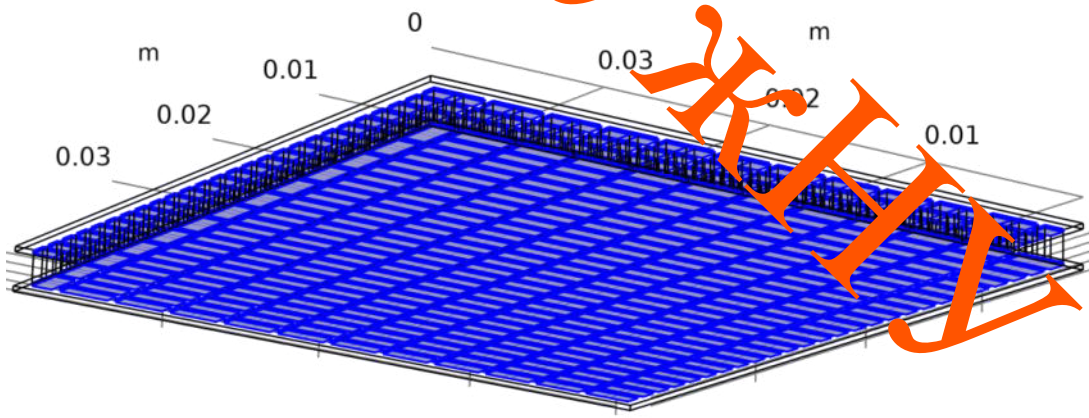
Material	Bismuth Telluride - Bi ₂ Te ₃ , N-Type (mat3)
----------	---



N-Type Legs

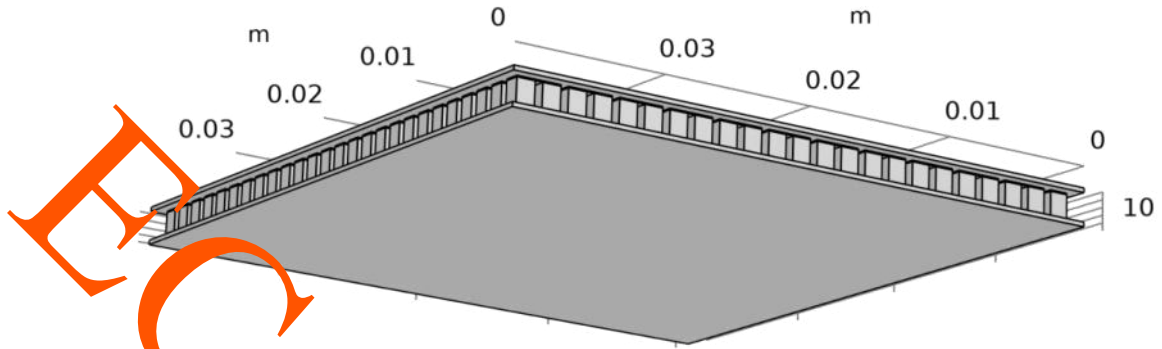


Tungsten

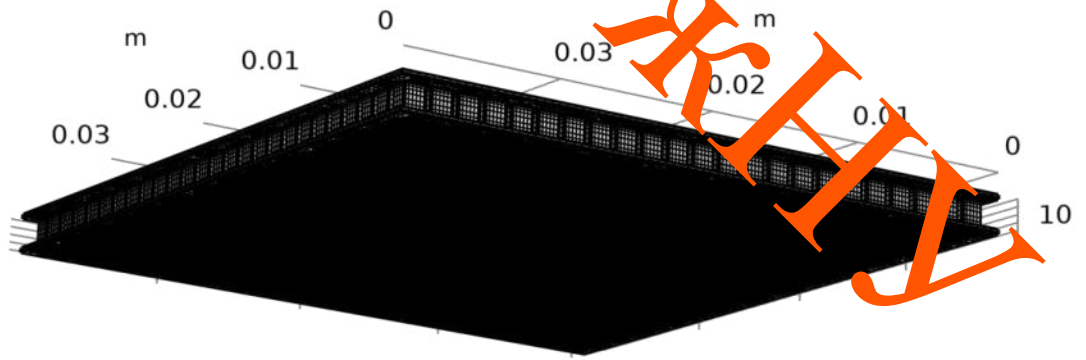


BiSn

3 Model



Geometry 1



Mesh 1

4 Results

PARAMETERS 1

Name	Expression	Value	Description
d_conductor	100[um]	1E-4 m	Conductor thickness
d_ceramics	0.3[mm]	3E-4 m	Ceramics thickness
leg_length	1[mm]	0.001 m	Leg cross section in length
leg_width	1.2[mm]	0.0012 m	Leg cross section in width
leg_height	height - 2*(d_conductor + d_ceramics)	0.0017 m	Leg height
pitch	0.5[mm]	5E-4 m	Pitch
n_length	$\text{floor}((\text{length} - 2*\text{pitch} - \text{leg_length})/(\text{leg_length} + \text{pitch})) + 1 - \text{mod}(\text{floor}((\text{length} - 2*\text{pitch} - \text{leg_length})/(\text{leg_length} + \text{pitch})) + 1, 2)$	26	Number of legs in length
n_width	$\text{floor}((\text{width} - 2*\text{pitch} - \text{leg_width})/(\text{leg_width} + \text{pitch})) + 1$	23	Number of legs in width
network_length	$(\text{leg_length} + \text{pitch}) * \text{n_length} - \text{pitch}$	0.0385 m	Length of legs network
network_width	$(\text{leg_width} + \text{pitch}) * \text{n_width} - \text{pitch}$	0.0386 m	Width of legs network
N	$(\text{floor}((\text{length} - 2*\text{pitch} - \text{leg_length})/(\text{leg_length} + \text{pitch})) + 1 - \text{mod}(\text{floor}((\text{length} - 2*\text{pitch} - \text{leg_length})/(\text{leg_length} + \text{pitch})) + 1, 2)) * ((\text{floor}((\text{width} - 2*\text{pitch} - \text{leg_width})/(\text{leg_width} + \text{pitch})) + 1)) / 2$	299	Number of thermocouples

TABLE 1

Maximum temperature difference (K)
73.171

TABLE 2

Required current for maximum temperature difference (A)
2.9849

TABLE 3

Required voltage for maximum temperature difference (V)
1.4023

TABLE 4

Overall electrical resistance (Ω)
0.46979

TABLE 5

Maximum heat dissipation (W)

Maximum heat dissipation (W)

2.551

TABLE 6

I_0 (1)	$dT_0=20$ K, Coefficient of performance (1)	$dT_0=40$ K, Coefficient of performance (1)	$dT_0=60$ K, Coefficient of performance (1)
0.1	-1.1221	-6.323	-9.0809
0.15	0.98446	-2.4532	-4.484
0.2	1.5283	-0.92112	-2.4824
0.25	1.6325	-0.20592	-1.4461
0.3	1.5902	0.1564	-0.8541
0.3	1.5902	0.1564	-0.8541
0.5	1.816	0.50687	-0.022669
0.7	1.85016	0.45348	0.12397
0.9	0.61893	0.35523	0.12833

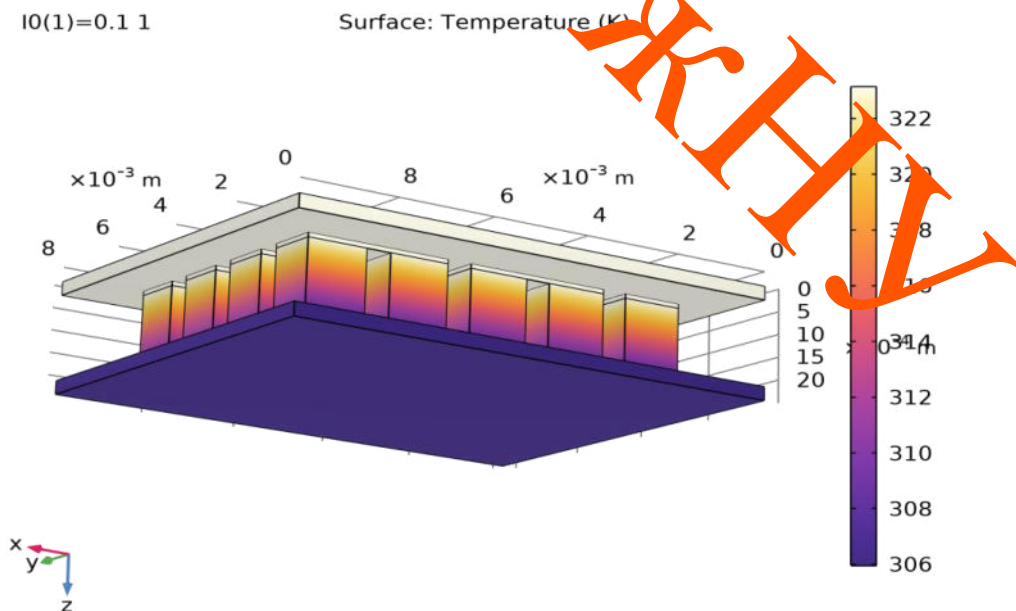
TABLE 7

dT_0 (K)	Maximum: Maximum coefficient of performance (1)
20	1.6325
40	0.50687
60	0.12833

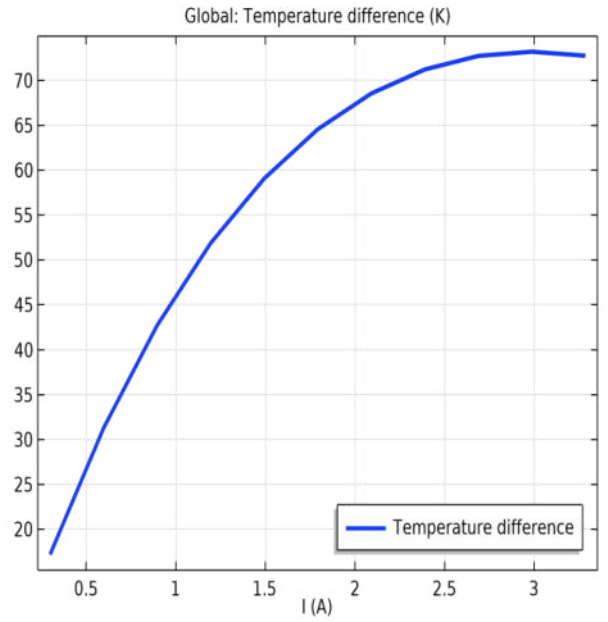
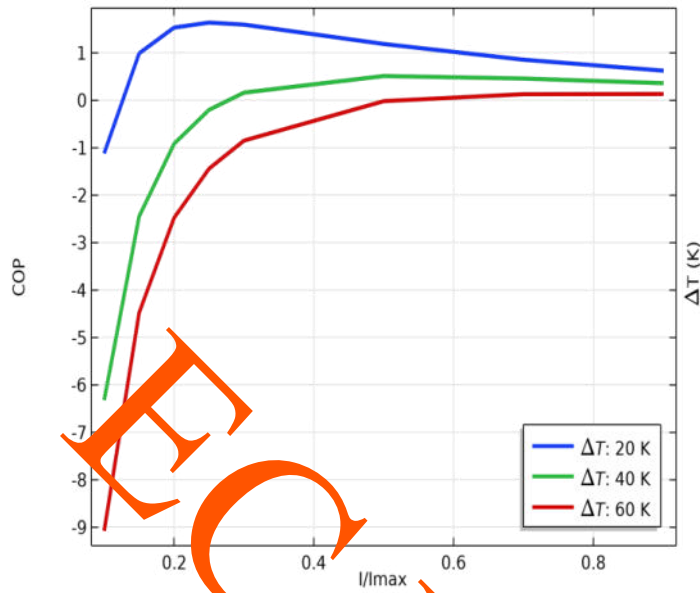
TABLE 8

Figure of merit (1/K)

0.0023767

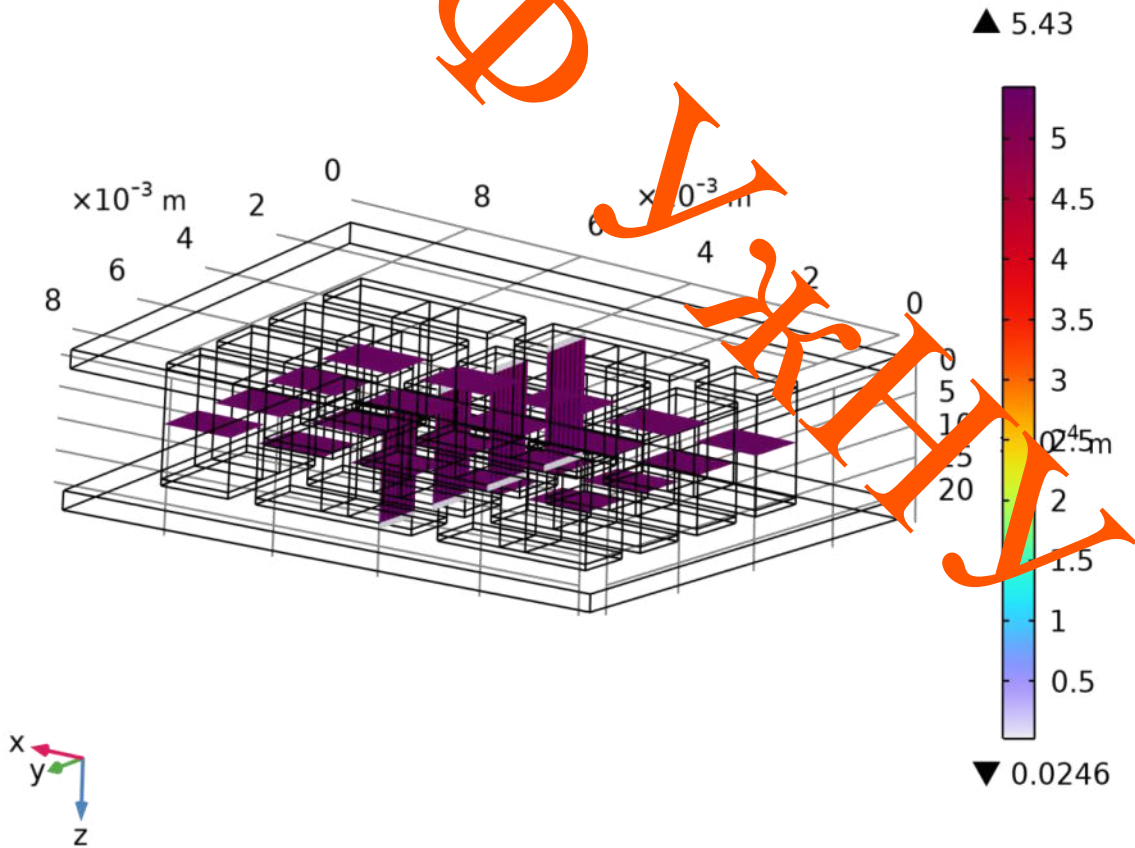


Surface: Temperature (K)



$I_0(1)=0.1$

Multislice: Electric field norm (V/m)



Multislice: Electric field norm (V/m)