

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«__» _____ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою

«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Термочутливий елемент датчика температури»

Виконавля :

студент IV курсу, групи РС-01

Яременко Анна Вадимівна



Керівник:

к.т.н., доц., с.н.с.

Піддубний Володимир Олексійович

Рецензент:

_____ кафедри. ПРЄ, к.т.н.



Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____



Київ – 2024 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Яременко Анни Вадимівни

1. Тема роботи «Термочутливий елемент датчика температури», керівник проекту Піддубний Володимир Олексійович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «29» травня 2024 р. № 2178-с
2. Термін подання студентом роботи 15 червня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи _____ Дослідити сучасний стан вимірювання температури. Проаналізувати існуючі програми для температурних досліджень. Дослідити віртуально основні типи датчиків температури (терморезистивні та на біполярних транзисторах). Розробити комплекс для вимірювання температури на сучасному цифровому датчику._____

4. Зміст пояснювальної записки 1. Вступ. 2. Огляд технічної літератури (Аналіз датчиків. Огляд відомих реалізацій. Вибір програмного середовища для проведення досліджень). 3. Дослідження термочутливих елементів в вибраному віртуальному середовищі. 4. Розробка комплексу для вимірювання температури на базі сучасних цифрових датчиків.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1. Структурна схема комплексу. 2. Результати проведених досліджень. 3. Інші матеріали (слайди), які необхідні матеріали для презентації результатів роботи.

6. Дата видачі завдання 21 квітня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд та аналіз технічної літератури	до 25.04.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>
2.	Аналіз технічного завдання можливих варіантів виконання	до 01.05.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>
3.	Огляд датчиків температури та методів їх віртуального дослідження	до 10.05.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>
4.	Віртуальне дослідження датчиків	до 05.06.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>
3.	Розробка комплексу для вимірювання температури (вибір комплектуючих)	до 27.05.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>
4.	Розробка структурної схеми	до 27.05.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>
5.	Реалізація комплексу для вимірювання температури	до 08.06.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>
6.	Написання пояснювальної записки	до 14.06.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>
7.	Підготовка презентації	до 15.06.2024 р.	<i>ПРЧБ</i>

Студент(ка)

Анна ЯРЕМЕНКО

Керівник

Володимир ПІДДУБНИЙ

АНОТАЦІЯ

Обсяг пояснювальної записки дипломної роботи становить 53 сторінки, які включають в себе 6 розділів, 24 ілюстрації, 3 таблиці, 3 додатків і 17 бібліографічних найменувань за переліком джерел посилань.

Актуальність теми: Термочутливі елементи датчиків температури набувають все більшого значення в сучасній технології завдяки їх широкому застосуванню у різних системах. Точне вимірювання температури є критичним для багатьох процесів, забезпечуючи надійну та ефективну роботу обладнання.

Мета дослідження: Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу датчиків температури на основі різних електронних компонентів, таких як біполярні транзистори та NTC термістори, а також розробка комплексу для вимірювання температури.

Об'єкт дослідження: датчики температури, які використовуються в сучасних пристроях вимірювання температури.

Предмет дослідження: Предметом дослідження є робочі характеристики високочастотних транзисторів при різних температурах, температурна залежність опору термістора NTC, а також розробка і впровадження віртуальних лабораторних робіт для дослідження цих компонентів. Проводиться аналіз параметрів термочутливих датчиків та вибір оптимальних компонентів для створення вимірювального комплексу.

Новизна одержаних результатів: розроблено комплекс для вимірювання температури на базі сучасних цифрових датчиків температури на основі мікроконтролера.

Ключові слова: ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ, КОНТАКТНІ ДАТЧИКИ, ТЕРМОРЕЗИСТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ, ТЕРМОПАРИ, ТЕРМІСТОРИ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ КОНТРОЛЬ, ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ТОЧНІСТЬ, ШВИДКІСТЬ РЕАКЦІЇ, БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ, NTC ТЕРМІСТОРИ, ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.

ANNOTATION

The volume of the graduation work thesis explanatory note is 53 pages, which include 6 sections, 24 illustrations, 3 tables, 3 appendices, and 17 of bibliographic titles by reference list.

Relevance of the topic: Temperature-sensitive elements of temperature sensors are becoming increasingly significant in modern technology due to their wide application in various systems. Accurate temperature measurement is critical for many processes, ensuring reliable and efficient operation of equipment.

Objective of the study: The objective of the study is to conduct a comparative analysis of temperature sensors based on various electronic components, such as bipolar transistors and NTC thermistors, and to develop a complex for temperature measurement.

Object of the study: Temperature sensors used in modern temperature measurement devices.

Subject of the study: The subject of the study includes the operational characteristics of high-frequency transistors at different temperatures, the temperature dependence of NTC thermistor resistance, as well as the development and implementation of virtual laboratory works for studying these components. The analysis of the parameters of temperature-sensitive sensors and the selection of optimal components for creating the measuring complex are conducted.

Novelty of the obtained results: A temperature measurement complex based on modern digital temperature sensors using a microcontroller has been developed.

Keywords: TEMPERATURE SENSORS, CONTACT SENSORS, THERMORESPONSIVE ELEMENTS, THERMOCOUPLES, THERMISTORS, TEMPERATURE CONTROL, TECHNICAL SPECIFICATIONS, ACCURACY, RESPONSE SPEED, BIPOLAR TRANSISTORS, NTC THERMISTORS, TEMPERATURE MEASUREMENT.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
1 ВАЖЛИВІСТЬ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	6
2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ.....	8
3 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЇ	9
3.1 Різновиди пристроїв для вимірювання температури	9
3.2 Термоелектричні датчики - термопара	10
3.3 Термоелектричні датчики - терморезистори.....	14
3.4 Напівпровідникові датчики (діоди та транзистори).....	22
3.5. Залежність параметрів транзистора від температури	22
3.6. Використання біполярних транзисторів як термочутливих елементів .	22
3.7. Пірометри.....	22
4 ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВІРТУАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
4.1 Огляд можливого програмного забезпечення.....	24
4.2 Вибір пакету САПР для проведення температурних досліджень	25
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ В СЕРИДОВИЩІ NI MULTISIM.....	28
5.1 Дослідження терморезисторів(термістрів типу NTC).....	24
5.2 Дослідження біполярних транзисторів	32
6 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	37

6.1 Порівняння мікроконтролерів для використання.....	37
6.2 Порівняння датчиків температури	40
6.3 Основні параметри та структурна схема	43
6.4 Кроки по створенню комплексу для вимірювання температури.....	45
ВИСНОВКИ.....	49
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	51
ДОДАТКИ.....	54
Додаток А.....	54
Додаток Б	61
Додаток В.....	61

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

RTD – терморезистивні елементи

VAX – вольт-амперна характеристика

FEM – метод кінцевих елементів

BEM – метод граничних елементів

EPC – електрорушійна сила

TKO – температурний коефіцієнт опору

NTC – терморезистор з негативним температурним коефіцієнтом опору

PTC – терморезистор з позитивним температурним коефіцієнтом опору

WSN – Віртуальні сенсорні мережі

RPi – Raspberry Pi

GPIO – General Purpose Input Output

RAM – Random Acces Memory, Оперативна пам'ять

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВСТУП

В умовах сучасного технологічного розвитку точне вимірювання температури набуває все більшого значення. Термочутливі елементи датчиків температури застосовуються у різних галузях, від побутових приладів до промислових систем, де вони відіграють ключову роль у забезпеченні надійної та ефективної роботи обладнання. У сучасній електроніці, де контроль температури впливає на продуктивність і довговічність пристроїв, використання термочутливих елементів є незамінним.

Особливої актуальності ця тема набуває в умовах дистанційного навчання, спричиненого карантинном та військовим станом в Україні. Електронні носії та комп'ютери стали невід'ємною частиною навчального процесу, дозволяючи викладачам проводити лекції, семінари, практику та лабораторні роботи онлайн. Для проведення лабораторних робіт онлайн використовуються різні засоби дистанційного навчання, такі як Zoom, Discord, Telegram, Viber, електронна пошта та платформа Moodle. Особливої уваги потребують лабораторні роботи, які раніше виконувалися на фізичних макетах в навчальних лабораторіях. Їх необхідно адаптувати до віртуальних лабораторій, таких як Multisim, Workbench та Microcap, що забезпечить доступ студентів до практичних знань навіть в умовах дистанційного навчання.

Це стосується і дисципліни «Електроживлення радіоелектронної апаратури», яка викладається на третьому курсі радіотехнічного факультету при підготовці фахівців за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. Перехід на дистанційне навчання обумовлює необхідність розробки віртуальних лабораторних макетів, які максимально наближені до реальних умов. Це дозволить студентам виконувати лабораторні роботи та

здобувати необхідні знання, що в майбутньому сприятиме їх професійному становленню як спеціалістів у галузі радіотехніки.

Метою даної дипломної роботи є проведення порівняльного аналізу датчиків температури на основі різних електронних компонентів, таких як біполярні транзистори та NTC термістори, а також розробка комплексу для вимірювання температури на базі сучасного цифрового датчика. Об'єктом дослідження є датчики температури, що використовуються в сучасних пристроях вимірювання температури. Предметом дослідження є робочі характеристики високочастотних транзисторів при різних температурах, температурна залежність опору термістора NTC, а також розробка і впровадження віртуальних лабораторних робіт для дослідження цих компонентів.

Новизна одержаних результатів полягає у розробці комплексу для вимірювання температури на базі сучасних цифрових датчиків температури з використанням мікроконтролера. Це дозволить студентам глибше зрозуміти процеси, пов'язані з роботою термочутливих елементів, та наблизити їх навчання до реальних умов, забезпечуючи високу якість освіти навіть у дистанційному форматі.

1 ВАЖЛИВІСТЬ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Температура є одним з найважливіших фізичних параметрів, що впливають на багато процесів в різних галузях промисловості і науки. Тому вивчення температури та її впливу на матеріали, компоненти та системи є важливим для забезпечення ефективної роботи, надійності та безпеки цих систем.

Температура впливає на роботу електронних компонентів, таких як транзистори, резистори, конденсатори та інтегральні схеми. Перегрів або надмірне охолодження можуть призвести до зниження продуктивності, несправності та пошкодження обладнання. Тому точний контроль температури є ключем до підтримки стабільної роботи електронних пристроїв. У сучасних мікропроцесорах та інших високочастотних компонентах особливо важливо підтримувати оптимальний температурний режим для забезпечення їхньої продуктивності та довговічності.

У промислових умовах контроль температури має вирішальне значення для виробництва та обробки матеріалів. Наприклад, у металургії, харчовій промисловості та хімічному виробництві температурні параметри впливають на якість кінцевого продукту, ефективність виробничого процесу та безпеку працівників. У металургії контроль температури впливає на фізико-хімічні властивості металу, а в харчовій промисловості - на збереження харчових продуктів і безпеку споживачів.

У медичній техніці точне вимірювання та контроль температури необхідні для забезпечення належного функціонування діагностичного та терапевтичного обладнання. Наприклад, у пристроях магнітно-резонансної томографії (МРТ) та інкубаторах для новонароджених важливо підтримувати оптимальну температуру. Точне регулювання температури в медичних лазерах та криогенних установках також має вирішальне значення для успішного проведення процедур.

Датчики температури також важливі для моніторингу навколишнього середовища. Моніторинг температури водних та атмосферних систем дозволяє нам виявити зміни, які можуть вплинути на екосистеми та клімат. Це допоможе в розробці заходів щодо збереження природного середовища і запобігання її негативного впливу на навколишнє середовище. Наприклад, вимірювання температури океанів та атмосфери є критично важливими для дослідження кліматичних змін і прогнозування погодних умов.

У космічних дослідженнях температура є важливим фактором забезпечення працездатності космічних апаратів і супутників. В екстремальних космічних умовах контроль температури дозволяє підтримувати працездатність обладнання, забезпечувати комфорт астронавтам і виконувати точні наукові вимірювання. Температурний контроль у космосі дозволяє захистити електроніку від перегріву під впливом сонячної радіації та охолодження у тіні планет та інших космічних об'єктів.

Температурні дослідження дуже важливі для різних галузей науки і техніки. Вони забезпечують ефективну і надійну роботу електронних компонентів, оптимізують виробничі процеси, забезпечують безпеку медичних виробів, проводять екологічний моніторинг і дозволяють успішно проводити космічні дослідження. Точне вимірювання і контроль температури сприяють поліпшенню якості продукції та обслуговування, підвищенню ефективності систем і зниженню ризиків, пов'язаних з перегрівом або переохолодженням. Це підкреслює необхідність подальших досліджень та розробок у цій галузі для досягнення нових технічних та наукових досягнень. Продовження роботи у цьому напрямку дозволить створювати більш досконалі та надійні системи контролю температури, що задовольняють потреби сучасних технологій та забезпечують стабільний розвиток різних галузей.

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Метою дипломної роботи є проведення порівняльного аналізу датчиків температури та розробка комплексу для вимірювання температури. Також необхідно створити віртуальні макети для температурних досліджень, який може бути використаний для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Схемотехніка. Частина 1. Електронні компоненти» в дистанційному режимі. Програмне середовище, в якому повинні виконуватися лабораторні роботи, повинне бути спеціалізоване для розробки електронних схем, зручне для користування та відоме студентам радіотехнічного факультету починаючи з другого курсу навчання. Це забезпечить ефективне використання програмного забезпечення та легкість у освоєнні нових матеріалів.

Результатом дипломної роботи повинен стати віртуальний макет і рекомендації з проведення лабораторних робіт, а також розробка комплексу для вимірювання температури. Для досягнення мети дипломної роботи необхідно реалізувати комплексний підхід, який включає вибір відповідного програмного середовища, розробку функціонального віртуального макета та створення методичних рекомендацій для проведення лабораторних робіт.

Успішне виконання цих задач дозволить не лише провести порівняльний аналіз датчиків температури, але й забезпечити ефективне дистанційне навчання студентів з використанням сучасних технологій. Це підкреслює важливість проекту та його внесок у розвиток освітніх методик в умовах сучасних викликів. Таким чином, дипломна робота сприятиме підвищенню якості освіти, зокрема в галузі електроніки та радіотехніки, та підготовці кваліфікованих фахівців, здатних працювати з передовими технологіями.

3 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЇ

3.1. Різновиди пристроїв для вимірювання температури

Сучасні методи вимірювання температури включають використання цифрових датчиків, які забезпечують високу точність і зручність у використанні [1]. Ці датчики часто застосовуються у віртуальних лабораторних роботах для дослідження характеристик електронних компонентів, таких як біполярні транзистори. Розглянемо основні компоненти системи цифрового вимірювання температури: датчик температури, контролер та засоби відображення даних.

Температура є критичним фізичним параметром, який потрібно контролювати у багатьох галузях техніки та промисловості. Вимірювання температури відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки, якості та ефективності різних процесів. Для цього застосовуються датчики температури, які можуть бути контактними або безконтактними, в залежності від принципу їх дії та конструкції. Контактні датчики, такі як терморезистивні елементи (RTD), термопари та термістори, потребують фізичного контакту з об'єктом для вимірювання температури. З іншого боку, безконтактні датчики, наприклад інфрачервоні (ІЧ) датчики, вимірюють температуру об'єктів на відстані, використовуючи випромінювання теплових хвиль.

Крім того, датчики температури можуть розділятися за типом використовуваного матеріалу та принципом дії. Наприклад, терморезистивні датчики (RTD) зазвичай виготовляються з платини, міді або нікелю і мають високу точність і стабільність. Термопари, які складаються з двох різнорідних металів, здатні працювати в широкому діапазоні температур і є дуже чутливими до змін температури. Термостати використовують напівпровідникові матеріали і характеризуються високою швидкістю реакції на зміни температури.

Вивчення та розуміння різних типів датчиків температури, їх переваг і обмежень, а також умов їх ефективного використання є важливими для інженерів та технічних спеціалістів. Цей розділ присвячений огляду датчиків температури та їх класифікації, зокрема пасивних датчиків температури.

Пасивні датчики температури включають в себе такі компоненти, як терморезистори, реостатні датчики, тензодатчики тощо. Вони реагують на зміни температури, викликаючи зміну будь-якого параметра самого датчика. Наприклад, біполярні транзистори можуть виступати як терморезистори, оскільки зміна температури призводить до зміни напруги на переході база-емітер. Ця зміна напруги може бути виміряна для точного визначення температури, подібно до функціонування терморезисторів.

Таким чином, сучасні пристрої для вимірювання температури охоплюють широкий спектр технологій і методів, що дозволяє забезпечити точний контроль температури в різних умовах. Вибір конкретного типу датчика залежить від вимог до точності, швидкості реакції, стабільності та інших технічних характеристик, а також від специфіки застосування.

3.2 Термоелектричні датчики - термопара

Термоелектричний перетворювач, або термопара, - це датчик, який вимірює температуру. Він складається з двох різних провідників або напівпровідників, які електрично з'єднані і перетворюють контрольовану температуру в електрорушійну силу (ЕРС). Термопара складається з двох різних видів металів, з'єднаних разом на одному кінці (рис.3.1, 3.2). Коли стик двох металів нагрівається або охолоджується, створюється напруга, яка може бути співвіднесена з температурою.

Промислова термопара є одним з найпоширеніших типів датчиків температури завдяки своїй надійності, точності та здатності працювати в широкому діапазоні температур.

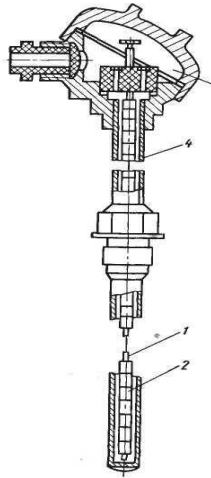


Рисунок 3.1 – Будова промислової термопари

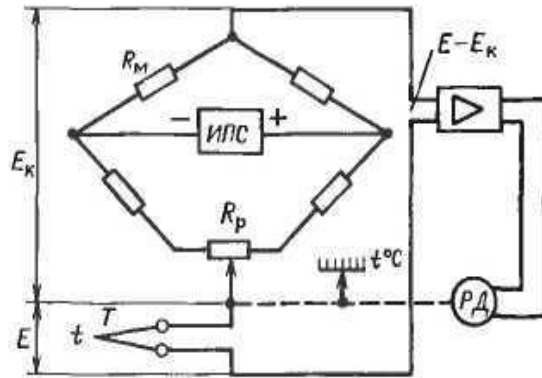


Рисунок 3.2 – Схема одноланцюгової термопари

Вона складається з двох провідників, які ізолюються один від одного за допомогою керамічних бусин або керамічної трубки. Один кінець термоелектродів зварюється, утворюючи гарячий або робочий спай. Інший кінець приєднується до затискачів у головці термопари для підключення зовнішніх проводів. Термоелектроди поміщаються у захисний чохол, який зазвичай виготовляється з жароміцної сталі, кераміки або кварцу для вимірювання дуже високих температур.

Місце з'єднання термоелектродів називається гарячим або робочим спаєм, тоді як протилежні кінці — холодними або вільними. Зазвичай термопара розімкнута в місці вільного спаю, і ЕРС термопари зазвичай не перевищує 50 мВ. Робочий кінець термопари погружається в середовище, температуру якого потрібно виміряти, тоді як вільні кінці підключаються до вторинного приладу. Якщо температура вільних кінців стабільна, підключення може бути виконане мідним дротом. В іншому випадку використовуються спеціальні подовжувальні (компенсаційні) проводи.

Вихід термопары залежить саме від типу. Загальні категорії термопар включають типи J, K, T, E, N, відомі як термопары "Базовий метал", типи R, S, B, які називаються термопарами "Інертний метал", типи C і D, які мають назву "Вогнетривкі металеві" термопары. Температурні і вихідні характеристики для кожного типу визначаються за двома стандартами: ANSI E230, IEC 60584. Температурним таблицям чи температури термопарам називають "кривими термопары". Оскільки вихідний сигнал термопары не є лінійним по відношенню до температури, рівняння термопары включає ряд досить довгих коефіцієнтів для правильного їх визначення.

Постійна часу термопары є кількістю часу, необхідний для того, щоб датчик температури досяг значення 63,2% ступінчастої зміни температури в заданому наборі умов. Щоб датчик наблизився до 100% значення зміни кроку, потрібні п'ять тимчасових констант. Термопара, що піддається впливу, є найшвидшою. Крім того, чим менший діаметр зонда оболонки, тим швидший час реакції термопары, але максимальна температура буде нижчою. Однак оболонка зонда може не витримати весь діапазон температур типу термопары. Термопары можуть виготовлятися з різними комбінаціями металів або калібрування. Найпоширеніший тип датчиків температури "Базовий метал" відомі як типи J, K, T, E або N. Крім того, доступні високотемпературні калібрування, такі як типи R, S, C, GB.

Промислові термопары є важливими інструментами для точного вимірювання температури в різних галузях. Їх конструкція забезпечує надійність і довговічність, а використання компенсаційних проводів дозволяє точно контролювати температурні зміни в складних умовах. Точне розуміння будови і принципу роботи термопар є критичним для розробки ефективних систем вимірювання температури, що підвищує загальну ефективність і безпеку технологічних процесів.

3.3 Термоелектричні датчики - терморезистори

Терморезистори відзначаються великим температурним коефіцієнтом опору (ТКО), простотою використання та стабільністю в різних умовах. Вони здатні працювати в різних кліматичних умовах при значних механічних навантаженнях, що робить їх популярними в промисловості. Терморезистори виготовляють у різних формах, від стрижнів до тонких пластинок, переважно методами порошкової металургії. Розміри терморезисторів можуть варіюватися від декількох мікрометрів до декількох сантиметрів (рис.3.3).

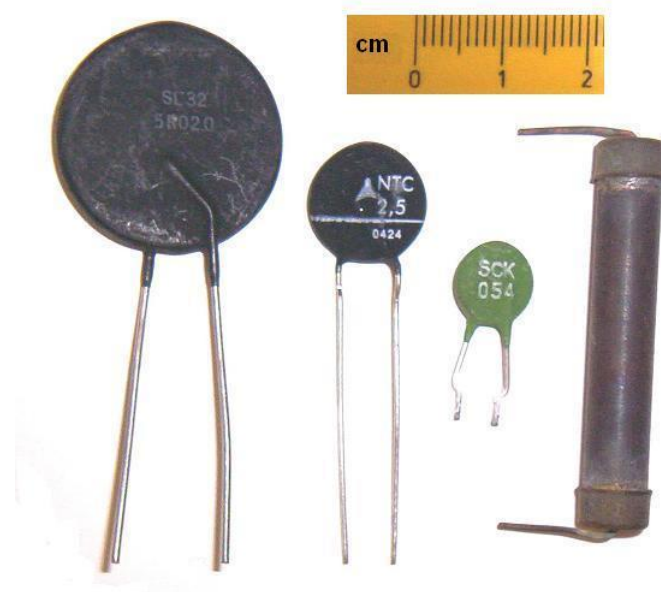


Рисунок 3.3 – Терморезистори різної форми

Основними параметрами терморезистора є номінальний опір, температурний коефіцієнт опору (ТКО), діапазон робочих температур і максимально допустима потужність розсіювання. Номінальний опір визначається при певній температурі, зазвичай при 25°C. Температурний коефіцієнт опору вказує на зміну опору внаслідок зміни температури, а на діапазон температур вказує інтервал робочих температур, у якому терморезистор може працювати стабільно. Максимально припустима потужність розсіювання визначає максимальну енергію, яку терморезистор може розсіювати без пошкоджень.

Терморезистори класифікуються за знаком ТКО на терморезистори з негативним (NTC) і позитивним (PTC) температурним коефіцієнтом опору.

Кожен тип має свої застосування та особливості в різних сферах промисловості. Терморезистори з негативним ТКО використовуються для вимірювання температури (рис.3.4) та компенсації температурних змін в електричних колах і приладах, а також як пускові реле, реле часу та інші електронні пристрої. Їх основна перевага - зменшення опору зі збільшенням температури, що робить їх ідеальними для використання в схемах з високою точністю вимірювання температури.



Рисунок 3.4 – Датчик температури на основі термістора

Терморезистори з позитивним ТКО, навпаки, використовуються для стабілізації температури в електронному обладнанні та інших додатках, де потрібно контролювати температурні зміни. Їх основна перевага - збільшення опору зі збільшенням температури, що забезпечує захист від перегріву та стабілізацію роботи електронних схем.

3.4 Напівпровідникові датчики (діоди та транзистори)

Напівпровідникові матеріали демонструють залежність їх питомої провідності від температури, електричного поля, світла та інших зовнішніх факторів. Напівпровідниковий діод є пристроєм з одним провідним переходом і двома контактами, який використовує властивості провідного переходу. Температурні датчики на основі транзисторів, а також діодів використовують температурну залежність параметрів рп-переходу. Основним параметром, що залежить від температури, є зворотний струм діода і

транзистора, який експоненціально збільшується зі збільшенням температури. Однак температурний режим, в якому можуть використовуватися ці параметри, обмежений тепловою напругою, яка визначає верхню межу їх застосування.

Використання прямих параметрів транзисторів та діодів є популярним через їх переваги перед зворотними параметрами, такі як лінійність залежності від температури, широкий діапазон робочих температур і висока стабільність. У більшості випадків для вимірювання температури використовується пряма напруга рп-переходу при постійному струмі емітера. У міру підвищення температури транзистора типу р-п-р напруга емітер-база змінюється від позитивного значення до негативного. Обмеження, викликані високими температурами, пов'язані з переходом домішкового напівпровідника в інші стани та зниженням напруги пробою при негативній напрузі.

Використання при низьких температурах обумовлене знезараженням домішок і зниженням концентрації основних носіїв через зменшення коефіцієнта посилення по струму. Основними недоліками термодатчиків на основі діодів і транзисторів є складність отримання їх номінальних статистичних характеристик через різноманітність основних параметрів транзисторів, таких як коефіцієнт посилення по струму, опір у базовій області, струм витоку тощо.

Стабільність параметрів є важливою особливістю термодатчиків на основі транзисторів і діодів. Вивчення довготривалої стійкості термодатчиків на базі транзисторів з температурно-залежними параметрами показало, що пряма напруга на рп-переході змінюється в залежності від температури і часу роботи. Основними причинами нестабільності є зворотний процес гідратації-дегідратації оксидного шару на поверхні кристала напівпровідника, а також виникнення залишкової деформації у ньому через неоднаковості температурного коефіцієнта лінійного розширення матеріалу транзистора.

В результаті, напівпровідникові температурні датчики, такі як діоди і транзистори, мають свої переваги та обмеження, що визначають їхнє застосування у різних умовах. Їх використання потребує ретельного врахування всіх параметрів та умов експлуатації для забезпечення максимальної точності і стабільності вимірювань.

3.5. Залежність параметрів транзистора від температури

Транзистор, як нелінійний елемент, описується вольт-амперними характеристиками, які залежать від схеми включення. Схема з загальним емітером є найбільш поширеною, тому розглянемо характеристики n-p-n транзистора. Вхідна характеристика демонструє залежність струму бази від напруги база-емітер $I_B(U_{BE})$ (рис.3.5), передатна характеристика показує залежність струму колектора від напруги база-емітер $I_C(U_{BE})$ (рис.3.6), а вихідна характеристика відображає залежність струму колектора від напруги колектор-емітер при постійному значенні струму бази $I_C(U_{CE})$ (рис.3.7).

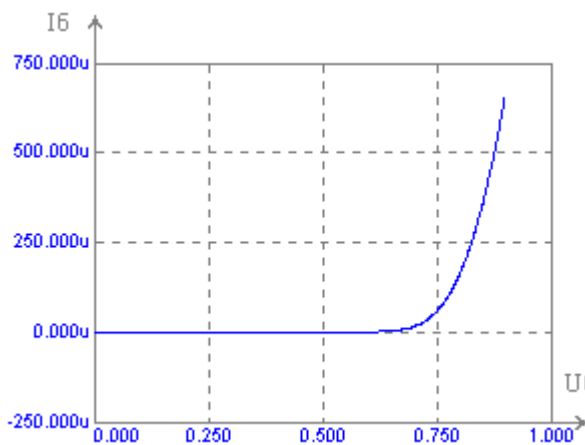


Рисунок 3.5 – Залежність струму бази від напруги база-емітер

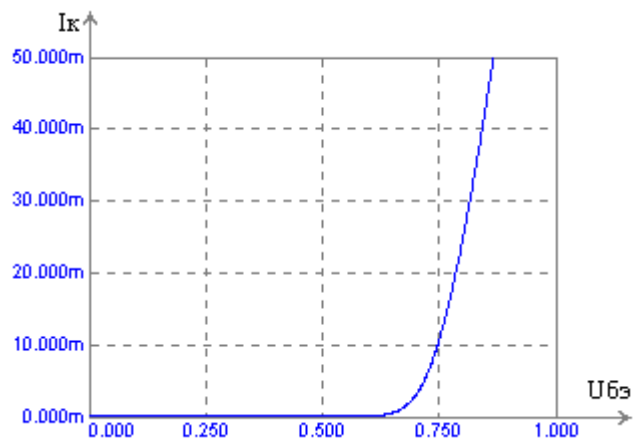


Рисунок 3.6 – Залежність струму колектора від напруги база-емітер

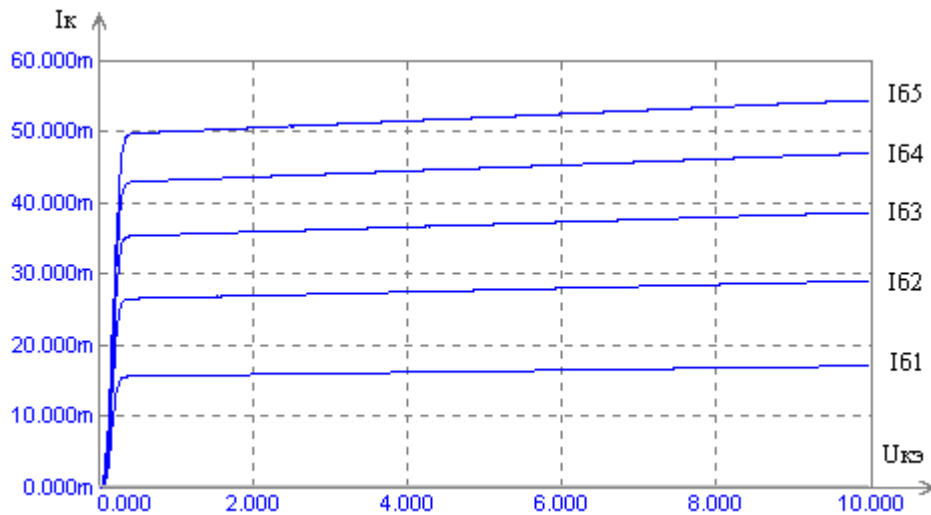


Рисунок 3.7 – Залежність струму колектора від напруги колектор-емітер

На рис.3.5 – рис.3.7 показані характеристики кремнієвого транзистора.

З аналізу характеристик транзистора видно, що помітний струм бази і колектора протікає, коли напруга база-емітер досягає приблизно 0,6 В. Мала зміна напруги $U_{бe}$ біля цієї точки викликає відносно велику зміну струмів бази та колектора. Після досягнення певного значення $U_{кe}$ колекторний струм мало змінюється, і ця напруга називається напругою насичення. Передатна характеристика транзистора має вигляд експоненційної функції [2]:

$$I_k = I_{KOT}(T, U_{кe}) e^{U_e/U_T}, \quad (3.1)$$

де I_{KOT} – теоретичний зворотний струм колектора транзистора

Температура суттєво впливає на характеристики транзистора, особливо на зв'язок між струмом колектора і напругою база-емітер. З підвищенням температури передатні характеристики зміщуються вліво (рис.3.8), що означає, що один і той же струм колектора досягається при меншій напрузі $U_{бe}$. Температурний коефіцієнт $U_{бe}$ показує, що при збільшенні температури на один градус напруга $U_{бe}$ зменшується на 1,7 мВ. Використовуючи рівняння, можна показати, що при зміні температури на 30 градусів колекторний струм змінюється майже в десять разів. Це ускладнює

підтримку температурно стабільної робочої точки транзистора в режимі малих сигналів, якщо орієнтуватися лише на значення напруги $U_{\text{бe}}$ [3].

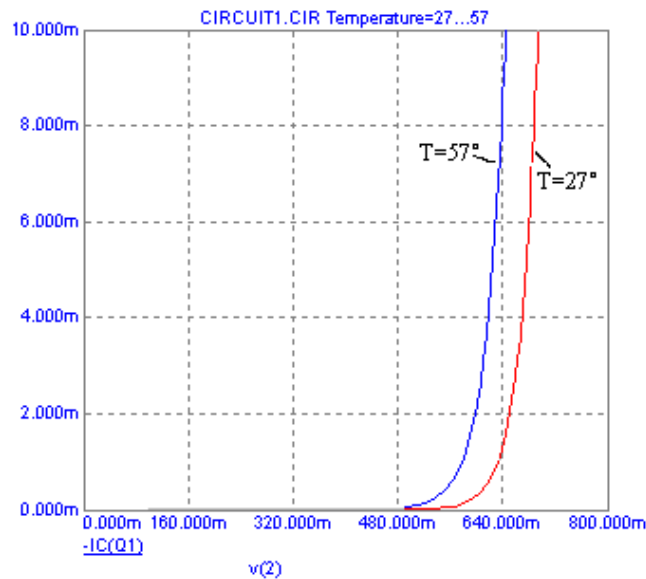


Рисунок 3.8 – Передатні характеристики

3.6 Використання біполярних транзисторів як термочутливих елементів

Температурні залежності вольт-амперних характеристик біполярного транзистора включають кілька важливих аспектів, таких як зміна напівпровідникових властивостей, теплове вироблення, температурна стабільність та теплове управління і захист.

Зі збільшенням температури змінюється концентрація носіїв заряду в базі транзистора, що може призвести до зміни коефіцієнта підсилення струму і падіння напруги переходу база-емітер. Збільшення температури також підвищує теплове вироблення, що впливає на величину теплового опору в транзисторі. Це може змінити падіння напруги на транзисторі при певних струмових режимах, впливаючи на вольт-амперні характеристики. Параметри, такі як коефіцієнт підсилення струму, можуть бути досить чутливими до змін температури, що призводить до неконтрольованого зміщення робочої точки транзистора. Використання відповідних теплових заходів, таких як радіатори, може зменшити вплив температури на вольт-

амперні характеристики транзистора. Захисні механізми також можуть зменшити ризик перегріву, що може впливати на роботу транзистора.

Узагальнюючи, температурні залежності вольт-амперних характеристик біполярного транзистора можуть бути складними і включати в себе ефекти, які походять як із змін напівпровідникових властивостей, так і з теплових фізичних процесів у пристрої.

Біполярний транзистор може бути використаний як температурний датчик завдяки зміні його вольт-амперних характеристик, зокрема напруги переходу база-емітер. Основна ідея полягає у використанні властивостей транзисторів, які змінюються з температурою, для створення вимірювального пристрою. Такий датчик зазвичай вимірює температурні різниці між двома пунктами, наприклад, між середовищем і об'єктом, або між двома точками на об'єкті. Він працює на принципі порівняння характеристик транзисторів при різних температурах.

До основних переваг диференціальних датчиків температури на біполярних транзисторах можна віднести високу точність, стійкість до шуму та динамічний діапазон. Диференціальні датчики температури на біполярних транзисторах використовуються в різних галузях, таких як промислові процеси, кліматичний контроль, медичні пристрої тощо.

Проте, біполярні транзистори рідко використовуються як чутливі елементи в датчиках температури. Зазвичай для цього застосовуються терморезистори, термопари, термістори або інші термодатчики. Біполярні транзистори зазвичай використовуються у схемах підсилення або комутації сигналів, а не для вимірювання температури. Використання біполярних транзисторів як температурних датчиків можливе, але вимагає додаткового обладнання та калібрування.

Температурна залежність електричних властивостей кремнію, як базового напівпровідникового матеріалу, може виявлятися у зміні напруги переходу база-емітер або температурного коефіцієнта струму колектора. Ці зміни можна вимірювати та використовувати для визначення температури.

Однак, використання біполярних транзисторів як температурних датчиків менш точне і надійне порівняно зі спеціалізованими термодатчиками.

В підсумку, хоча біполярні транзистори можуть використовуватися як термочутливі елементи, їх ефективність та надійність у цьому застосуванні поступаються спеціалізованим температурним датчикам, що обмежує їх використання в цій ролі.

3.7 Пірометри

Пірометр, також відомий як інфрачервоний термометр або термодетектор, - це пристрій, призначений для швидкого і безконтактного вимірювання температури об'єктів на відстані до 3 метрів. Він працює за принципом обчислення тепло-електромагнітного випромінювання, зазвичай в діапазоні інфрачервоного випромінювання та видимого світла. Це дозволяє вимірювати температурні значення поверхонь майже будь-яких об'єктів. Пірометри дозволяють здійснювати контроль і своєчасно регулювати температуру та її перепади в промисловості й побуті, а також у різних предметах та їхніх деталях, якщо їхній діаметр становить 13 мм і більше.

Стандартний інфрачервоний термометр має форму, подібну до пістолета, оснащений невеликим РК-дисплеєм для відображення результатів вимірювань. Ключовим поняттям для правильного використання пірометра є "емісивність" (випромінювальна здатність) матеріалу, який вимірюється. Емісивність - це здатність матеріалу випромінювати енергію у вигляді інфрачервоного випромінювання, і вона може мати значення від 0 до 1 (або від 0% до 100%).

Зазвичай органічні матеріали, такі як шкіра, мають високу емісивність, близько 0,95, що означає, що вони випромінюють 95% від максимально можливої кількості інфрачервоного випромінювання для даної температури. Поліровані метали, з іншого боку, мають низьку емісивність (часто менше 20%), тому вони є менш ефективними радіаторами при кімнатній температурі. Усередині пірометра знаходиться детектор

тепловипромінювання, на інтенсивність і спектр якого прямо впливають температурні показники об'єктів. Вбудована електронна система фіксує отримані дані і виводить їх на дисплей у зручному для аналізу форматі.

Пірометри дозволяють аналізувати тіла з низькою теплоємністю та теплопровідністю, а також стаціонарні, рухомі елементи та навіть об'єкти під напругою. Вони широко застосовуються в різних сферах завдяки простоті використання, доступній вартості та точності вимірювань. Пірометри незамінні як у промисловості, так і в побуті, забезпечуючи швидке і точне вимірювання температури різних об'єктів.

Завдяки можливості безконтактного вимірювання температури, пірометри є важливими інструментами для застосування в ситуаціях, де контактний метод є небезпечним або недоцільним. Це включає моніторинг температури у виробничих процесах, обслуговування електричних систем, контроль температури в харчовій промисловості, а також використання в медичних цілях для швидкого визначення температури тіла.

Загалом, пірометри є потужними інструментами для точного і швидкого вимірювання температури, забезпечуючи ефективний контроль температурних режимів у різних галузях.

4 ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВІРТУАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сучасні технології значно розширили можливості досліджень і моніторингу фізичних процесів, зокрема температурних змін. Температурний контроль є критично важливим у багатьох галузях, таких як електроніка, промислове виробництво, біологія, медицина та будівництво. В умовах швидкого розвитку інформаційних технологій виникла потреба в ефективних, точних та доступних методах вимірювання і аналізу температури. Традиційні методи, що базуються на фізичних вимірюваннях, мають ряд обмежень, зокрема високу вартість обладнання, складність реалізації та необхідність проведення тривалих експериментів. Це стимулює розробку і впровадження віртуальних методів досліджень.

Віртуальні методи дослідження температури надають можливість проводити експерименти у віртуальному середовищі, що дозволяє уникнути багатьох труднощів, пов'язаних з фізичними вимірюваннями. Завдяки використанню сучасного програмного забезпечення, можна точно моделювати термічні процеси, аналізувати різні сценарії та отримувати надійні результати. Це відкриває нові перспективи для наукових досліджень та інженерних розробок.

Серед найбільш популярних програмних пакетів для віртуальних досліджень температури варто виділити ANSYS, COMSOL Multiphysics, MATLAB, NI Multisim та інші. Ці інструменти дозволяють здійснювати детальний аналіз термічних процесів, моделювати поведінку матеріалів при різних температурних умовах та оптимізувати конструкції для покращення їх термічних характеристик. Однією з універсальних платформ для вимірювання та моніторингу температури є Raspberry Pi, яка отримала широке визнання серед дослідників та інженерів.

Завдяки своїй доступності, компактним розмірам та широким можливостям для програмування, Raspberry Pi є ідеальним рішенням для створення комплексних систем моніторингу температури. Вона дозволяє інтегрувати різні датчики, використовувати бездротові технології для передачі даних та забезпечує високу точність вимірювань.

У цьому дослідженні ми розглянемо основні методи віртуальних температурних досліджень, їх переваги та недоліки, а також продемонструємо практичне застосування Raspberry Pi для створення системи моніторингу температури. Ми проаналізуємо можливості різних програмних інструментів, розглянемо приклади їх використання та оцінемо ефективність впровадження віртуальних методів для вирішення сучасних інженерних задач.

Метою даної роботи є детальний огляд віртуальних методів дослідження температури, визначення їх місця у сучасній науковій та інженерній практиці, а також розробка і впровадження системи моніторингу температури на основі Raspberry Pi. Моделювання температурних процесів за допомогою методів кінцевих елементів (FEM) та граничних елементів (BEM) дозволяє детально аналізувати термічні властивості матеріалів та конструкцій, що є критично важливим для багатьох інженерних задач.

Віртуальні лабораторії, такі як NI Multisim та MATLAB, надають можливість проводити експерименти в безпечному середовищі, що особливо корисно для освітніх цілей та дослідницьких проєктів. Віртуальні сенсорні мережі дозволяють ефективно тестувати та оптимізувати системи моніторингу температури, що сприяє розвитку нових технологій та рішень.

Таким чином, використання віртуальних методів дослідження температури забезпечує високу точність, надійність та функціональність, що робить їх незамінними інструментами для сучасних наукових та інженерних досліджень. Вони сприяють покращенню якості продукції, оптимізації виробничих процесів та підвищенню безпеки в різних галузях промисловості та науки.

4.1 Огляд можливого програмного забезпечення

Одними з найпоширеніших методів віртуальних температурних досліджень є моделювання та симуляція температурних процесів, використання віртуальних лабораторій та віртуальних сенсорних мереж. Ці методи застосовуються в різних галузях, таких як матеріалознавство, електроніка, біологія та кліматологія. Моделювання та симуляція температурних процесів дозволяють аналізувати поведінку систем під впливом температури, прогнозувати їх реакцію та оптимізувати конструкцію без потреби у фізичному прототипуванні. Один з найпоширеніших підходів для моделювання температурних полів у складних об'єктах є FEM, який використовується в програмному забезпеченні, такому як ANSYS, COMSOL Multiphysics та Abaqus. Цей метод застосовується для визначення температурного розподілу у матеріалах, оцінки теплових навантажень в електронних пристроях та моделювання температурних полів у будівлях та спорудах. BEM використовується для моделювання теплових процесів у випадках, коли необхідно аналізувати вплив граничних умов, і застосовується в програмному забезпеченні, такому як BEASY та BEMLab. Цей метод дозволяє моделювати теплопередачу через поверхні та аналізувати температурні поля у вузьких зонах. Віртуальні лабораторії дозволяють проводити температурні експерименти без необхідності використовувати фізичне обладнання, що особливо корисно для навчальних закладів та дослідницьких інститутів. NI Multisim є засобом для моделювання електронних схем, який також дозволяє симулювати температурні ефекти на компонентах. Він використовується для аналізу впливу температури на електронні компоненти та дослідження термічних властивостей схем[4]. MATLAB і Simulink є потужними інструментами для чисельного моделювання різних фізичних процесів, включаючи теплопередачу.

Вони застосовуються для моделювання теплопередачі в багатошарових матеріалах, оптимізації систем охолодження та аналізу термічних процесів в реальному часі.

Віртуальні сенсорні мережі (WSN) дозволяють створювати моделі реальних сенсорних систем для моніторингу температури в різних середовищах. Це дозволяє тестувати та оптимізувати сенсорні мережі без фізичних обмежень. NS-3 є симулятором, який дозволяє моделювати поведінку сенсорних мереж у різних умовах. Він використовується для аналізу ефективності мережевих протоколів для температурного моніторингу та оптимізації розташування сенсорів. TOSSIM є симулятором для віртуальних сенсорних мереж, розробленим спеціально для операційної системи TinyOS. Він застосовується для моделювання температурних сенсорних мереж та тестування нових алгоритмів збору даних.

Віртуальні методи дослідження температури надають широкі можливості для аналізу та оптимізації термічних процесів у різних галузях. [5]. Завдяки використанню сучасного програмного забезпечення та обчислювальних методів, можна значно підвищити ефективність досліджень, зменшити витрати та забезпечити високу точність отриманих результатів.

4.2 Вибір пакету САПР для проведення температурних досліджень

Аналіз розглянутих програмних пакетів дозволяє вибрати пакет NI Multisim для моделювання температурної залежності біполярних транзисторів. Multisim дозволяє легко створювати схему навіть при початковому рівні володіння програмою. Це робить майбутнє виконання лабораторної роботи у даній програмі простим та швидким завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу та складовим елементам схеми. Більшість відомих віртуальних лабораторних робіт проводяться в NI Multisim 10 і 12, яка є найбільш зручною і звичною для студентів. Деякі автори пропонують працювати в середовищі Workbench, яка є старішою версією цієї ж програми. Незважаючи на те, що розглянута в рецензії робота відповідає вимогам

навчального процесу, необхідно створити лабораторні роботи, які були б сумісні з виконанням на фізичному макеті, що використовується в лабораторії кафедри радіотехнічних систем радіотехнічного факультету НТУУ КПІ ім. І. Сікорського [6]. Роботи можна проводити як на фізичному макеті в лабораторії, так і віртуально на ноутбуках або комп'ютерах студентів в рамках дистанційного навчання в системі Moodle.

Фізичні лабораторні макети є не достатньо універсальними, оскільки їх кількість обмежена, тому необхідно ділити групу на бригади для забезпечення можливості виконання лабораторної роботи всіма студентами. Вони не дають можливості адаптувати макет під сучасну елементну базу [7]. Віртуальні лабораторії не мають цих недоліків. На віртуальному макеті можна виконувати роботи одночасно всіма студентами на їхніх комп'ютерах протягом обмеженого проміжку часу, що зручно в системі Moodle. Крім того, там же можна проводити захист робіт у тестовому режимі за чітко визначеними умовами. Для захисту необхідно надіслати протокол виконання роботи та пройти тест по зробленій роботі. Це дозволяє ефективно проводити лабораторні роботи в дистанційному режимі. Крім того, студентам можна надавати відеоролики з поясненнями виконання, що значно підвищує ефективність сприйняття матеріалу [8][9].

Саме тому необхідне створення макетів для віртуальних лабораторних робіт, які не будуть містити від вище вказаних недоліків. Використання віртуального середовища для роботи дозволяє оперативно змінювати структуру та схемотехніку макету для вивчення нових та сучасних електронних компонентів. Для наочності студентам можна зробити відео з реальною лабораторною роботою, що виконується на фізичному макеті, яке буде доповнювати віртуальну роботу на комп'ютері. Це дає студентам можливість ознайомитися з реальним пристроєм і навчитися основам його використання.

Використання NI Multisim для моделювання та проведення лабораторних робіт не тільки спрощує процес навчання, але й дозволяє забезпечити високий рівень якості підготовки студентів у сфері проектування та аналізу електронних схем [10].

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ В СЕРЕДОВИЩІ NI MULTISIM

Термочутливі елементи є ключовими компонентами в різних сенсорних системах, що використовуються для вимірювання температури. Вони змінюють свої фізичні властивості під впливом температури, що дозволяє точно визначати її значення. Для дослідження таких елементів необхідно використовувати ефективні методи та інструменти, які забезпечують точність вимірювань та моделювання температурних залежностей. Одним з найважливіших аспектів дослідження термочутливих елементів є правильний вибір методів та інструментів для їх аналізу. У цій роботі використовувався метод комп'ютерного моделювання, а саме застосування програмних пакетів для створення віртуальних моделей термочутливих елементів та їх аналізу.

В рамках даної дипломної роботи було проведено дослідження температурних залежностей біполярного транзистора за допомогою NI Multisim. Основні етапи дослідження включали створення моделі схеми з використанням вбудованих компонентів бібліотеки Multisim, що включала біполярний транзистор та терморезистор. Після створення моделі схеми було налаштовано параметри для проведення моделювання, визначені початкові умови та параметри для точного відображення реальних умов експерименту [11].

Подальші кроки включали проведення серії симуляцій для визначення залежності параметрів транзистора від температури. Це дозволило виявити характерні закономірності змін фізичних властивостей термочутливих елементів під впливом температури. Отримані дані були детально проаналізовані, що дозволило виявити характерні закономірності та тенденції у зміні параметрів біполярного транзистора та терморезистора при різних температурних умовах.

Застосування NI Multisim для моделювання та дослідження термочутливих елементів дозволяє ефективно вирішувати завдання, пов'язані з аналізом їх температурних залежностей. Використання цієї програми спрощує процес проектування, забезпечує високу точність вимірювань та зручність у проведенні експериментів, що робить її ідеальним інструментом як для навчальних, так і для науково-дослідних цілей. Зокрема, можливість проводити віртуальні експерименти значно підвищує ефективність навчального процесу, дозволяючи студентам глибше зрозуміти поведінку термочутливих елементів у різних умовах. У наукових дослідженнях NI Multisim забезпечує можливість точного і детального аналізу, що є ключовим для розробки нових технологій та покращення існуючих систем вимірювання температури [12].

5.1 Дослідження терморезисторів(термістрів типу NTC)

Термочутливі елементи є ключовими компонентами в різних сенсорних системах, що використовуються для вимірювання температури. Одним з таких елементів є термістор типу NTC (Negative Temperature Coefficient), опір якого зменшується зі збільшенням температури. Це явище пояснюється підвищенням кількості носіїв заряду при нагріванні, що призводить до зменшення опору. Температурна залежність опору термістора описується наступною експоненційною функцією:

$$R_T = R_\infty \cdot e^{\frac{W_g}{2kT}} \quad (5.2)$$

де R_T — опір при температурі T , R_∞ — опір при температурі $T = \infty$, W_g — ширина забороненої зони, k — стала Больцмана

Для дослідження температурних характеристик термістора NTC NTLE101EC90173 було проведено експеримент, метою якого було дослідження залежності опору термістора від температури. Робочий діапазон температур цього термістора становить від -40°C до $+125^\circ\text{C}$. Експеримент

проводився за допомогою програми NI Multisim, яка дозволяє моделювати та аналізувати поведінку електронних компонентів в різних умовах.

Основні етапи дослідження включали:

1. Створення моделі схеми з використанням вбудованих компонентів бібліотеки Multisim, що включала термістор NTC(рис.5.9).
2. Налаштування параметрів для проведення моделювання, визначення початкових умов та параметрів для точного відображення реальних умов експерименту.
3. Проведення серії симуляцій для визначення залежності опору термістора від температури. Це включало зміну температури термістора і фіксування зміни напруги на ньому за допомогою вольтметра. За відомим значенням опору резистора і виміряною напругою було обчислено опір термістора за формулою:

$$R_2 = \frac{V_{U1}}{(V_1 - V_{U1})/R_1} \quad (5.3)$$

де V_{U1} – виміряна напруга на термісторі, V_1 – напруга джерела живлення, а R_1 – опір резистора.

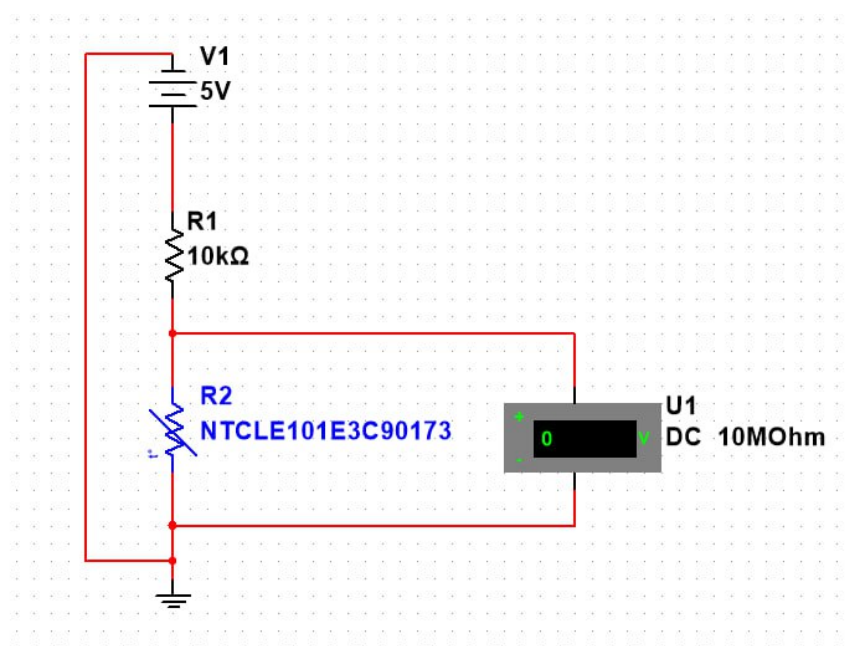


Рисунок 9 – Схема для дослідження NTC термістора

Виконавши заміри та розрахунки, дані були підставлені в табл.1 та сформований графік залежності опору термістора NTC NTLE101EC90173 від температури.

Таблиця 1 –Значення залежності опору термістора від температури

Температура (°C)	Напруга (V2)	Опір (Ω)
0	3,65689	27225
5	3,43814	22010
10	3,20819	17906
15	2,97140	14651
20	2,73241	12047
25	2,49574	9965
30	2,26553	8283
35	2,04524	6920

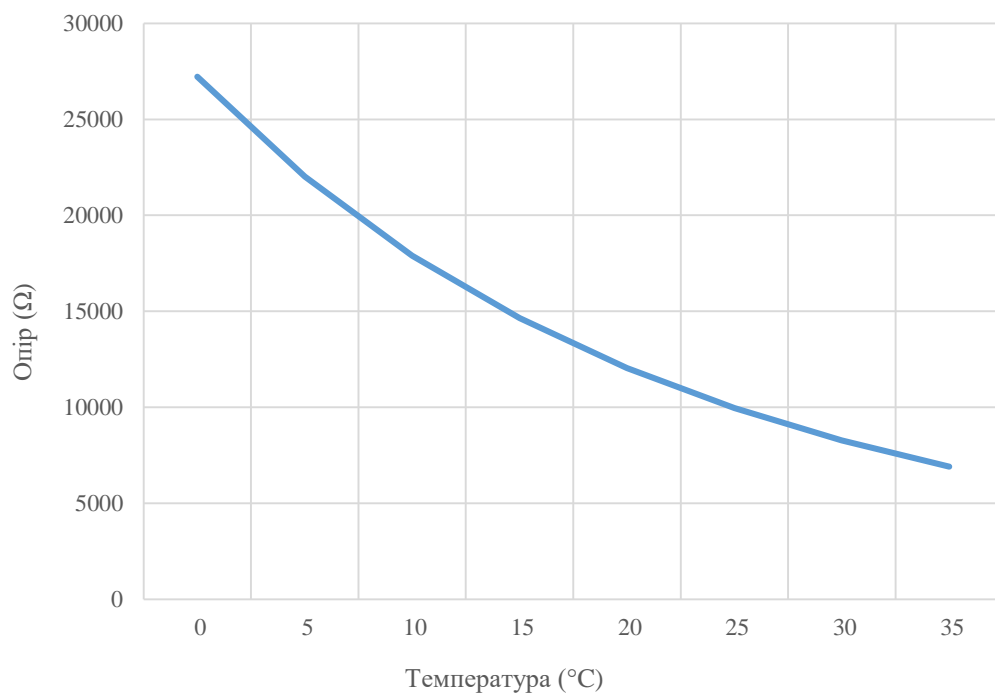


Рисунок 5.10 – Залежність опору термістора NTC NTLE101EC90173 від температури

На графіку (рис.5.10) наведено залежність опору термістора NTC від температури в діапазоні від 0°C до 35°C. Результати вимірювань показують чітку тенденцію до зменшення опору з підвищенням температури. При збільшенні температури від 0°C до 35°C опір термістора знижується з 27225 Ω до 6920 Ω , що відповідає характеристиці термісторів типу NTC. Залежність не є лінійною, що свідчить про складний вплив температури на матеріал термістора, враховуючи експоненційний характер його температурної залежності. Термістор NTC є високочутливим до змін температури, що робить його корисним для застосувань, де потрібно точно вимірювати або контролювати температуру.

Проведений експеримент підтвердив очікувані результати і продемонстрував типову поведінку термістора NTC. Отримані дані можуть бути використані для подальших досліджень, де необхідно використовувати температурну залежність опору. Використання NI Multisim для моделювання та дослідження термочутливих елементів дозволяє ефективно вирішувати завдання, пов'язані з аналізом температурних залежностей [13].

5.2 Дослідження біполярних транзисторів

Метою роботи є ознайомлення з температурними характеристиками біполярних транзисторів 2N3904 і BC547, дослідження залежності вольт-амперних характеристик (ВАХ) транзисторів від температури, зняття робочих характеристик транзисторів при різних температурах та аналіз їх впливу на роботу транзисторів.

Біполярний транзистор (БПТ) — це напівпровідниковий пристрій, який використовується для підсилення або перемикання електричних сигналів. Він складається з трьох шарів напівпровідникових матеріалів, які формують два р-n переходи. Біполярний транзистор змінює свої електричні параметри в залежності від температури. Зокрема, зворотний струм насичення експоненціально залежить від температури:

$$I_C = I_{КОТ}(T, U_{ке})e^{\frac{U_e}{U_T}} \quad (5.4)$$

де I_C – струм колектора, $I_{КОТ}$ – теоретичний зворотний струм колектора транзистора, U_e – напруга база-емітер, U_T – тепловий потенціал

Характеристики досліджуваних транзисторів:

Транзистор 2N3904 — біполярний кремнієвий транзистор типу n-p-n, середньої потужності з інтервалом робочих температур $-55^{\circ}\text{C} - (+150)^{\circ}\text{C}$.

Транзистор BC547 — біполярний кремнієвий високочастотний транзистор типу n-p-n, малої потужності з інтервалом робочих температур $-70^{\circ}\text{C} - (+150)^{\circ}\text{C}$.

Для проведення експерименту було запущено програму NI Multisim, налаштовано віртуальне середовище для проведення експерименту та створено схеми для дослідження біполярних транзисторів. Використовувалось інструмент IV Analyzer для вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) транзисторів 2N3904 і BC547 при змінному значенні для біполярних транзисторів. Для отримання ВАХ необхідно було обрати BJT NPN у меню Components та налаштувати параметри аналізу в меню Simulate parameters (рис.4.1).

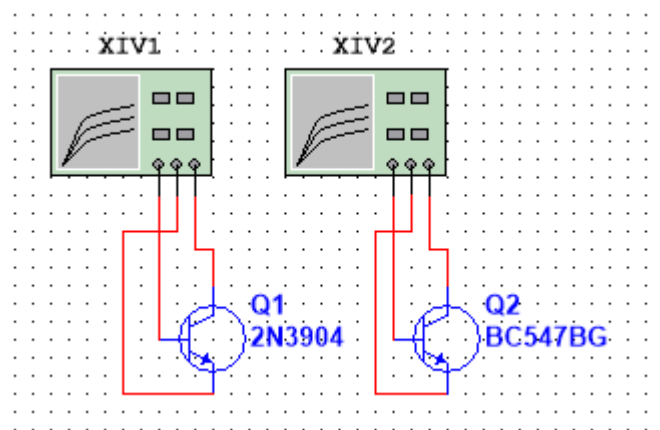


Рисунок 5.11– IV Analyzer з біполярними транзисторами BC547, 2N3904

Після налаштування параметрів та перевірки правильності підключення транзистора до віртуального приладу було проведено симуляцію та отримано сімейства кривих ВАХ для БПТ 2N3904 і BC547. На основі побудованих ВАХ було видно, що обидва транзистори демонструють

класичну поведінку з переходом від лінійного режиму до насичення, де колекторний струм стає майже постійним. Ця поведінка підтверджує ефективність їх використання в підсилювальних схемах. При підвищенні базового струму збільшується і колекторний струм, що співпадає з теоретичними очікуваннями. Отриманні результати симуляцій наведені на рис. 5.12 та рис. 5.13.

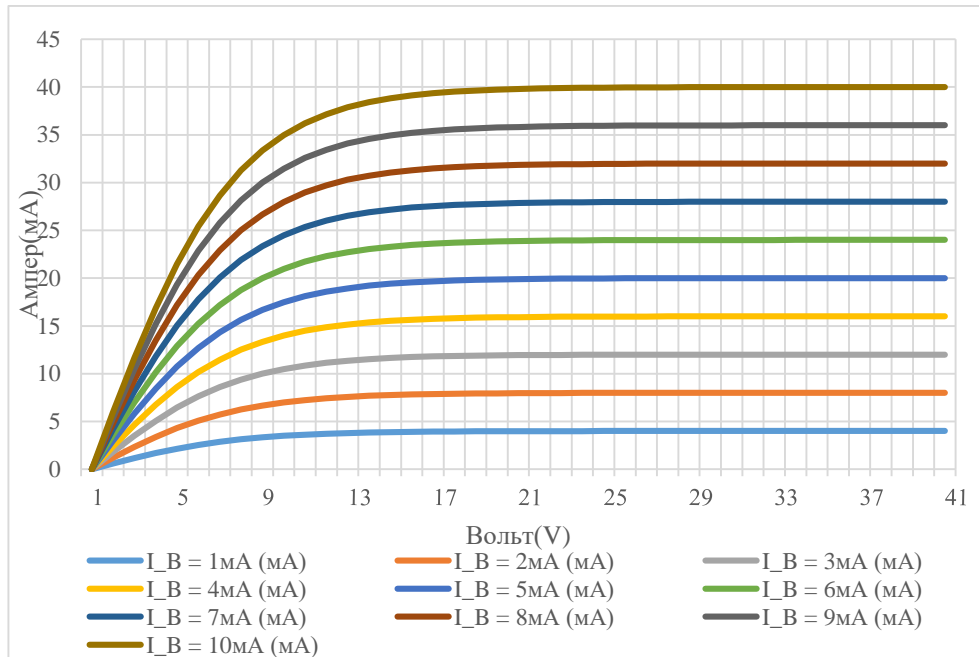


Рисунок 5.12 — Сімейство кривих ВАХ для БПТ 2N3904

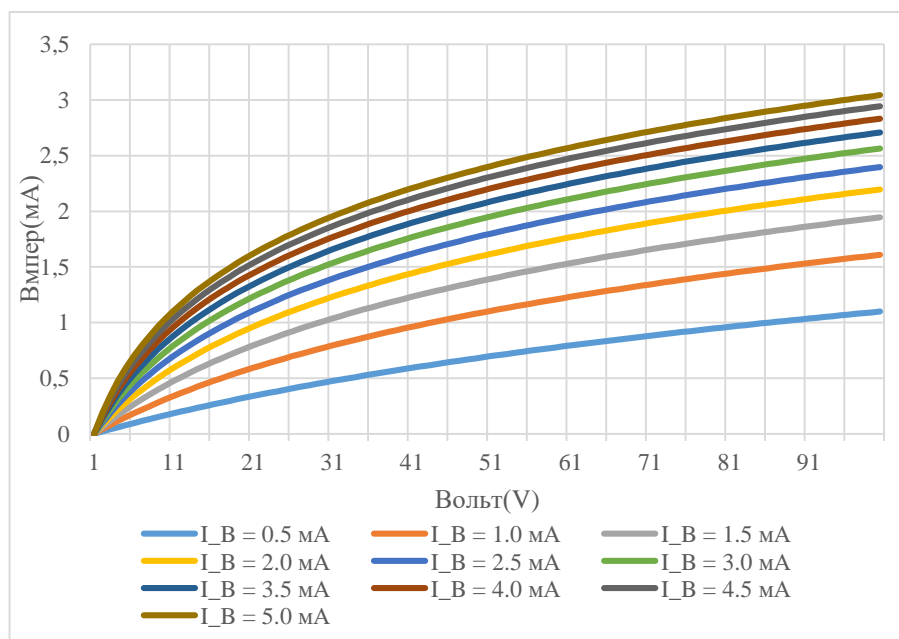


Рисунок 5.13 – Сімейство кривих ВАХ для БПТ BC547

Щоб знайти температурний коефіцієнт, розглянемо ВРТ 2N3904. Для отримання температурного коефіцієнту було використовувався режим дослідження схеми "Temperature Sweep" у поєднанні з "DC Sweep". Параметр для аналізу обрано струм PR1 на макеті. Схема підключення БПТ для їх дослідження наведена на рис. 5.14.

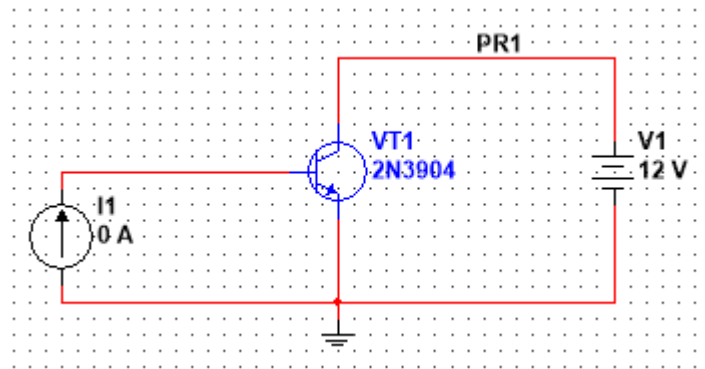


Рисунок 5.14 – Скріншот робочої області Multisim

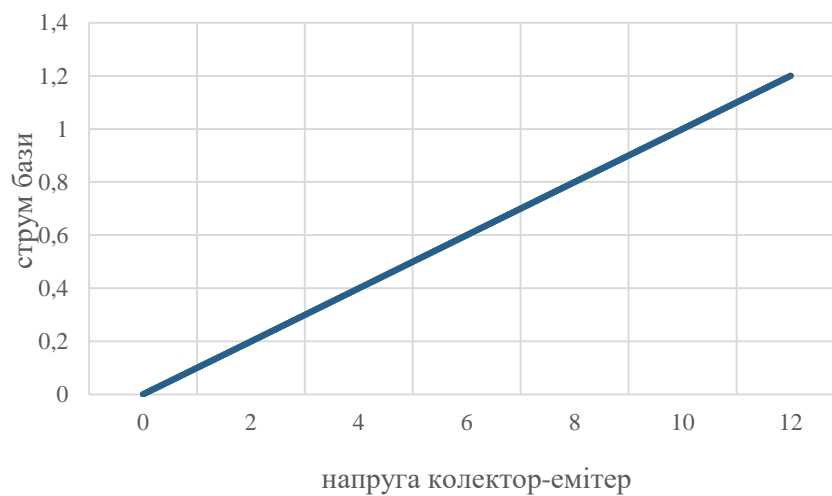


Рисунок 5.15 – Робоча характеристика транзистора 2N3904

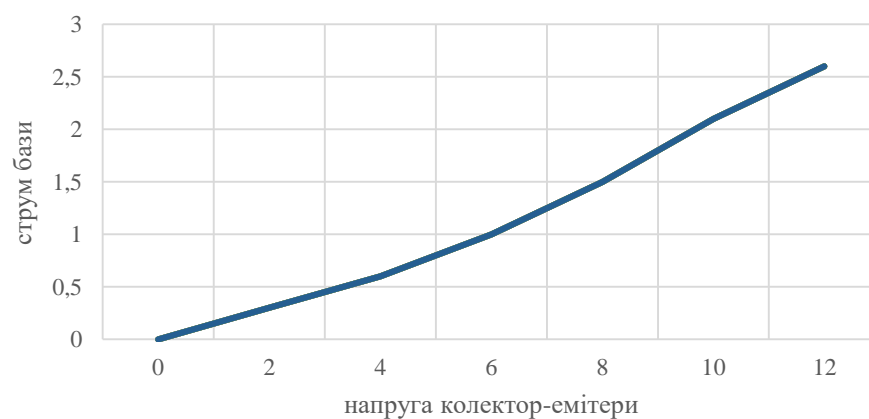


Рисунок 5.16 – Робоча характеристика транзистора BC547

На основі отриманих результатів (рис. 5.15, 5.16) було виявлено, що транзистор 2N3904 демонструє лінійну залежність струму бази від напруги колектор-емітер, що свідчить про його стабільну роботу при зміні температури. Транзистор BC547 демонструє нелінійну залежність струму бази від напруги колектор-емітер, що свідчить про змінну підсилювальну здатність транзистора при різних температурах. Це може впливати на його стабільність та ефективність [14].

Таким чином, проведене дослідження підтвердило типову поведінку біполярних транзисторів 2N3904 і BC547 при зміні температури та продемонструвало їхню ефективність у різних температурних умовах. Отримані дані можуть бути використані для подальших досліджень, де необхідно враховувати температурні залежності параметрів біполярних транзисторів. Ми дослідили сімейства кривих ВАХ біполярних транзисторів BC547 та 2N3904 за різних температурних умов, використовуючи Multisim 12 та IV Analyzer. Це дозволило точно моделювати та аналізувати електронні компоненти, підтвердивши високу температурну стабільність транзисторів, що є важливим для їх застосування у різних електронних схемах[15].

Використання IV Analyzer замість традиційних вольтметрів та амперметрів значно підвищує ефективність та точність досліджень, що особливо важливо для детального аналізу параметрів біполярних транзисторів і їхньої поведінки в різних умовах. Вбудовані інструменти Multisim, такі як IV Analyzer та режими Temperature Sweep і DC Sweep, значно спрощують процес вимірювання і аналізу ВАХ та температурних характеристик транзисторів. Це дозволяє швидко отримати необхідні характеристики без складної підготовки схем і вимірювальних приладів, що є важливим для проведення лабораторних робіт та досліджень[16].

6 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

6.1 Порівняння мікроконтролерів для використання

Мікроконтролери є основними компонентами вбудованих систем і використовуються у різних галузях техніки для обробки даних, керування пристроями та комунікації. Вибір відповідного мікроконтролера для конкретного завдання є критичним для забезпечення ефективності, надійності та економічності системи. В результаті порівняння ми обґрунтуємо вибір Raspberry Pi (RPi) як найкращого рішення.

Для порівняння мікроконтролерів було визначено основні критерії:

- Продуктивність - швидкість процесора та обсяг оперативної пам'яті.
- Інтерфейси вводу та виводу - наявність та кількість доступних портів для підключення периферійних пристроїв.
- Енергоспоживання - ефективність використання енергії, особливо для батарейних систем.
- Програмне забезпечення - підтримка операційних систем та доступність інструментів для написання коду.
- Популярність - Велика популярність забезпечує доступ до багатьох ресурсів, прикладів та готових рішень, що в свою чергу значно спрощує розробку.

Для порівняння було обрано наступні чотири мікроконтролери які підходять по критеріям:

1. Arduino Uno - Широко використовуваний мікроконтролер на базі ATmega328P, популярний у початківців та для простих проектів.
2. ESP32 - Потужний мікроконтролер з вбудованим Wi-Fi та Bluetooth, використовується для IoT проектів.

3. STM32 - Серія мікроконтролерів на базі ARM Cortex-M, відома своєю продуктивністю та широким вибором моделей.
4. Raspberry Pi - Одноплатний комп'ютер з потужним процесором, здатний виконувати завдання як високого так і низького рівнів складності.

Порівняння мікроконтролерів наведено в табл. 1

Таблиця 1 – Основні характеристики мікроконтролерів

Параметр	Arduino Uno	ESP32	STM32	Raspberry Pi
Продуктивність	16 МГц, 2 КБ RAM	160-240 МГц, до 520 КБ RAM	72-480 МГц, до 1 МБ RAM	1.5 ГГц (4 ядра), до 8 ГБ RAM
Інтерфейси вводу/виводу	14 цифрових, 6 аналогових	34 програмованих GPIO, Wi-Fi, Bluetooth	Велика кількість GPIO, різні периферійні інтерфейси	40 GPIO, HDMI, USB, Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth
Енергоспоживання	Низьке	Відносно низьке, режими енергозбереження	Залежить від моделі	Високе, середнє для комп'ютера
Програмне забезпечення	Arduino IDE	Arduino IDE, ESP-IDF	STM32CubeIDE, різні RTOS	Raspbian, Ubuntu
Вартість	Низька	Низька	Середня	Середня
Популярність	Велике, багато бібліотек	Активне, багато документації	Відносно велике	Дуже велике, багато прикладів

Аналіз таблиці та наведеної інформації показав, що кожен з розглянутих мікроконтролерів має свої переваги та недоліки. Arduino Uno ідеально підходить для простих проектів і навчання, ESP32 — для IoT проектів, STM32 — для задач, де потрібна висока продуктивність і гнучкість. Проте, Проаналізувавши мікроконтроллери ми виявили, що Raspberry Pi є найкращим вибором для нашого проекту завдяки високій продуктивності, гнучким можливостям підключення, широкій підтримці програмного забезпечення та популярності. Також одним з найважливіших пунктом також є велика кількість підтримуваних датчиків в Raspberry Pi.



Рисунок 6.17 – Приклад різних датчиків які можна використовувати з RPi

Цей мікроконтролер забезпечить ефективної розробки комплексу для вимірювання температури та надає можливості для розширення і вдосконалення системи.

6.2 Порівняння датчиків температури

Raspberry Pi не має виводів АЦП (аналого-цифрового перетворювача) в GPIO, тому для вимірювання температури необхідно використовувати цифровий датчик. Для розробки комплексу для вимірювання температури були розглянуті декілька популярних датчиків температури, які використовують інтерфейс 1-Wire. До них відносяться DS18B20, DS18S20 та DS1822. Кожен з цих датчиків має свої особливості, що робить їх підходящими для різних застосувань. В табл.2 наведені порівняння їх технічних особливостей.

Таблиця 2 – Порівняльні характеристики датчиків температури

Параметр	DS18B20	DS18S20	DS1822
Температурний діапазон	-55°C до +125°C	-55°C до +125°C	-55°C до +125°C
Точність	±0.5°C (від -10°C до +85°C)	±0.5°C (від -10°C до +85°C)	±2°C (від -10°C до +85°C)
Роздільна здатність	до 12 біт	до 12 біт	до 12 біт
Живлення	Паразитне або зовнішнє	Паразитне або зовнішнє	Паразитне або зовнішнє
Ціна	~40 грн.	~200 грн.	~250 грн.

Для подальшої розробки комплексу для вимірювання температури ми обрали DS18B20 (рис.6.18) з наступних причин: Датчик має високу точність ±0.5°C у діапазоні від -10°C до +85°C, що є прийнятним для більшості застосувань, де потрібна надійність і точність. Програмно налаштовувана роздільна здатність до 12 біт дозволяє отримувати детальні дані про температуру, що є важливим для точних вимірювань. Широкий діапазон

вимірювання від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ робить цей датчик універсальним для різноманітних застосувань, включаючи промислові та побутові.

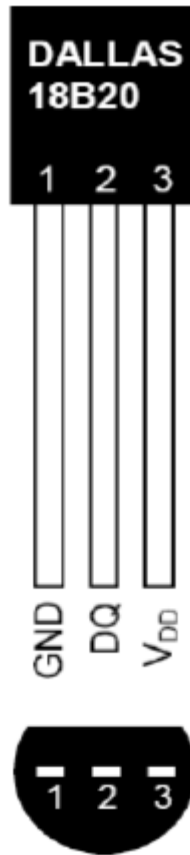


Рисунок 6.18 – Датчик температури DS18B20

В табл.3 наведено призначення виводів датчика DS18B20.

Таблиця 3 – призначення виводів датчика

№	Назва виводу	Опис
1	GND	Спільний
2	DQ	Вивід даних введення/виведення (Input/Output pin). По цій лінії подається живлення в режимі роботи з «паразитним живленням»
3	VDD	Вивід живлення. Для режиму роботи із паразитним живленням VDD необхідно з'єднати зі спільним проводом

Кожен датчик DS18B20 має унікальний 64-бітовий послідовний двійковий код адреси, який забезпечує зв'язок з багатьма датчиками, встановленими на одній шині. Це дозволяє використовувати один мікроконтролер для контролю багатьох датчиків на відстані.

Рисунок 6.19 демонструє блок-схему датчика DS18B20. Він використовує технологію "1-wire", яка дозволяє підключати кілька пристроїв до одного інтерфейсу. Датчик містить унікальний 64-бітовий ROM, який зберігає унікальний двійковий код приладу та оперативну пам'ять з 2-байтовим регістром температури, для зберігання значення температури після вимірювання, та пам'ять EEPROM з двома 1-байтовими регістрами контролю температури (T_H і T_L) і регістром конфігурації. Регістр конфігурації дозволяє встановлювати розрядність цифрового перетворювача температури: 9, 10, 11 або 12 біт. Це впливає на час перетворення температури.

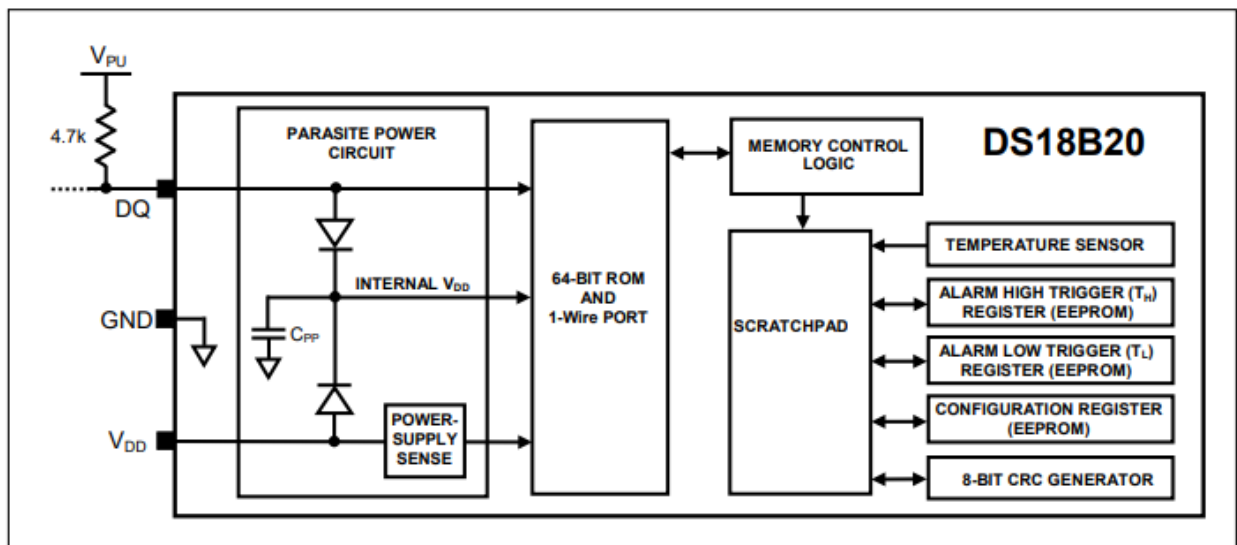


Рисунок 6.19 – Блок-схема DS18B20

Ще однією важливою особливістю датчика DS18B20 є його здатність працювати без зовнішнього джерела живлення. Цю функцію забезпечує підтягуючий резистор. Високий сигнал шини заряджає внутрішній конденсатор (C_{PP}), який живить прилад, коли на шині низький рівень. Такий метод називається "паразитне живлення". При цьому максимальна температура вимірювання становить $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Програмована користувачем роздільна здатність вбудованого АЦП може бути змінена в діапазоні від 9 до 12 розрядів вихідного коду. Абсолютна похибка перетворення становить менше 0.5°C у контрольованому діапазоні температур від -10 до $+85^{\circ}\text{C}$. Максимальний час повного 12-ти розрядного перетворення становить приблизно 750 мс. Внутрішня енергонезалежна пам'ять температурних установок забезпечує запис довільних значень верхньої та нижньої межі установок. Крім того, ця мікросхема містить вбудований логічний механізм пріоритетної сигналізації в лінію, коли температура перевищує один із обраних порогів. Пристрій живиться напругою від 3,0 В до 5,5 В через окремий зовнішній вивід.

DS18B20 є найдешевшим варіантом, але забезпечує відмінне співвідношення ціни та якості завдяки своїм технічним характеристикам. Вибір DS18B20 як датчика температури для комплексу на основі Raspberry Pi обумовлений його високою точністю, широким температурним діапазоном, можливістю програмування роздільної здатності та підтримкою 1-Wire-протоколу, що забезпечує легкість інтеграції та зручність у використанні.

6.3 Основні параметри та структурна схема

Розглянемо розробку комплексу для вимірювання температури на основі Raspberry Pi. Комплекс для вимірювання температури призначений для моніторингу температурних змін. Він може бути використаний у різних застосуваннях, наприклад як:

- Системах клімат-контролю в будівлях, устаткуванні та машинах
- Моніторингу температури в серверних приміщеннях
- Контролю умов зберігання продуктів
- Лабораторних дослідження

Основними параметрами, що визначають ефективність і функціональність комплексу для вимірювання температури, являються:

- Діапазон вимірюваних температур - від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$
- Точність вимірювання - $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- Час відгуку - < 1 секунди
- Інтерфейс для передачі даних - Wi-Fi, Ethernet
- Живлення - через мікро-USB або GPIO
- Програмне забезпечення - ОС Raspbian з підтримкою Python

Для реалізації комплексу використовувалися такі компоненти:

1. Raspberry Pi – Основний обчислювальний блок системи.
2. Температурний датчик – Вимірювальний елемент системи.
3. Резистор 4,7 кОм – Для підключення датчика до Raspberry Pi
4. Блок живлення – На 5V, 2,5A

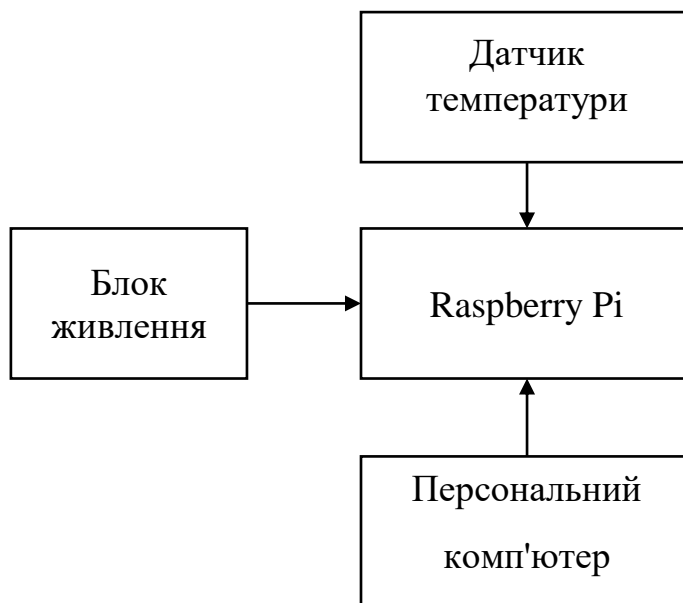


Рисунок 6.20 – Структурна схема системи на Raspberry Pi

Ця схема забезпечує збирання, обробку та аналіз даних (в нашому випадку температури) з подальшою можливістю використання для різних завдань, наприклад моніторингу стану навколишнього середовища.

6.4 Кроки по створенню комплексу для вимірювання температури

Розробка комплексу для вимірювання температури на основі датчика температури DS18B20 на Raspberry Pi складається з кількох ключових етапів, таких як збірка схеми та створення програмного забезпечення [17].

Основними компонентами запропонованої схеми є:

1. Raspberry Pi 4 Model B.
2. Температурний датчик DS18B20.
3. Резистор 4.7kΩ.
4. Блок живлення 5V, 2.5A.
5. Карта пам'яті microSD з встановленою ОС Raspbian.

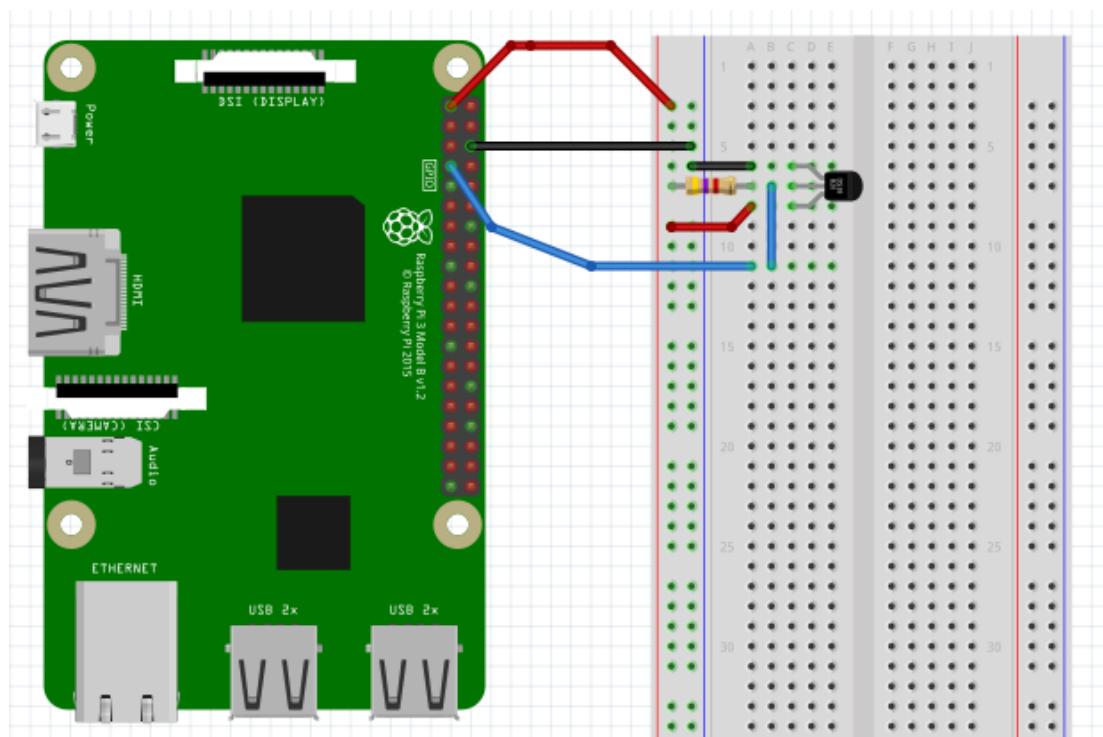


Рисунок 6.21 – Датчик (DS18B20) підключений до RPi

Першим кроком ми підключаємо датчик DS18B20 до RPi(Рис.) наступним чином:

1. Підключаємо один контакт датчика DS18B20 до GPIO4 Raspberry Pi.
2. З'єднаємо VCC датчика з живленням на RPi.
3. З'єднаємо GND датчика з GND на RPi.
4. Підключаємо резистор на 4.7kΩ між лінією даних і VCC датчика.

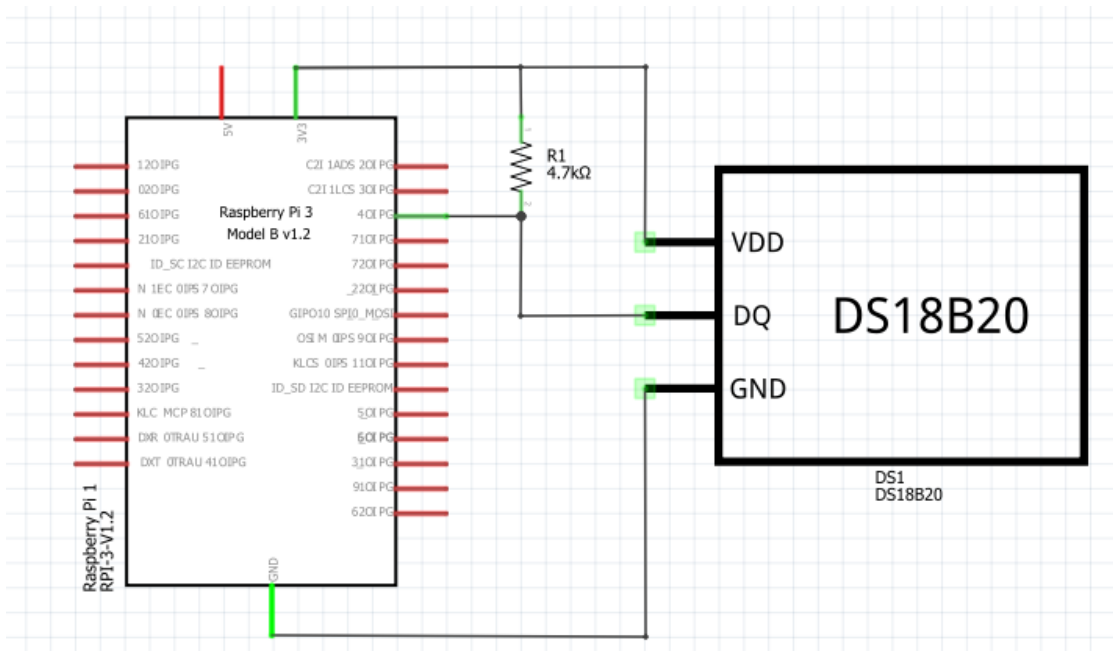


Рисунок 6.22 – Схема підключення датчику до RPi

Наступним кроком вмикаємо RPi і налаштуємо її для аналізу.

Як тільки запустили мікрокомпютер потрібно дозволити інтерфейс 1-Wire в меню Налаштування - Інтерфейси, щоб RPi зміг приймати дані від сенсора.

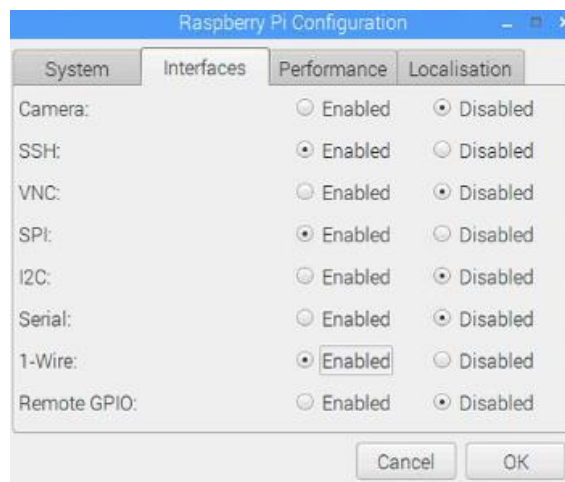


Рисунок 6.23 – Ввімкнення інтерфейсу 1-Wire через налаштування

Або це можна зробити іншим чином через командний рядок на RPi за допомогою команди:

```
sudo modprobe w1_therm
```

Наступним кроком необхідно ввімкнути інтерфейс з нашим сенсором. Також через RPi в командному рядку виконаємо команду:

```
sudo modprobe w1-gpio
```

щоб завантажити модулі ядра однопровідних пристроїв зв'язку, які в свою чергу необхідні для використання сенсора температури.

Далі в командному рядку вводимо команду:

```
ls -l /sys/bus/w1/devices/
```

Це дозволяє побачити усі підключені девайси до RPi.

Кожен сенсор температури DS18B20 має унікальну адресу, яка має приблизно такий вигляд 28-00000xxxxxx. Наприклад 28-00000283c8cd.

Тепер потрібно відкрити файл датчика і переглянути показання температури які він надає за допомогою наступної команди:

```
cat /sys/bus/w1/devices/28-00000283c8cd/w1_slave
```

де 28-00000283c8cd це номер пристрою який ми дізнались в минулому кроці.

```
8d 01 4b 46 7f ff 03 10 03 : crc=03 YES
8d 01 4b 46 7f ff 03 10 03 t=24812
```

Рис. 6.24 – приклад відповіді сенсору температури

Датчик температури надає в відповіді температуру помножену на 1000. Тому щоб дізнатися поточну температуру потрібно поділити отримане число на 1000 тобто, вийде $24812/1000 = 24,812$ градусів. Щоб не питати кожен раз температуру і не обчислювати відповідь ми пропишемо код який буде дізнаватися значення температури кожну секунду і обчислювати та виводити вже зрозуміле значення на екран: Цей код покаже нам при виконанні температуру сенсора кожну секунду в звичному для нас вигляді.

Також ми можемо покращити цей код щоб наприклад коли фіксується температура 25 градусів Цельсія виводилось попередження.

Raspberry Pi обробляє сигнали з датчика, виконує обчислення і надає дані. Програмне забезпечення на Raspberry Pi дозволяє спостерігати за температурою в реальному часі без додаткових обчислень зі сторони користувача а також попереджати коли температура перевищила заданий ліміт.

ВИСНОВКИ

Аналіз принципів роботи термочутливих датчиків показав можливість використовувати температурні залежності їх параметрів як джерело інформації для вимірювачів температури. В віртуальній лабораторній роботі пропонується як чутливі елементи використовувати терморезистори NTLE101EC90173 та біполярні транзистори типу 2N3904 та BC547. Запропоновані схеми досліджень дозволили розробити віртуальні лабораторні роботи з температурних досліджень для дисципліни «Схемотехніка. Частина 1. Електронні компоненти», яка може проводитися в online режимі при дистанційному навчанні. Роботи для дослідження температурної залежності біполярного транзистора та залежність опору термістора NTC від температури розроблені в середовищі NI Multisim, що дозволяє студентам досліджувати електронні компоненти дистанційно. Ці лабораторні роботи можуть бути інтегровані у дистанційне навчання на платформі Moodle, що є актуальним для сучасних умов освіти.

Аналіз ринку мікроконтролерів і цифрових датчиків температури дозволив вибрати найбільш оптимальні компоненти для розробки комплексу вимірювання температури, який може використовуватися як фізичний макет при виконанні лабораторної роботи в умовах очного заняття. Це датчик температури DS18B20 та мікроконтролер Raspberry Pi 4 Model B.

Розроблено фізичний макет необхідний для виконання лабораторної роботи та програмний код для Raspberry Pi, який планується використовувати в майбутньому при вивченні температурних параметрів електронних компонент. Розроблена система відповідає технічному завданню і забезпечує високу ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) точність вимірювань в діапазоні температур від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Neitzert H.C., Vertuccio L., Sorrentino A. Epoxy/MWCNT Composite as Temperature Sensor and Electrical Heating Element / H.C. Neitzert, L. Vertuccio, A. Sorrentino // IEEE Transactions on Nanotechnology– July 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5551210>
2. Головченко К.О., Мокрицький В.А. Дослідження математичних моделей характеристик біполярного транзистора / К.О. Головченко, В.А. Мокрицький / Молодий вчений. – Одеський національний політехнічний університет. – № 10 (74). – жовтень, 2019. – 4 с. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-10-74-3>
3. Електроживлення електронних засобів: Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації «Електронні та інформаційні системи і технології телебачення, кінематографії та звукотехніки» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Пілінський, В. Б. Швайченко. – Електронні текстові данні (1 файл: 1,86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 50 с.
4. Піддубний В.О. Особливості проведення занять з технічних дисциплін в умовах карантину. / В.О.Піддубний // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Матеріали наук.-техн. конф., м. Київ 19-22 травня 2020 р. м. Київ 19-22 травня.2020 р. С. 174-176.
5. Піддубний В.О., Іванечко Д.М. Віртуальні лабораторні роботи в умовах дистанційного навчання/ Розвиток освіти, науки та бізнесу: результати 2020: тези доп. Міжнародної науково-практичної інтернет-конф., 3-4 грудня 2020 р. – Дніпро, 2020. – Т.2. - С.251-253. <http://www.wayscience.com/konferentsiya-03-04-grudnya-2020/>
6. Чорний О.П. Віртуальні лабораторні комплекси для навчального процесу і наукових досліджень / О.П.Чорний, Д.Й.Родькін, В.О.Євстіфеев, А.Л.Перекрест, Т.В.Величко/ Вісник Кременчуцького державного

політехнічного університету ім. М. Остроградського, Випуск № 3(50)/2008, ч. 1 м. Кременчук С. 28-43. http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pages/2008_50_1.htm

7. Піддубний В.О. Лабораторні заняття в підготовці бакалаврів галузі телекомунікації та радіотехніки. / В.О.Піддубний // 6 Міжнародна науково-практична конф. Сучасний рух науки. – 04.04.2019, матеріали конференції — Дніпро, 2019. — С. 910-912. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2019/04/Zbirnik-tez-dop.-6-mizhnarodnoyi-nauk-prakt-int.-konferentsiyi.pdf>

8. Лабораторний практикум з електротехніки : [навчально-методичний посібник] / [автори-укладачі О. О. Лаврентьева, А. С. Солоха]. – Кривий Ріг : КДПУ, 2017. – 112 с

9. Маланчук Є.З., Макаренко В.В., Співак В.М., Власюк Г.Г., Рудик А.В. Моделювання та аналіз цифрових схем: Підручник / Є.З. Маланчук, В.В. Макаренко, В.М. Співак, Г.Г. Власюк, А.В. Рудик // Міністерство освіти і науки України, Національний університет водного господарства та природокористування. – Рівне: НУВГП, 2018. – 463 с.

10. Бойко О.В., Голяка Р.Л., Готра З.Ю. Сенсор різницевої температури на основі інтегруючого сигнального перетворювача / О.В. Бойко, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра // Вимірювальні перетворювачі. – Львівський національний медичний університет ім. Д. Галицького, Національний університет «Львівська політехніка» / Вимірювальна техніка та метрологія. Т. 79, вип. 3, 2018 р. – 12 с. <https://science.lpnu.ua/uk/istcmtm/vsi-vypusky/vypusk-79-3-2018/sensor-riznycevoyi-temperatury-na-osnovi-integruyuchogo>

11. Строкань О. В. С 32 Комп'ютерна електроніка та електротехніка: лабораторний практикум / О. В. Строкань, М. Ю. Мірошніченко. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. – 111 с.

12. Захарченко М.В. Електроживлення систем зв'язку. Лабораторний практикум: Частина 1: Теоретичні положення; Частина 2: Методичні вказівки

/ М.В. Захарченко, А.Ф. Кадацький, О.П. Русу, І.П. Малявін, В.Б. Русаловський, О.А. Грабовий. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011. – 312 с

13. Електроживлення радіоелектронної апаратури: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів радіотехнічного факультету спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»: РТФ №032/17 / Уклад.: О.М.Антонець, В.О.Дмитрук, В.О.Піддубний // КПІ ім. Ігоря Сікорського – К.: 2017. – 52 с.

14. Клименко Ю.М. Методичні вказівки до лабораторних робіт на основі пакету «Мультисім» з дисципліни «Промислова електроніка та перетворювальна техніка» / Уклад.: Ю.М. Клименко; відповідальний за вип. В.Б. Нізімов; рецензент С.В. Количев // ДДТУ – Кам'янське: 2021. – 102 с.
<https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/30/6-30-1178.pdf>

15. Scholten A.J., Vanhoucke T., Klaassen D.B.M. Temperature and geometry dependence of the electrothermal instability of bipolar transistors / A.J. Scholten, T. Vanhoucke, D.B.M. Klaassen // NXP Research, High Tech Campus 32, 5656 AE Eindhoven, The Netherlands; NXP Research, Kapeldreef 75, 3001 Leuven, Belgium. – IEEE Xplore, June 17, 2024.

16. Цимбал О.В., Корнєв В.П. Моделювання впливу параметрів основних компонентів джерел опорної напруги на вихідну напругу / О.В. Цимбал, В.П. Корнєв // Проблеми інформатизації та управління. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – № 63. – 2020.

17. Могильний С.Б. Вбудовані системи програмноапаратних комплексів обробки інформації: Лабораторний практикум / С.Б. Могильний // Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 121 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Лабораторна робота №1

Температурні дослідження біполярного транзистора

Мета роботи та зміст роботи: Ознайомитися з температурними характеристиками біполярних транзисторів 2N3904 і BC547; дослідити залежність вольт-амперних характеристик (ВАХ) транзисторів від температури; зняти робочі характеристики транзисторів при різних температурах та проаналізувати їх вплив на роботу транзисторів.

Теоретичні відомості:

Біполярний транзистор (БПТ) — це напівпровідниковий пристрій, який використовується для підсилення або перемикування електричних сигналів. Він складається з трьох шарів напівпровідникових матеріалів, які формують два р-п переходи. Біполярний транзистор змінює свої електричні параметри в залежності від температури. Зокрема, зворотний струм насичення I_C експоненціально залежить від температури.

Залежність струму колектора транзистора від температури:

$$I_k = I_{KOT}(T, U_{ке}) e^{U_e/U_T} \quad (1.1)$$

де I_{KOT} — теоретичний зворотний струм колектора транзистора.

Характеристики досліджуваних транзисторів:

Транзистор 2N3904 біполярний кремнієвий, транзистор типу n-p-n, середньої потужності з інтервалом робочих температур $-55^{\circ}\text{C} - (+150)^{\circ}\text{C}$

Транзистор BC547 біполярний кремнієвий високочастотний транзистор типу n-p-n, малої потужності. Інтервал робочих температур $-70^{\circ}\text{C} - (+150)^{\circ}\text{C}$.

Порядок виконання роботи:

1. Запустити програму NI Multisim, налаштувати віртуальне середовище для проведення експерименту, та створити схеми для дослідження біполярних транзисторів (рис.1).

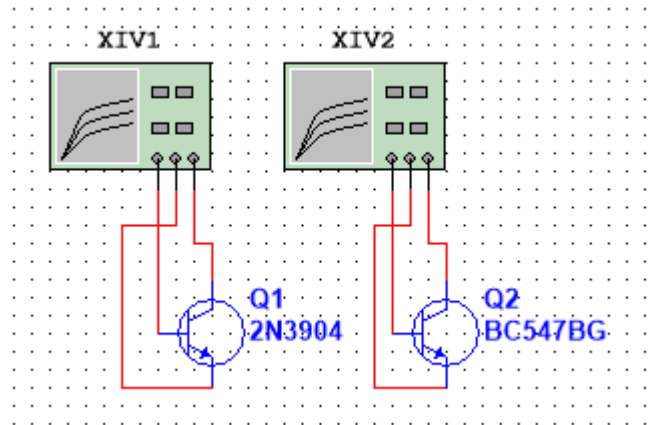


Рисунок 1 – Інструмент IV Analyzer з біполярними транзисторами

2. Використати IV Analyzer для вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) транзисторів 2N3904, BC547 при змінному значенні для біполярних транзисторів. Для отримання ВАХ необхідно відкрити підключеного IV Analyzer, а потім у меню Components обрати BJT NPN (Рис.2).

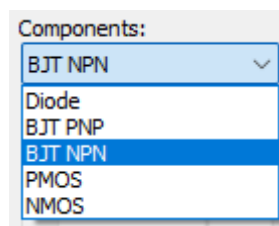


Рисунок 2 – Вибір у меню Components

Після того як обрати BJT NPN потрібно відкрити налаштування аналізу Simulate param. (рис.4) Там ми можемо обрати початкове значення, кінцеве значення та крок. Після вибору параметрів потрібно натиснути ОК щоб обранні налаштування збереглися.

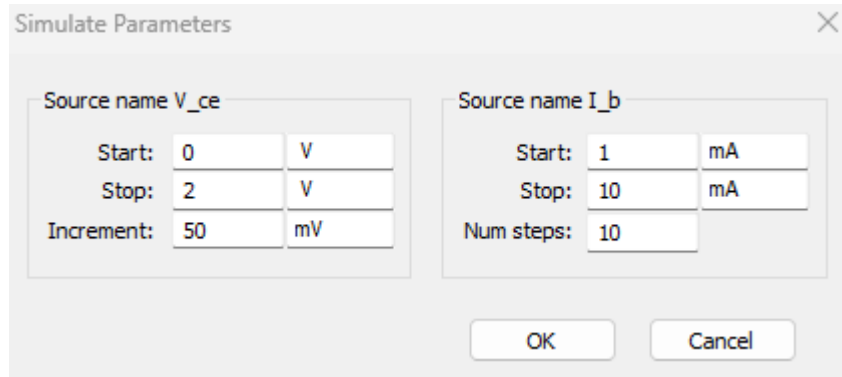


Рисунок 3 – Відкрите вікно Simulate parameters

Перевіряємо правильність підключення транзистора до віртуального приладу і запускаємо симуляцію :

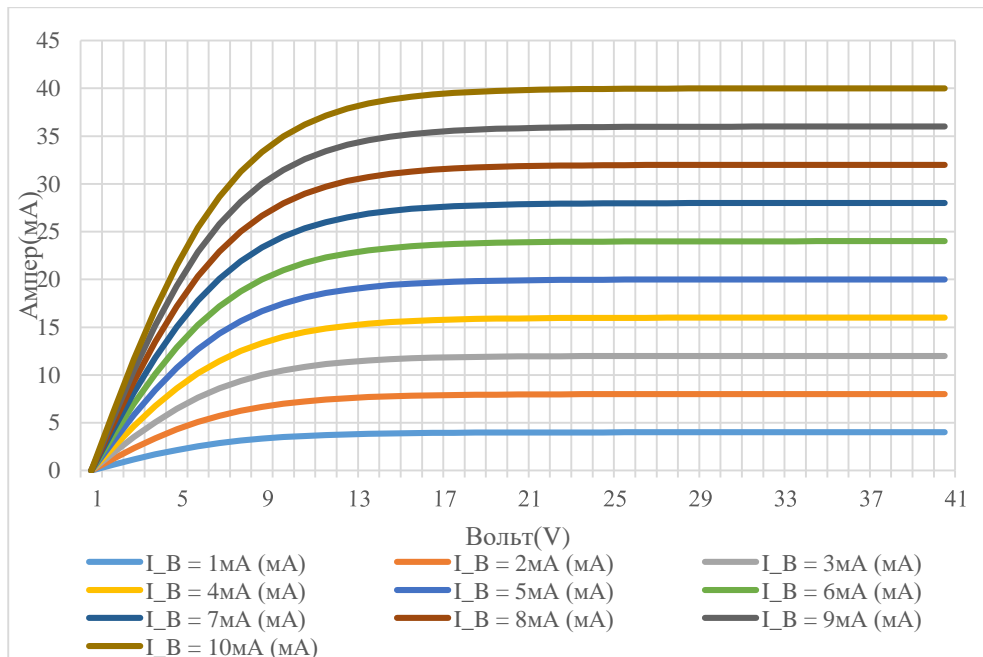


Рисунок 4 – Сімейство кривих ВАХ для БПТ 2N3904

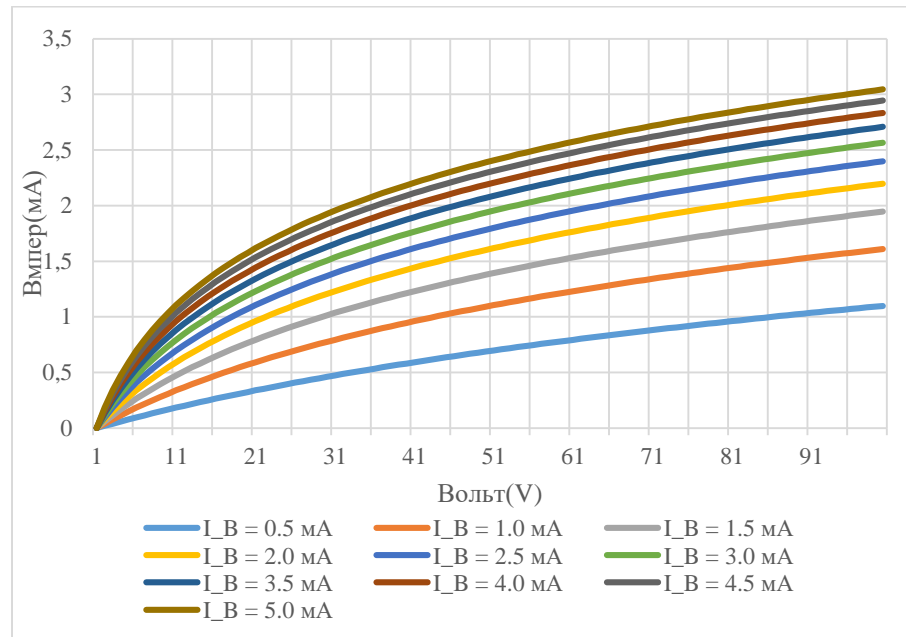


Рисунок 5 – Сімейство кривих ВАХ для БПТ BC547

Для отримання сімейства кривих необхідно задати діапазон для i кількість кроків в цьому діапазоні. На рис. 3 та рис. 4 зображено отримані сімейства кривих ВАХ для БПТ BC547 та 2N3904.

На основі побудованих ВАХ біполярних транзисторів 2N3904 та BC547 можна побачити що обидва транзистори демонструють класичну поведінку з переходом від лінійного режиму до насичення, де колекторний струм стає майже постійним. Ця поведінка підтверджує ефективність їх використання в підсилювальних схемах. При підвищенні базового струму збільшується і колекторний струм, що співпадає з теоретичними очікуваннями.

3. Для отримання температурного коефіцієнту візьмемо вже досліджувані транзистори БПТ 2N3904 та БПТ BC547. Програма для дослідження також NI Multisim. Для їх дослідження була створена схема, підключення якої наведено на рис.7

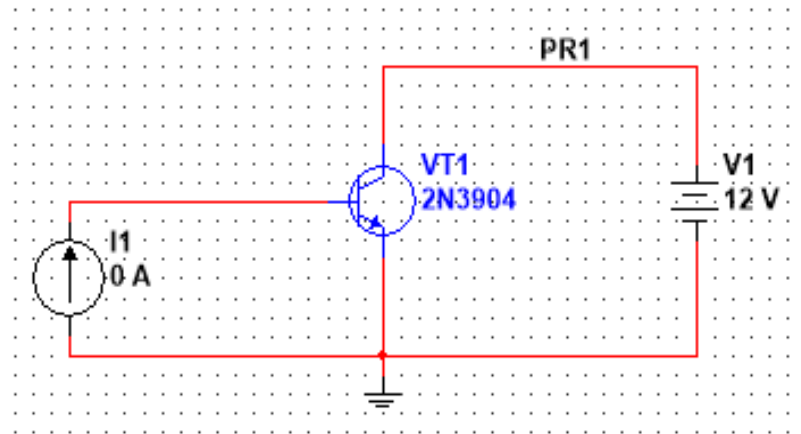


Рисунок 6 – Макет для дослідження біполярних транзисторів

Для отримання ВАХ зі зміною температури БПТ використано режим дослідження схеми "Temperature Sweep" (діапазон робочої температури) у поєднанні з "DC Sweep" (діапазон напруг для одного чи двох джерел постійної напруги)(рис.8). В якості параметра для аналізу обрано I для PR1 на макеті.

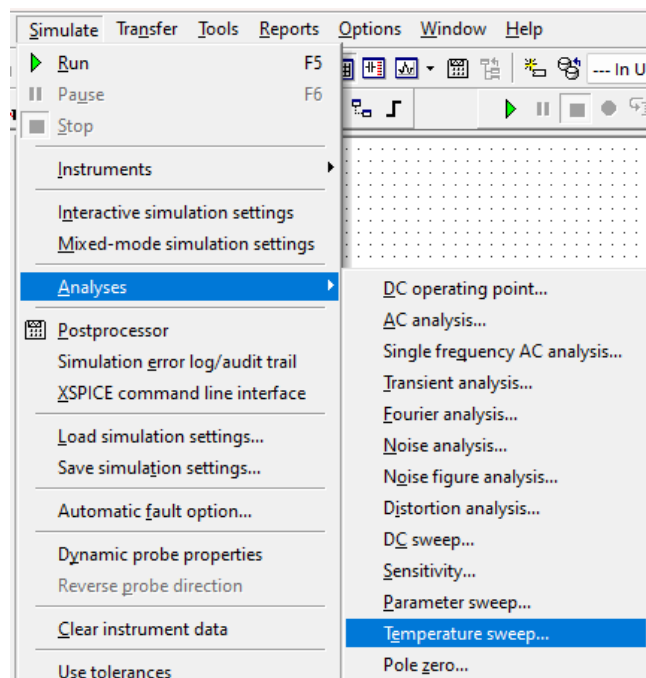


Рисунок 7 – Режим дослідження схеми "Temperature Sweep"

Як наслідок, на графіку будуть представлені криві $I_K = f(U_{KE})$.

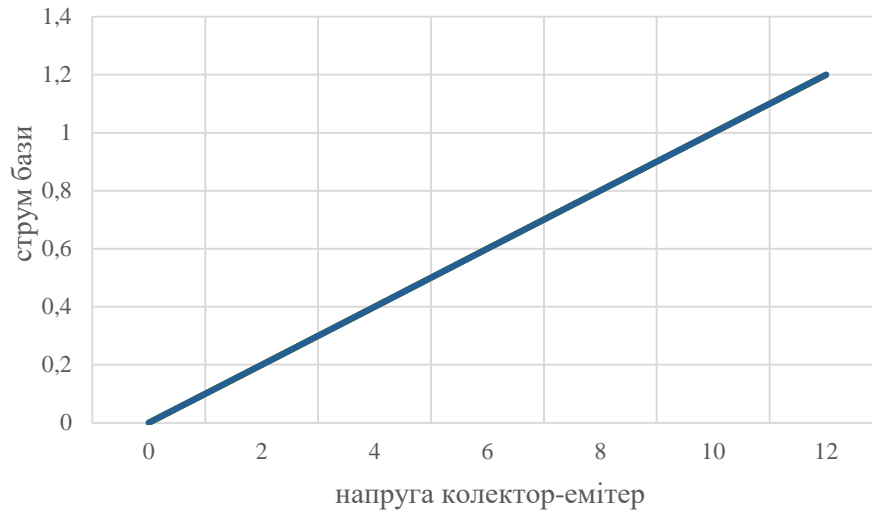


Рисунок 8 – Робочі характеристики транзистора 2N3904

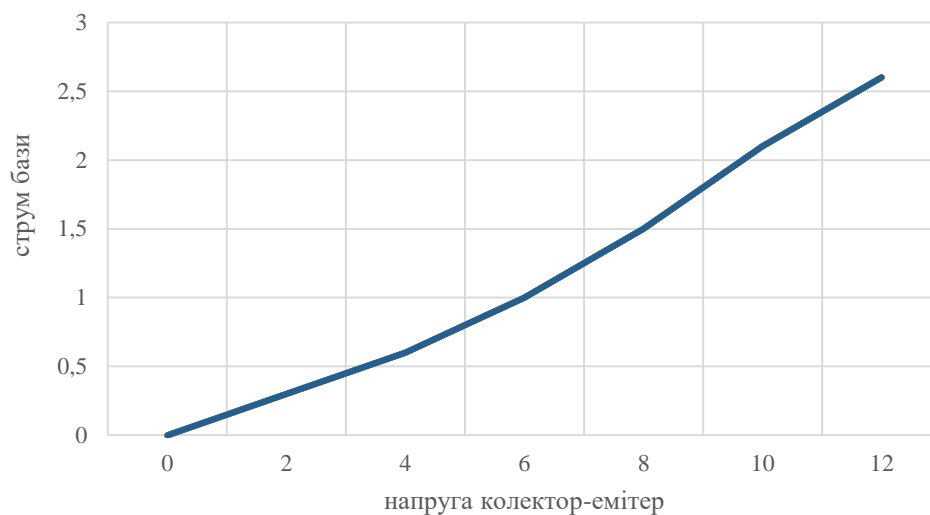


Рисунок 9 – Робочі характеристики транзистора BC547

На рис. 8 і 9 наведені сімейства робочих характеристик високочастотних транзисторів 2N3904 і BC547 різної потужності в діапазоні напруг емітер-колектор. Результати вимірювань показують, що залежність робочих характеристик від температури практично відсутня: при підвищенні температури кут нахилу характеристики змінюється приблизно на 2 градуси.

Проаналізувавши робочі характеристики транзисторів 2N3904 і BC547 при різних температурах можна зробити висновок, що транзистор 2N3904 демонструє лінійну залежність струму бази від напруги колектор-емітер, що

свідчить про його стабільну роботу при зміні температури, а також це відповідає очікуваним результатам і підтверджує його стабільну роботу в широкому діапазоні температур. Інший транзистор, а саме BC547 демонструє нелінійну залежність струму бази від напруги колектор-емітер, що також відповідає очікуваним результатам. Ця нелінійність свідчить про змінну підсилювальну здатність транзистора при різних температурах, що може впливати на його стабільність та ефективність.

Контрольні запитання

1. Який вигляд має функція передатної характеристики транзистора?
2. Як впливає температура на вольт-амперні характеристики транзисторів 2N3904 і BC547?
3. Які висновки можна зробити щодо впливу температури на роботу транзисторів 2N3904 і BC547 на основі проведених експериментів?
4. Який діапазон робочих температур для транзисторів 2N3904 і BC547, і як це впливає на їхнє застосування в електронних схемах?
5. Як змінюються робочі характеристики транзисторів при зміні температури?

Лабораторна робота №2

Температурні дослідження NTC термістора

Мета роботи та зміст роботи: Ознайомитися з температурними характеристиками термістора; дослідити залежність опору термістора від температури; зняти характеристики термістора при різних температурах та проаналізувати їх вплив на роботу термістора

Теоретичні відомості:

NTC термістор (Negative Temperature Coefficient) – це напівпровідниковий елемент, опір якого зменшується зі збільшенням температури. Це відбувається через підвищення числа носіїв заряду при нагріванні, що призводить до зменшення опору.

Температурна залежність опору термістора описується наступною експоненційною функцією:

$$R_T = R_\infty \cdot e^{\frac{W_g}{2kT}} \quad (1.1)$$

де R_T — опір при температурі T , R_∞ — опір при температурі

$T = \infty$, W_g — ширина забороненої зони, k — стала Больцмана.

Термістор NTC NTLE101EC90173 – це термістор з негативним температурним коефіцієнтом, який характеризується зниженням опору зі збільшенням температури. Робочий діапазон температур становить від -40°C до $+125^\circ\text{C}$. Термістор має експоненціальну залежність опору від температури

Порядок виконання роботи:

1. Запустити програму NI Multisim, налаштувати віртуальне середовище для проведення експерименту, та створити схему для дослідження NTC термістора (рис.1).

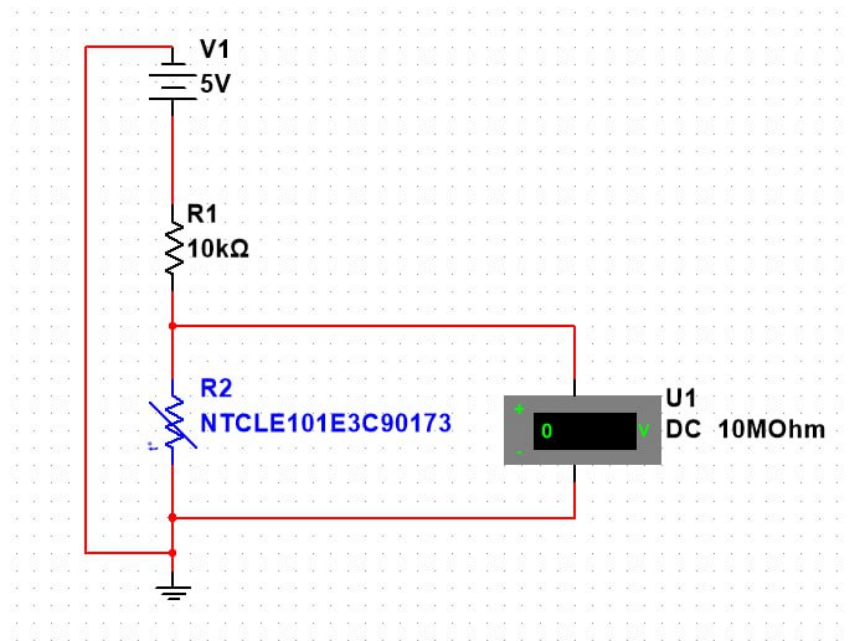


Рисунок 1 – Макет для дослідження NTC термістора

2. Щоб дослідити залежність опору від температури, потрібно змінювати температуру термістора і фіксувати зміну напруги на ньому за допомогою вольтметра. За відомим значенням опору резистора і вимірною напругою можна обчислити опір термістора за наступною формулою:

$$R_2 = \frac{V_{U1}}{(V_1 - V_{U1})/R_1} \quad (1.2)$$

де V_{U1} – виміряна напруга на термісторі, V_1 – напруга джерела живлення, а R_1 – опір резистора.

Чим менше беремо крок, тим точнішою буде отриманий графік. Виконавши заміри та розрахунки за наведеною формулою підставляємо це в таблицю 1, та формуємо графік залежності опору термістора NTC NTLE101EC90173 від температури.

Таблиця 1 – Значення залежності опору термістора від температури

Температура (°C)	Напруга (V2)	Опір (Ω)
0	3,65689	27225
5	3,43814	22010
10	3,20819	17906
15	2,97140	14651
20	2,73241	12047
25	2,49574	9965
30	2,26553	8283
35	2,04524	6920

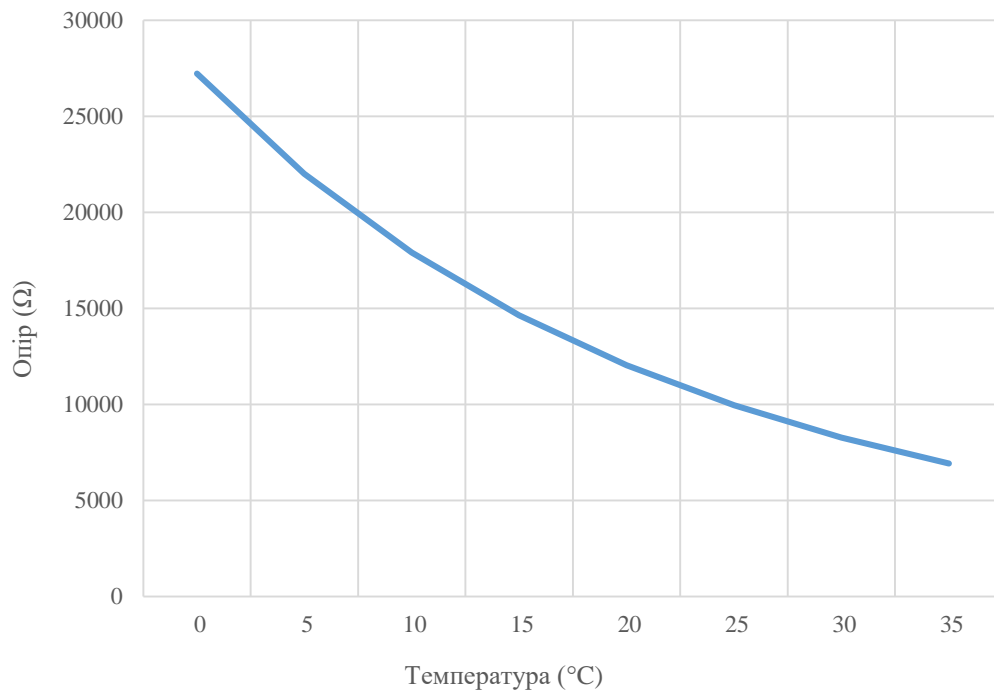


Рисунок 2 – Залежність опору термістора NTC NTLE101EC90173 від температури

З отриманих результатів видно, що опір термістора зменшується зі збільшенням температури, що відповідає характеристиці термісторів типу NTC. Це явище можна пояснити зростанням кількості вільних носіїв заряду в напівпровідниковому матеріалі термістора при підвищенні температури.

На графіку наведено залежність опору термістора NTC від температури в діапазоні від 0°C до 35°C. Результати вимірювань показують чітку тенденцію до зменшення опору з підвищенням температури. При збільшенні температури від 0°C до 35°C опір термістора знижується з 27225 Ω до 6920 Ω , що відповідає характеристиці термісторів NTC, де опір зменшується зі збільшенням температури. Залежність не є лінійною, що свідчить про те, що зміни температури мають складний вплив на матеріал термістора, враховуючи експоненційний характер його температурної залежності.

Термістор NTC є високочутливим до змін температури, що робить його корисним для застосувань, де потрібно точно вимірювати або контролювати температуру. Наприклад, при підвищенні температури на 5°C (від 0°C до 5°C) опір зменшується на 5215 Ω , що свідчить про високу чутливість термістора в цьому діапазоні температур. Отже, проведений експеримент підтвердив очікувані результати і продемонстрував типову поведінку термістора NTC. Отримані дані можуть бути використані для подальших досліджень, де необхідно дослідити температурну залежність опору.

Контрольні запитання

1. Що таке NTC термістор і як він функціонує?
2. Який середній діапазон робочих температур для термістора?
3. Яка формула використовується для розрахунку опору термістора?
4. Як змінюється опір NTC термістора зі збільшенням температури?
5. Чому залежність опору термістора NTC від температури не є лінійною?

Код програмування комплексу для вимірювання температури

```
device_file = '/sys/bus/w1/devices/28-00000xxxxxxx/w1_slave'
```

```
def read_temp():
```

```
    with open(device_file, 'r') as tempfile:
```

```
        thetext = tempfile.read()
```

```
    tempdata = thetext.split("\n")[1].split(" ")[9]
```

```
    temperature = float(tempdata[2:]) / 1000.0
```

```
    return temperature
```

```
while True:
```

```
    temperature = read_temp()
```

```
    print(f" temperature: {temperature:.2f}C")
```

```
    if temperature >= 25.0:
```

```
        print("WARNING! The temperature exceeds 25 C!")
```

```
    time.sleep(1)
```