

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ ЕЛБІ \_\_\_\_\_

(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв \_\_\_\_\_

(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ АКУМУЛЯТОРА

(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи ЕЕПС-21-1

\_\_\_\_\_ Трушин К. О. \_\_\_\_\_

(прізвище, ініціали)

Спеціальність \_\_\_\_\_ 171 Електроніка \_\_\_\_\_

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Електронні пристрої та системи \_\_\_\_\_

(повна назва освітньої програми)

Керівник \_\_\_\_\_ Карнаушенко В.П. \_\_\_\_\_

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_ Бондаренко І. М. \_\_\_\_\_

(прізвище, ініціали)

2025 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет ЕЛБІКафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроївРівень вищої освіти перший (бакалаврський)Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва)

Освітня програма Електронні пристрої та системи

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Трушину Кирилу Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ  
АКУМУЛЯТОРА

затверджена наказом по університету від від 26.05.2025 р. № 415Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії  
\_12\_06\_2025 р.

3. Вихідні дані до роботи напряга живлення 12 В, діапазон робочих температур -20+60 С, діапазон вимірювання -20+100 С., потужність споживання 0,25 Вт.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Аналітичний огляд

2. Створення проекту за допомогою САПР

3. Розробка конструкції

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем:

Схеми: схема електрична структурна, схема електрична принципова;

Кресленики: кресленик загального виду, друкована плата;

Слайди: 16 одиниць

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я,	Позначка консу-	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів роботи	Терміни виконання	Примітка
	Отримання завдання	01.04.2025	
	Огляд інформаційних джерел	06.04–30.05	
	Створення проекту за допомогою	01.05–15.05	
	Розробка конструкції пристрою	16.05–20.05	
	Пояснювальна записка	21.05–05.06	
	Підготовка презентації	05.06–09.05	
	Рецензування, нормоконтроль	7.06–10.06	
	Здача роботи на кафедрі	09.06.2024	

Дата видачі завдання 1 квітня 2025 р.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник роботи ВПК Карнаушенко В.П.

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 38 сторінок, 14 рисунків, 6 додатків, 8 джерел посилань

### СИСТЕМА КОНТРОЛЮ, ПЕРЕГРІВ, РТІ, АКУМУЛЯТОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ТЕМПЕРАТУРНИЙ СЕНСОР

Об'єкт дослідження – система контролю температури акумуляторної батареї транспортного засобу.

Мета роботи – розробка конструкції системи виявлення перегріву акумуляторних комірок з використанням стрічки РТІ та мікроконтролера для фіксації і сигналізації аварійних температурних режимів.

Метод – аналітичний.

Актуальність: з підвищенням вимог до безпеки акумуляторних систем у сучасному транспорті зростає потреба у швидкодіючих і надійних пристроях контролю температури.

## ABSTRACT

Explanatory note 38 contains pages, 14 images, 6 applications, 8 sources of literature.

CONTROL SYSTEM, OVERHEATING, PTI, BATTERY,  
MICROCONTROLLER, TEMPERATURE SENSOR

The object of research is a system for monitoring the temperature of a vehicle battery.

The purpose of the work is to develop the design of a system for detecting overheating of battery cells using PTI tape and a microcontroller for fixing and signalling emergency temperature conditions.

The method is analytical.

Relevance: with the increasing requirements for the safety of battery systems in modern transport, the need for high-speed and reliable temperature control devices is growing.

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	8
1.1 Вплив температури на роботу акумуляторів	8
1.2 Види систем контролю	10
1.3 Типи акумуляторів та їх температурні режими	14
1.4 Існуючі рішення та їх недоліки	15
1.5 Різновиди датчиків температури	18
1.6 Теоретичні основи теплового контролю	19
1.7 Перспективи розвитку інтелектуальних систем управ- ління температурою	21
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ І КОНСТРУКЦІЇ БЛОКУ ВИМІРЮВАННЯ	24
ВИСНОВКИ	37
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	38
ДОДАТКИ	39

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЦП — аналогово-цифровий перетворювач;
- САПР – система автоматизованого проектування;
- BMS —система керування батареєю;
- CAN —шина керування;
- DC-DC — перетворювач постійного струму;
- DTM — розподілений моніторинг температури;
- JTAG — інтерфейс для програмування та налагодження мікроконтролера;
- MCU —мікроконтролерна одиниця;
- NTC —негативний температурний коефіцієнт;
- PCM —фазозмінний матеріал;
- PID —пропорційно-інтегрально-диференційне регулювання;
- PTC —позитивний температурний коефіцієнт;
- PTI — полімерний температурний індикатор;
- RTD —резистивний температурний сенсор.

## ВСТУП

Акумуляторні батареї є важливими джерелами живлення в багатьох пристроях – від мобільної техніки до електротранспорту, систем безперебійного живлення та відновлюваних джерелах енергії. Проте ефективність і безпека їх роботи значною мірою залежать від температурного режиму, в якому вони функціонують.

Підвищена температура може призвести до прискореного зношення, зниження ємності або навіть до загоряння акумулятора, тоді як надмірне охолодження знижує ефективність хімічних процесів, уповільнюючи заряджання та розряджання. Тому необхідність точної та надійної системи контролю температури є особливо актуальною.

Одним з найсерйозніших викликів у роботі акумуляторів є їх перегрів, що може призводити до деградації елементів, втрати ємності, а в гіршому випадку – до теплового розгону, займання або вибуху. Зважаючи на високу енергетичну щільність літій-іонних батарей, проблема температурної стабільності є критичною. Тому на перший план виходить необхідність створення ефективної, швидкодіючої та надійної системи контролю температури, здатної своєчасно реагувати на локальні перегриви на рівні окремих осередків.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Швидкий розвиток електротехнічних і енергетичних технологій, зокрема електротранспорту, автономних джерел живлення та систем зберігання енергії, значно підвищив роль літій-іонних та інших типів акумуляторних батарей у різних сферах промисловості та побуту. Стабільність і надійність їх функціонування безпосередньо залежать від умов експлуатації, зокрема температурного режиму, що є критичним фактором для збереження ефективності та безпеки пристроїв.

Система контролю температури акумулятора необхідна для запобігання критичним ситуацій, як-от тепловий розгін, зменшення ємності, деградація електродів чи втрата герметичності. Забезпечення стабільного теплового стану батареї потребує застосування якісних сенсорів, ефективної логіки керування та сучасної апаратної платформи.

Аналіз сучасного стану досліджень показує, що температура впливає на всі ключові характеристики акумуляторів – енергоємність, ресурс, швидкість заряджання/розряджання, безпеку, питому потужність тощо. У зв'язку з цим все більше наукових публікацій, технічних звітів та промислових стандартів присвячено розробці систем теплового моніторингу, що інтегруються у батарейні блоки, модулі управління акумулятором або окремі пристрої безпеки.

### 1.1 Вплив температури на роботу акумуляторів

Під час заряджання та розряджання акумулятори виділяють тепло внаслідок електрохімічних реакцій та опору. Надмірне нагрівання може спричинити деградацію електродів, випаровування електроліту, зниження ємності, а в екстремальних випадках – тепловий розгін, що призводить до займання або вибуху.

Крім перегріву, небезпечним є також надмірне охолодження. При низьких температурах сповільнюються хімічні реакції в комірках акумулятора,

що знижує його ефективність, погіршує здатність до заряджання і збільшує внутрішній опір. Це особливо критично в електромобілях і пристроях, що експлуатуються в умовах холодного клімату.

Існує низка проблем, пов'язаних з температурним контролем акумуляторів. Однією з основних є нерівномірність температурного поля всередині акумуляторного блоку, що ускладнює забезпечення однакового теплового режиму для всіх елементів. Охолоджувальні або нагрівальні системи мають певну інертність і не завжди здатні оперативно реагувати на швидкі зміни температури. У багатьох випадках використовуються недосконалі або застарілі сенсори, що мають недостатню точність та повільну реакцію.

Надмірне підвищення або зниження температури істотно впливає на хімічну стабільність та електричні характеристики акумулятора. Перегрів призводить до деградації електродів, виділення газів і, у критичних випадках, до теплового розгону. Натомість при переохолодженні виникає осадження літію на аноді, що спричиняє зростання внутрішнього опору і втрату ємності (рис. 1.1).

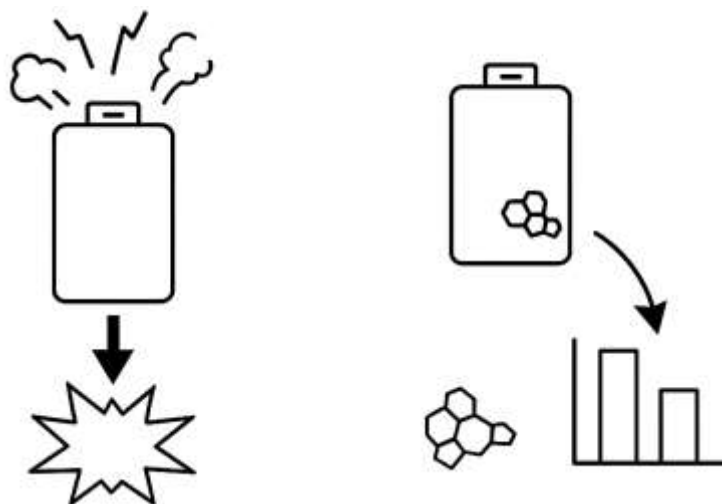


Рисунок 1.1 – Наслідки перегріву та переохолодження акумулятора

Відсутність адаптивних алгоритмів керування, які могли б у режимі реального часу змінювати параметри охолодження або обігріву, також усклад-

нює ситуацію. Крім того, інтеграція температурного контролю з іншими модулями керування системи часто є проблемною, особливо в умовах обмеженого простору або високої щільності електронних компонентів.

Таким чином, актуальність проблеми полягає не лише у фізичних обмеженнях самих акумуляторів, а й у недосконалості існуючих систем моніторингу та регулювання температури. Це створює передумови для розробки нових рішень, здатних забезпечити безпечну та ефективну експлуатацію акумуляторних систем у широкому діапазоні умов.

## 1.2 Види систем контролю

Системи контролю температури відіграють ключову роль у забезпеченні безпечної та ефективної роботи акумуляторних батарей. Вони класифікуються за типом регулювання, рівнем автоматизації та точністю реакції на зміни температури.

Температурні контролери поділяються на вісім класів залежно від складності та енергоефективності. До найпростіших належать кімнатні термостати з функцією вмикання та вимикання нагрівальних елементів, тоді як більш високі класи передбачають використання багатосенсорних систем та алгоритмів керування [1]. Така класифікація особливо актуальна для побутових та комерційних систем опалення, однак загальні принципи залишаються релевантними й для систем теплового контролю в акумуляторах.

З точки зору принципу дії, найбільш поширеними є контролери які реагують на досягнення заданої температури шляхом ввімкнення або вимкнення елементів охолодження. Вони є достатніми для простих застосувань, де не потрібна висока точність. У більш складних системах застосовуються пропорційні або PID-регулятори, які здатні забезпечити плавне, адаптивне управління температурою на основі аналізу відхилення від заданого значення, інтегралу і швидкості його зміни [2].

На основі вищезазначених підходів, системи контролю температури акумуляторів умовно поділяються на три основні типи: пасивні, активні та інтелектуальні. Пасивні системи використовують природну конвекцію без застосування додаткових механізмів охолодження. Активні — базуються на використанні вентиляторів або рідинного охолодження. Інтелектуальні системи реалізують складні алгоритми на основі цифрових датчиків і мікроконтролерів, таких як DTM, PTI чи BMS з інтеграцією у CAN-шину (рис 1.2).



Рисунок 1.2 – Класифікація систем контролю температури

Температура є одним із найважливіших параметрів, що впливають на надійність, безпеку та довговічність літій-іонних акумуляторів. Відхилення від оптимального теплового режиму, як у сторону перегріву, так і у бік переохолодження, негативно впливають на роботу батареї та можуть спричинити серйозні аварійні ситуації. Згідно з численними дослідженнями, критичні температурні умови можуть спричинити деградацію матеріалів, зниження ємності, а також небезпечні фізико-хімічні процеси, які ведуть до теплового розгону, займання або вибуху акумулятора.

Одним із найбільш небезпечних явищ, пов'язаних із високими температурами, є термічний розгін. Це стан, при якому внутрішнє тепло, що виділяється в результаті хімічних реакцій, не встигає ефективно відводитись з середини батареї. Унаслідок цього температура продовжує зростати, що каталізує нові реакції, які, своєю чергою, генерують ще більше тепла. Цей процес має експоненціальний характер і в кінцевому підсумку призводить до руйнування осередку та викиду небезпечних газів, а іноді й до займання або вибуху батареї.

З погляду електрохімічної стабільності, перегрів негативно впливає на електроліт, особливо в органічних системах. При температурах понад 60–70 °C починається термічне розкладання електроліту з утворенням летючих сполук, які можуть сприяти виникненню горючих сумішей. Додатково, висока температура сприяє швидкій деградації анода що призводить до втрати ємності та зростання внутрішнього опору [3].

Особливо небезпечні такі умови у транспортних застосуваннях (електромобілі, дрони), де висока щільність енергії акумуляторів у поєднанні з механічними навантаженнями створює серйозну загрозу безпеці. Реєструвались випадки, коли термічний розгін в одному осередку спричиняв лавиноподібну реакцію в усьому блоці, що вело до повного знищення пристрою.

Попри те, що перегрів вважається критичною загрозою, не менш небезпечним є й надмірне охолодження акумуляторів. Зниження температури істотно впливає на електрохімічні властивості акумулятора. При температурах нижче 0 °C вуглецевий анод втрачає здатність до ефективного зберігання іонів літію, що призводить до процесу, відомого як літієве осадження. Це явище супроводжується відкладенням металевого літію на аноді, який не бере участі у зворотній реакції заряджання та може викликати внутрішні короткі замикання, пробій сепаратора або руйнування осередку [4].

Крім того, охолодження призводить до значного збільшення внутрішнього опору акумулятора. Це знижує енергетичну ефективність системи, а також спричиняє небажане теплове навантаження при швидкому заряджанні

в холодних умовах. У деяких випадках холодне середовище змінює в'язкість електроліту, що ще більше ускладнює дифузію літієвих іонів та впливає на швидкість електрохімічних реакцій. Навіть короткочасне охолодження акумулятора до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до зниження ефективної ємності на 30–40 %, а при тривалому впливі температури нижче  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  відбувається необоротне зниження потужності. При багаторазовому циклі «охолодження–нагрів» утворюється мікроструктурна деградація електродів, що скорочує термін служби батареї.

Значні температурні коливання - постійне чергування перегріву й охолодження — мають ще гірший вплив, ніж постійне перебування у несприятливих умовах. Такі цикли пришвидшують старіння матеріалів, розтріскування структури катодів і анодів, порушення електролітних властивостей та розшарування активних речовин. Багаторазові цикли термічного навантаження можуть спричинити поступове накопичення дефектів, що стає причиною «повільного зношування» батареї.

Теплові деформації впливають також на механічні елементи осередку, викликаючи зсуви шарів, напругу у з'єднаннях та порушення геометрії. Збільшення тиску всередині осередку при циклічному перегріві, що фіксується в умовах інтенсивного використання (наприклад, у гібридних авто), може спричинити витік електроліту або розгерметизацію.

В умовах інтенсивної експлуатації, наприклад у промислових системах зберігання енергії або мобільній техніці, неврахування температурних ризиків може призвести до передчасного виходу з ладу акумуляторної системи, є потреба в впровадженні активних систем теплового моніторингу, які мають реагувати в реальному часі на будь-які зміни температури. Автори вказують, що навіть  $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$  перевищення граничної температури експлуатації може скоротити життєвий цикл батареї вдвічі [3].

Таким чином, як перегрів, так і охолодження акумуляторів мають суттєві наслідки — від зниження ефективності до аварійних станів. Саме тому система температурного контролю повинна бути інтегральною частиною

будь-якої енергетичної платформи, що використовує акумуляторні джерела живлення. Контроль температури є ключовим чинником безпечного, стабільного та довготривалого функціонування батарейної системи.

### 1.3 Типи акумуляторів та їх температурні режими

Акумулятори різних типів мають різні температурні режими, що важливо враховувати при їхньому використанні. Теплове управління є критичним для продовження терміну служби батарей і забезпечення їхньої безпеки. Розглянемо найбільш поширені типи акумуляторів.

Літій-іонні акумулятори є найбільш широко використовуваними в сучасних пристроях, таких як смартфони, електромобілі, а також у відновлювальних енергетичних системах. Для них оптимальний температурний діапазон становить від  $15^{\circ}\text{C}$  до  $35^{\circ}\text{C}$ . Високі температури понад  $60^{\circ}\text{C}$  можуть призвести до небезпечних ситуацій, таких як термічний розгін, що може викликати вибух або пожежу [1]. Занадто низькі температури (нижче  $0^{\circ}\text{C}$ ) обмежують здатність акумулятора заряджатися, а також знижують його ємність.

Свинцево-кислотні акумулятори традиційно використовуються в автомобілях, джерелах безперебійного живлення та на резервних енергетичних системах. Його оптимальна температура роботи коливається між  $20$  та  $25^{\circ}\text{C}$ . Перегрів, особливо в умовах заряджання при високих температурах, може призвести до зниження ємності і скорочення терміну служби акумулятора. Температури вище  $40^{\circ}\text{C}$  або нижче  $0^{\circ}\text{C}$  можуть призвести до проблем з заряджанням та ефективністю роботи [4].

Нікель-метал-гідридні акумулятори є альтернативою свинцево-кислотним та літій-іонним акумуляторам. Вони використовуються у великій кількості побутових пристроїв. Їхня робоча температура знаходиться в діапазоні від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ , що робить їх досить стійкими до зовнішніх умов. Однак, як і в інших типах, підвищена температура може скорочувати термін

служби акумулятора, тому необхідно забезпечувати належне охолодження [5].

Літій-залізо-фосфатні акумулятори використовуються в енергетичних системах та електромобілях завдяки своїй високій стабільності. Вони мають вищу термостійкість, що дозволяє їм працювати в більш широкому діапазоні температур — від  $-20$  до  $+60$  °C. Це робить їх ідеальним вибором для критичних застосувань, де необхідно уникати ризиків перегріву та термічного розгону (табл 1.1).

Таблиця 1.1 – Типи акумуляторів та їх діапазони

Тип акумулятора	Оптимальний температурний діапазон	Граничні температури експлуатації
Свинцево-кислотний	20–25 °C	-20 °C до +50 °C
Літій-іонний	15–35 °C	-20 °C до +60 °C
Нікель-метал-гідридний	20–30 °C	-10 °C до +45 °C
Літій-залізо-фосфатний	20–40 °C	-20 °C до +60 °C

#### 1.4 Існуючі рішення та їх недоліки

Контроль температури акумуляторів є ключовим елементом у забезпеченні безпечної та ефективної експлуатації енергетичних систем, зокрема у транспорті, зберіганні енергії та мобільній електроніці. У зв'язку з постійним зростанням попиту на літій-іонні батареї, постає необхідність у вдосконаленні систем температурного моніторингу та охолодження. На сьогоднішній день існує кілька типових підходів до контролю температури акумуляторів, кожен із яких має як переваги, так і низку суттєвих недоліків.

Одним із найпоширеніших рішень є пасивне охолодження, яке ґрунтується на природній конвекції повітря та тепловіддачі через корпус акумулятора. Такі системи не потребують додаткової енергії та прості у реалізації, що робить їх популярними в побутовій техніці та простих пристроях. Водно-

час пасивне охолодження має низьку ефективність, особливо у випадках інтенсивного навантаження або підвищеної температури навколишнього середовища.

Активне повітряне охолодження включає використання вентиляторів для примусового обдування акумуляторного блоку. Це дозволяє значно підвищити ефективність тепловідведення, проте потребує додаткового енергоспоживання, що може негативно впливати на загальну енергоефективність пристрою. Крім того, збільшується кількість механічних компонентів, що ускладнює обслуговування і знижує надійність.

Ще ефективнішим методом є рідинне охолодження, де теплоносії циркулює у спеціальних каналах або трубках, встановлених поруч з осередками батареї. Цей метод забезпечує високу швидкість тепловідведення та рівномірність охолодження (рис. 1.3).

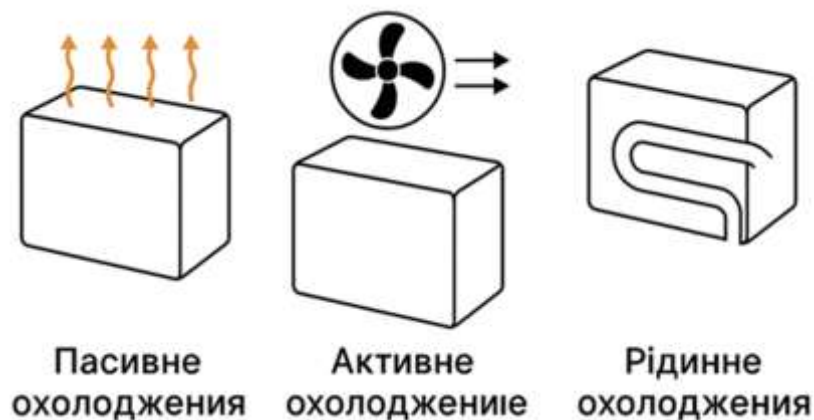


Рисунок 1.3 – Основні типи систем охолодження акумуляторів

Все більшої популярності набувають інтелектуальні системи моніторингу температури, які інтегрують датчики температури, мікроконтролери та алгоритми управління. Такі системи не лише здійснюють моніторинг температури у режимі реального часу, але й можуть автоматично реагувати на перегрів: активувати систему охолодження, обмежувати заряд/розряд, надсилати тривожні повідомлення. Хоча такі рішення є найбільш точними та функці-

ональними, вони вимагають складного програмного забезпечення, енергії для обчислень та значних початкових вкладень у розробку.

Наукові дослідження показують, що недостатньо ефективна система контролю температури є головною причиною термічного розгону, що може призвести до займання або вибуху батареї. При досягненні температури понад  $150^{\circ}\text{C}$  всередині акумулятора, починаються незворотні хімічні реакції, які важко контролювати. Через це особливої актуальності набуває розробка адаптивних та автономних систем температурного контролю, здатних швидко реагувати на зміну умов експлуатації.

### 1.5 Різновиди датчиків температури

Довгострокова безпека та надійність базується на основі комплексного спостереження: моніторинг втоми, загальний моніторинг, моніторинг після капітального ремонту, контроль спеціального призначення

Температурні датчики є ключовими компонентами систем контролю температури акумуляторів. Вони забезпечують точне та оперативне вимірювання температурного режиму батареї, що дозволяє своєчасно вживати заходів для запобігання перегріву або переохолодження. У сучасних системах використовуються три основні типи температурних сенсорів: термістори (NTC/PTC), термопари та RTD [8].

Термістори є резисторами з температурною залежністю опору. Існують два основних типи: NTC – опір зменшується зі зростанням температури, та PTC – опір збільшується при нагріванні (рис. 1.4).

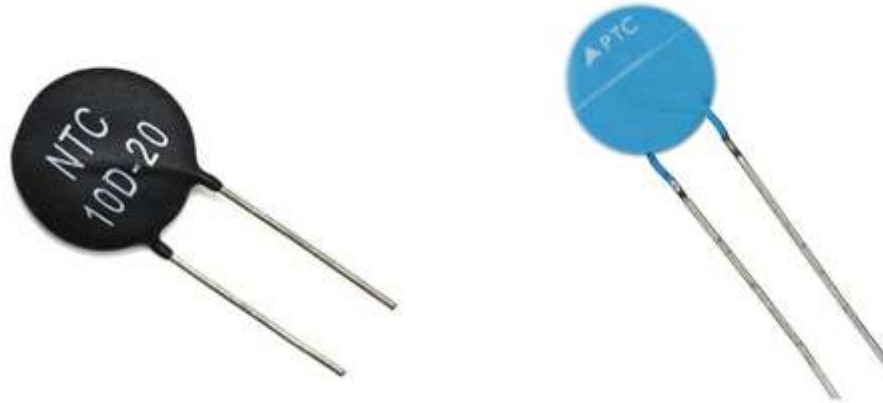


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд термісторів NTC та PTC типу

Переваги термісторів полягають у їхній компактності та низькій вартості, що робить їх привабливими для масового виробництва. Вони мають високу чутливість у вузькому діапазоні температур, що дозволяє точно відстежувати зміни температури в межах цього діапазону. Крім того, термістори легко інтегруються з мікроконтролерами через подільник напруги, що спрощує їх використання в електронних схемах.

Однак термістори мають і певні недоліки. Їх характеристика опору є нелінійною, що ускладнює точне вимірювання температури на широкому діапазоні. Також вони мають обмежену точність при широкому температурному діапазоні та високу залежність від точності калібрування.

Термопари — це сенсори, які працюють на основі термоелектричного ефекту, що виникає при з'єднанні двох провідників з різними термоелектричними властивостями. Різниця потенціалів між холодним та гарячим спаями дає змогу виміряти температуру. Термопари широко використовуються в промислових умовах, де потрібні високі температурні діапазони.

Перевагами термопар є їхній широкий діапазон вимірювань (від  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+1300^{\circ}\text{C}$ ), механічна міцність і надійність, а також стійкість до агресивних середовищ. Вони є економічно ефективними та простими у використанні, що робить їх популярними в багатьох галузях промисловості.

Проте термопари мають і недоліки. Вони мають нижчу чутливість у порівнянні з іншими сенсорами, потребують компенсації холодного спаю та мають складнішу схему обробки сигналу.

RTD-сенсори працюють на принципі зміни електричного опору металу залежно від температури. Перевагами є висока точність і стабільність, лінійна залежність температури від опору та тривалий термін служби. Вони мають майже лінійну залежність опору від температури, що спрощує обробку сигналу. Платина є дуже стабільним матеріалом, що забезпечує тривалу точність вимірювань. Недоліками є їхня вища вартість порівняно з термісторами, необхідність прецизійних джерел струму або мостових схем, а також чутливість до механічних пошкоджень [9].

## 1.6 Теоретичні основи теплового контролю

У процесі роботи акумулятора відбуваються хімічні реакції, які супроводжуються виділенням тепла. У результаті температура осередків підвищується, і надлишкове тепло повинно бути ефективно відведене, аби уникнути перегріву та теплового розгону. Тепло передається через матеріали корпусу акумулятора до навколишнього середовища, а також між сусідніми осередками батареї. Ефективність цього процесу залежить від теплопровідності матеріалів, щільності компонування елементів, а також умов охолодження (рис 1.5).

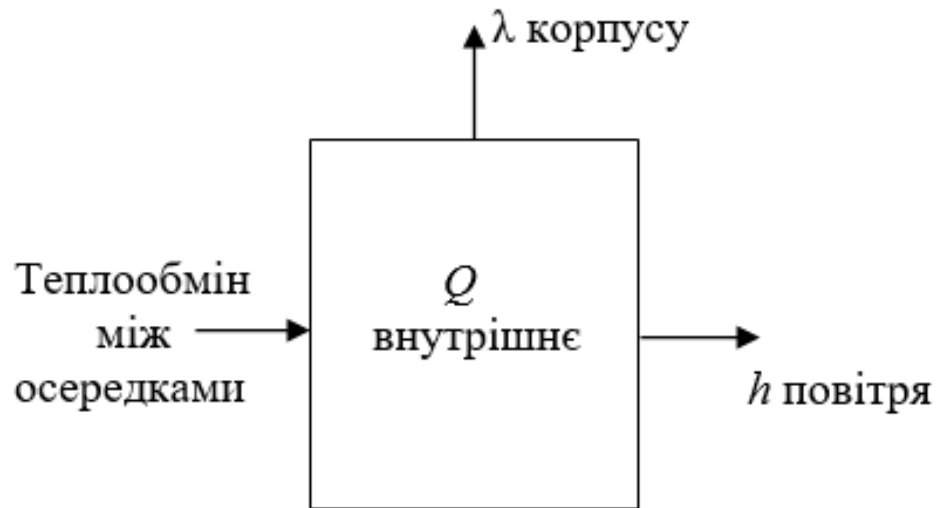


Рисунок 1.5 – Механізми теплообміну в акумуляторі

Тепловий контроль є фундаментальним підходом до моніторингу стану акумуляторів, особливо в умовах інтенсивної експлуатації або впливу зовнішніх температурних факторів. Основою цього методу є використання законів термодинаміки, зокрема теплообміну, теплопровідності, а також явищ акумуляції теплової енергії в електрохімічних системах. У разі зберігання або використання батарей у режимах, що перевищують оптимальні температурні межі, спостерігається зниження ефективності, пришвидшене старіння або навіть виникнення небезпечних ситуацій, таких як тепловий розгін [3].

Теплові процеси в акумуляторах регулюються низкою фізичних параметрів: тепловою провідністю матеріалів корпусу та електродів, питомою теплоємністю електроліту, наявністю охолоджувальних елементів, а також швидкістю реакцій, що відбуваються всередині комірок під час заряду та розряду. Як підтверджують результати численних досліджень [5], в умовах надмірного нагріву внутрішній тиск у комірці підвищується, що може призвести до розгерметизації або навіть вибуху. Тому використання температурного моніторингу в поєднанні з системами активного тепловідведення вважається критично важливим для забезпечення безпечної роботи акумуляторів.

Тепловий контроль у сучасних системах керування зазвичай реалізується шляхом розміщення температурних датчиків у ключових точках акумуляторного блоку. Ці датчики можуть бути контактними (наприклад, термістори, RTD) або безконтактними (пірометри, інфрачервоні сенсори). Одержані значення температури обробляються за допомогою мікроконтролерів, які виконують логічний аналіз і приймають рішення щодо активації охолоджувальних вентиляторів, подачі сигналу тривоги або вимкнення живлення. При цьому ключовим моментом є правильна інтерпретація температурних коливань, адже навіть незначне перевищення критичних значень протягом тривалого часу здатне спричинити незворотні процеси деградації елементів батареї [4].

Сьогодні розглядаються новітні підходи до активного теплового контролю, які включають використання фазозмінних матеріалів, рідинного охолодження, а також інтелектуальних систем регулювання. Такий підхід дозволяє забезпечити більш точне регулювання температури у режимі реального часу. Водночас ефективність теплового контролю значною мірою залежить від моделі розподілу температурного поля в батареї, що потребує точного математичного моделювання, яке враховує як внутрішні, так і зовнішні джерела тепла [8].

Сучасні технології створення акумуляторів усе частіше включають вбудовані термодатчики та програмні алгоритми регулювання теплового навантаження. Крім того, одним із перспективних напрямів є використання систем машинного навчання для передбачення температурних піків та запобігання тепловим ризикам.

## 1.7 Перспективи розвитку інтелектуальних систем управління температурою

Системи температурного контролю акумуляторів є критичним елементом у забезпеченні безпечної та ефективної експлуатації енергетичних уста-

новок, особливо в електромобілях, сонячних електростанціях та системах накопичення енергії. З огляду на стрімкий розвиток технологій та зростання вимог до ефективності, інтелектуальні BMS стають ключовим напрямом досліджень та впроваджень. До прикладів простих традиційних засобів температурного захисту належать і біметалеві термостати, які фізично розривають коло при досягненні заданої температури (рис 1.6).



Рисунок 1.6 – Біметалевий термостат для температурного контролю

Одним із найперспективніших напрямів є інтеграція методів машинного навчання для прогнозування термічного стану батарей. Такі алгоритми здатні виявляти відхилення в температурному режимі ще до настання критичної точки, що дозволяє уникати перегріву чи переохолодження [1]. Алгоритми прогнозування ґрунтуються на обробці великої кількості даних - з сенсорів, історії роботи акумуляторів, змін навантаження тощо.

Наприклад, згідно з дослідженням [1], використання неймереж для передбачення температурного профілю батареї в електромобілі дозволяє зни-

зити частоту спрацьовування аварійної сигналізації до 65%, оскільки система адаптується до реального режиму роботи в динаміці.

Інтелектуальні BMS нового покоління передбачають використання розподілених сенсорних систем - десятків температурних датчиків, розміщених на поверхні та в осередках акумуляторного модуля. Це дає змогу будувати точні температурні карти та виявляти локальні перегріву, які не фіксуються централізованим контролером [3]. Сучасні сенсори часто оснащені мікроконтролерами для попередньої обробки даних, що зменшує навантаження на головну систему.

Інтеграція системи забезпечує передачу даних у хмару, де відбувається подальша аналітика й контроль. Це особливо важливо для великих акумуляторних установок, наприклад у сонячній енергетиці, де температурний контроль здійснюється віддалено [7]. Подібна інфраструктура дозволяє операторам моніторити стан системи в реальному часі, отримувати попередження про аномалії, а також віддалено регулювати режими охолодження.

Інтелектуальні системи охолодження все частіше використовують фазозмінні матеріали, які пасивно стабілізують температуру під час критичних навантажень. Використання графенових композитів або мікрокапсульованих РСМ може знизити пік нагріву на 12–17% у порівнянні з традиційними методами охолодження.

Крім того, реалізуються адаптивні механізми керування вентилятором або рідинною системою охолодження, які змінюють потужність у відповідь на локальні температурні дані.

Цифровий двійник акумуляторної системи - це програмна модель, що постійно оновлюється в реальному часі на основі даних з сенсорів. Така модель дозволяє не лише контролювати температуру, але й симулювати вплив майбутніх режимів роботи. Це відкриває нові можливості для попереджувального технічного обслуговування та оптимізації теплового режиму на основі віртуального тестування [7].

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ АКУМУЛЯТОРА

Зі зростанням популярності електромобілів питання ефективного керування їх енергетичними системами набуває особливої актуальності. Акумуляторна батарея є одним із найважливіших і водночас найчутливіших компонентів електромобіля. Вона визначає не лише дальність пробігу та потужність, а й безпеку, довговічність, стійкість до зовнішніх умов. У зв'язку з цим однією з ключових задач стає розробка надійної, чутливої й швидкодіючої системи контролю температури елементів батарейного блоку.

Літій-іонні акумулятори, що використовуються у сучасних електромобілях, мають високу щільність енергії, але разом з тим схильні до явища теплового розгону. Це явище виникає при надмірному нагріванні одного або декількох осередків батареї, яке спричиняє хімічну дестабілізацію елемента, виділення тепла та, у гіршому випадку, займання чи вибух. Подібні інциденти вже неодноразово траплялися, що свідчить про критичну важливість контролю температурних режимів кожної окремої акумуляторної комірки.

Традиційні підходи до температурного моніторингу акумуляторів зазвичай базуються на використанні точкових сенсорів - термісторів, термопар або RTD-елементів. Однак ці засоби мають низку суттєвих обмежень:

- фізично неможливо розмістити термістор на кожному елементі батареї через обмеження простору та складність монтажу;
- сенсори потребують складного електричного підключення, що ускладнює інтеграцію в систему електромобіля;
- відносно повільна реакція на зміну температури, особливо при раптовому тепловому навантаженні.

Таким чином, треба розробити сучасну систему контролю температури в акумуляторних батареях електромобіля, яка відповідала б наступним вимогам:

- забезпечення локального моніторингу кожного осередку батарейного блоку;
- реалізація надшвидкого реагування на зміну температури (менше 1 секунди);
- мінімізація обсягу підключень та електропроводки для зниження складності системи;
- підтримка інтеграції в загальну архітектуру системи керування батареєю;
- висока надійність і стійкість до умов експлуатації (вібрації, волога, пил, перепади температур);
- можливість подальшого масштабування, модифікації та адаптації до інших типів електротранспорту;

У відповідь на ці вимоги, розробка ґрунтуватиметься на технології розподіленого моніторингу температури з використанням полімерних температурних індикаторів. Ця технологія має значний потенціал для промислового застосування, що підтверджено даними реальних випробувань.

У межах проектування системи контролю температури акумуляторних батарей електромобіля першочерговим кроком є обґрунтований вибір технології вимірювання температури. Ключовим критерієм є необхідність постійного й точного відстеження температурного стану кожної окремої осередкової комірки в режимі реального часу. Існуючі традиційні рішення демонструють значні обмеження при спробі реалізувати високоточний розподілений моніторинг на всій площі батарейного модуля.

До найбільш поширених технологій належать:

- терморезистори (NTC, PTC);
- термопари;
- резистивні датчики температури (RTD);
- інфрачервоні сенсори;
- мікроконтролери з цифровими датчиками.

Кожен із зазначених підходів має власні переваги й недоліки, але для акумуляторних батарей критичним є не стільки точність вимірювання абсолютного значення температури, скільки швидкість виявлення локального перегріву. Більшість традиційних сенсорів або не здатні швидко реагувати, або фізично не можуть бути встановлені на кожному осередку через просторові чи монтажні обмеження. Наприклад, навіть невеликий літєвий модуль може складатися з понад 100 осередків, і повне покриття термісторами або термопарами потребувало б сотень метрів дротів, десятків аналогових входів і складного програмного забезпечення.

Для моніторингу температури акумуляторних елементів обрано сенсорну стрічку з друкованими термоіндикаторами, яка є частиною системи DTM. Завдяки гнучкості та товщині менше одного міліметра стрічка легко монтується на поверхню акумуляторних елементів (рис. 2.1).

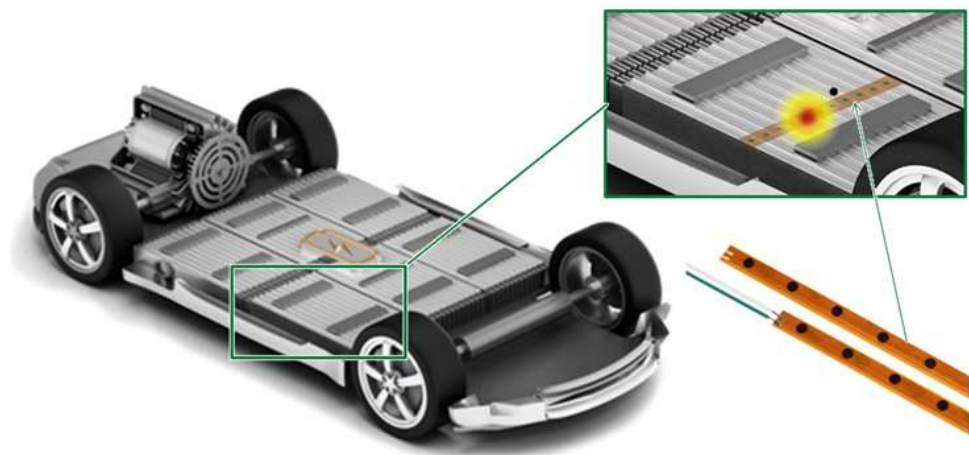


Рисунок 2.1 – Розташування стрічки РТІ на акумуляторних комірках

Цей тип сенсора забезпечує високу просторову роздільну здатність і дозволяє виявляти локальні перегріву безпосередньо на кожній комірці батареї. РТІ представляє собою полімерний елемент з позитивним температурним коефіцієнтом, який різко змінює опір при досягненні порогової температури. Стандартна температура спрацювання становить  $58 \pm 3$  °С, після чого опір

зростає майже на п'ять порядків. Така властивість дозволяє швидко і надійно ідентифікувати перегріті елементи. Ця технологія має низку переваг:

- фізична гнучкість: стрічка легко повторює форму батарейного модуля, охоплюючи всі осередки;
- простота підключення: вся система вимагає лише двох дротів для підключення до логічної схеми чи мікроконтролера;
- локальний контроль: кожен індикатор реагує індивідуально на свою комірку;
- висока швидкодія: час реакції менше 1 секунди, що на порядок швидше за термістори;
- надійність: полімерні температурні індикатори не потребують калібрування, не мають активних електронних елементів, мають низьку чутливість до електромагнітних завад;

Для оцінки доцільності використання полімерних температурних індикаторів можна порівняти їх з традиційними терморезисторами NTC. Це дозволяє обґрунтувати вибір РТІ-елементів саме для задачі виявлення локального перегріву в акумуляторному модулі (табл. 2.1).

Живлення системи здійснюється від бортової мережі автомобіля. Напруга подається одночасно на стабілізатор та на джерело стабільного струму яке живить РТІ-стрічки. Для цього використовується LT3092, яка є інтегрованим джерелом постійного струму з високою стабільністю.

Ця мікросхема має низький рівень шуму, високу стабільність струму при зміні температури та проста в реалізації завдяки мінімальній кількості зовнішніх компонентів. Це робить її надійним вибором для використання у транспортних системах з підвищеними вимогами. Альтернативні рішення на дискретних компонентах або простіші мікросхеми не забезпечують такої стабільності та компактності в умовах автомобільної експлуатації (рис.2.2).

Таблиця 2.1 – Порівняння основних характеристик температурних сенсорів РТІ та NTC

Параметр	РТІ	NTC
Тип сигналу	Дискретний, пороговий	Аналоговий
Реакція на перегрів	Різкий стрибок опору	Плавне зменшення опору
Час реакції	<1 с	3-10 с
Точність визначення перегріву	Висока для фіксованого порогу	Висока в широкому діапазоні
Простота відключення	Висока (1 резистор)	Потребує АЦП або порнової системи

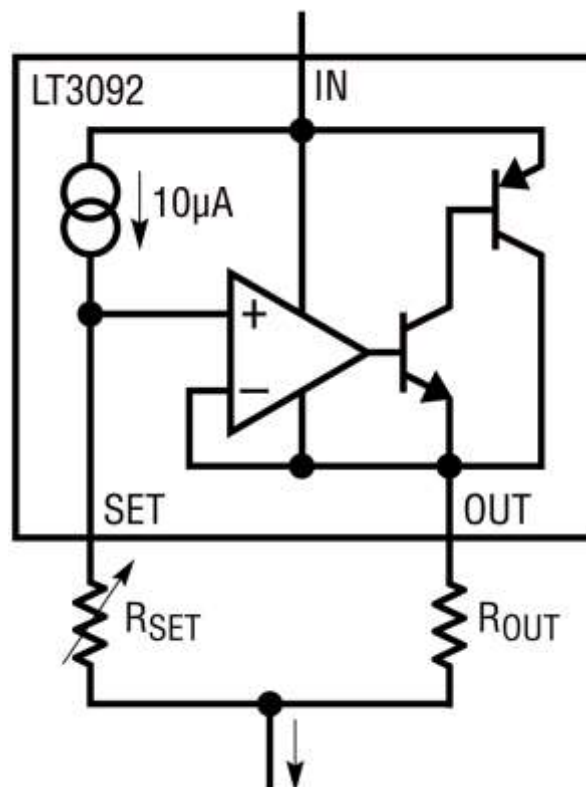


Рисунок 2.2 – Внутрішня структурна схема LT3092

У даній системі використовується мікроконтролер автомобільного класу NXP S32K144, призначений для застосування у складних транспортних умовах. Він виконує ключову логічну функцію — приймає аналоговий сиг-

нал зі стрічок, порівнює його з опорною напругою та приймає рішення про подальші дії.

Сигнал з РТІ-стрічки подається на аналоговий вхід мікроконтролера. Одночасно, на нього йде живлення від стабілізатора та на спеціальний вхід MCU подається стабільна опорна напруга з джерела ADR02ARZ. Якщо вхідна напруга перевищує порогове значення, що відповідає перегріву, мікроконтролер фіксує аварійну ситуацію.

У разі виявлення перегріву мікроконтролер може виконувати кілька дій: передавати інформацію через CAN-шину, активувати зовнішній комутатор або формувати сигнал для діагностики через JTAG. Таким чином, мікроконтролер є центральною ланкою в обробці температурної інформації та генерації відповідної реакції.

S32K144 спеціально розроблений для транспортних застосувань. Він має вбудовані аналогові входи з можливістю точного порівняння сигналів а також достатню обчислювальну потужність для обробки кількох каналів температурного моніторингу. Альтернативні варіанти хоч і мають подібний функціонал, проте не відповідають повною мірою жорстким вимогам автомобільного класу щодо надійності, температурної стабільності та сертифікації (рис.2.3).



Рисунок 2.3 – Вигляд плати розробника з мікроконтролером  
NXP S32K144

Для забезпечення стабільного електроживлення використовується стабілізатор напруги LM53603-Q1. Цей пристрій призначений для перетворення вхідної напруги з бортової мережі транспортного засобу (типово 12 В) у стабільну напругу 5 В постійного струму.

У даній системі стабілізатор живиться безпосередньо від бортової мережі. Його вихід підключено до джерела опорної напруги, яке потребує стабільного живлення для забезпечення точного порівняння сигналів у мікроконтролері. Таким чином, стабілізатор є необхідною ланкою для формування надійної та точної опорної напруги в системі.

Стабілізатор є DC-DC перетворювачем, сертифікованим для застосування в автомобільній електроніці, що забезпечує високу ефективність та стійкість до імпульсних завад. Його було обрано через його відповідність жорстким вимогам до автомобільної електроніки. Він забезпечує широкий діапазон вхідних напруг (до 36 В), має високу енергоефективність, вбудовані захисти (від перенапруги, перегріву та короткого замикання). На відміну від простіших лінійних стабілізаторів, LM53603 дозволяє мінімізувати теплові втрати, що критично важливо у середовищі з обмеженим охолодженням (рис. 2.4).

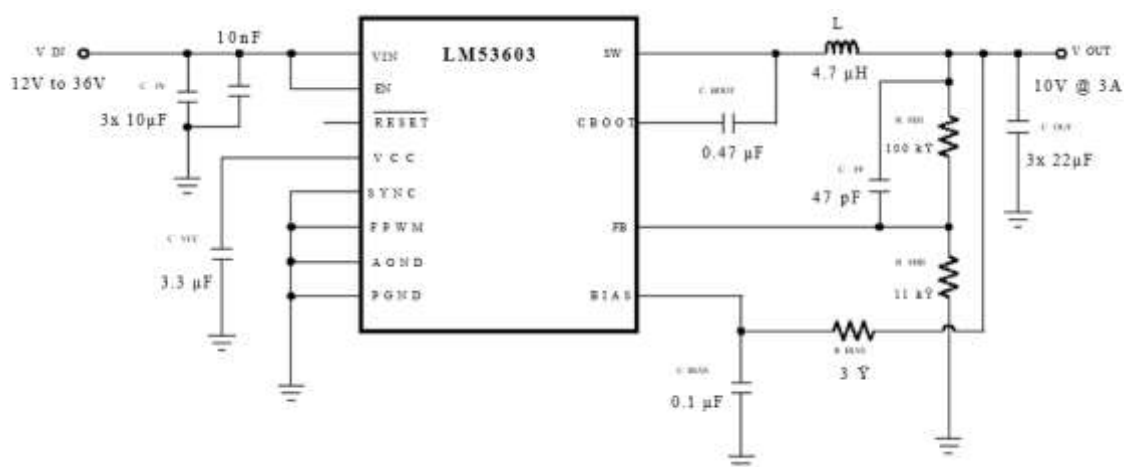


Рисунок 2.4 – Типова схема підключення стабілізатора LM53603 для автомобільного застосування

Для забезпечення точного порівняння аналогових сигналів у мікроконтролері використовується джерело опорної напруги ADR02ARZ. Цей компонент формує стабільну напругу 2.5 В, яка подається на відповідний вхід мікроконтролера. Живлення на джерело надходить від стабілізатора, що гарантує необхідний рівень стабільності та точності. Наявність незалежного джерела опорної напруги дозволяє усунути вплив флуктуацій основного живлення на результати вимірювання. Сигнал, що надходить з РТІ-стрічки, порівнюється в мікроконтролері саме з цим фіксованим значенням.

ADR02ARZ забезпечує точність  $\pm 0.5\%$  без додаткової температурної компенсації та має низький рівень шуму, що критично при роботі з аналоговими вхідними сигналами. На відміну від багатьох регульованих джерел, він формує стабільні 2.5 В без потреби зовнішнього поділу чи калібрування. Його стабільність при зміні навантаження та температури робить його оптимальним для систем, де важливе точне порогове порівняння, як у випадку контролю перегріву (рис. 2.5).

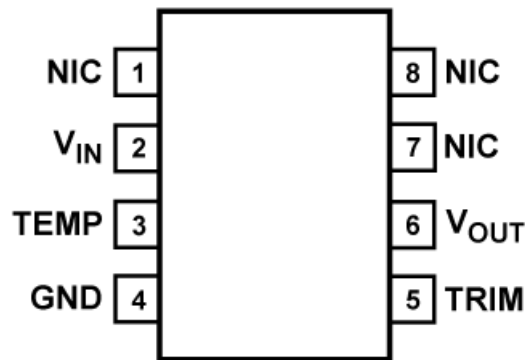


Рисунок 2.5 – Схема підключення виводів мікросхеми ADR02ARZ

Після обробки сигналу з РТІ-стрічки та порівняння його з опорною напругою, мікроконтролер приймає рішення про наявність або відсутність перегріву. Для подальшої дії або передавання інформації використовуються три вихідні інтерфейси, передбачені у системі.

Першим є CAN-шина, яка дозволяє передавати дані в електронну мережу транспортного засобу. Це забезпечує централізовану обробку аварійної інформації. Вона є стандартом для передачі даних між електронними модулями транспортного засобу. Її переваги - висока перешкодостійкість, підтримка пріоритезації повідомлень і швидка реакція, що критично для аварійних сигналів.

Другим виходом є комутатор, що може керувати виконавчим пристроєм, що може не лише виявляти перегрів, але й реагувати на нього в реальному часі. Він реалізує пряму дію у разі перегріву — наприклад, відключення живлення або запуск охолодження. Це дозволяє системі реагувати без затримок, незалежно від центрального блока управління.

Третій є інтерфейс JTAG, призначений для налагодження та діагностики та мікроконтролера в сервісному режимі. Він забезпечує гнучку можливість діагностики та оновлення прошивки без демонтажу пристрою, що спрощує обслуговування на сервісних етапах.

Логічним підсумком є структурна схема, що інтегрує всі блоки системи в єдину архітектуру. Схема з'єднана саме так, як того вимагає логіка безпечної, точної та ефективної роботи системи: кожен блок має свою локальну функцію, а їхній взаємозв'язок забезпечує мінімізацію помилок та швидку реакцію на критичні ситуації (рис. 2.6).

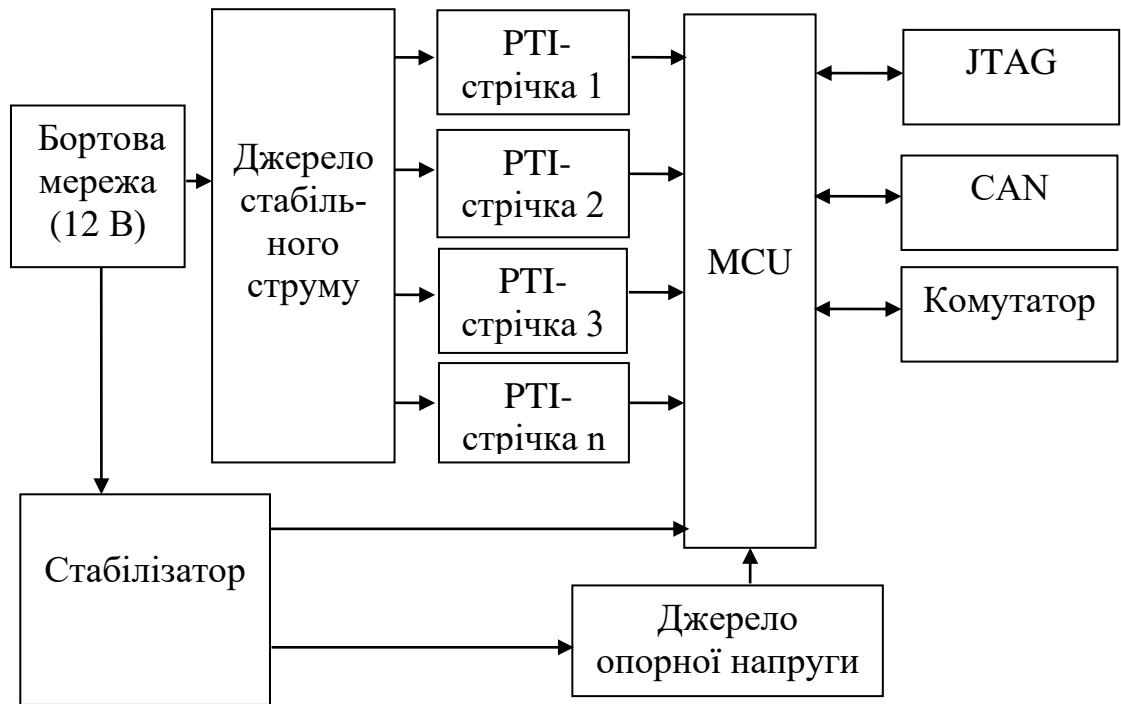


Рисунок 2.6 – Структурна схема системи контролю температури

Бортова мережа є єдиним джерелом живлення для всіх вузлів системи, тому вона подає напругу одночасно на два незалежні блоки: стабілізатор LM53603-Q1 та джерело стабільного струму LT3092. Такий поділ дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи для кожного з вузлів без перевантаження по струму або зниження стабільності.

Стабілізатор живить джерело опорної напруги ADR02ARZ та мікроконтролер NXP S32K144. Опорна напруга повинна бути максимально стабільною, адже вона використовується мікроконтролером для порівняння з аналоговим сигналом з РТІ-стрічок. Саме тому вона не підключена до інших блоків.

Джерело стабільного струму не отримує живлення через стабілізатор, бо має власний широкий робочий діапазон напруг і не потребує додаткового згладжування. Воно формує стабільну струмову петлю, яка подається безпосередньо на стрічки. Такий підхід дозволяє контролювати лише зміни опору в сенсори, без впливу коливань струму.

РТІ-стрічки з'єднані з аналоговим входом мікроконтролера NXP S32K144. Цей зв'язок логічний: зміна температури викликає зміну опору, а отже — зміну напруги на вході MCU. Мікроконтролер порівнює її з опорним значенням, і при перевищенні порогу визначає аварійну ситуацію.

З виходів мікроконтролера сигнал передається трьома незалежними каналами. Через CAN-шину інформація йде в головну електронну систему авто – це стандартний шлях комунікації у транспортній електроніці. Через комутатор реалізується фізичний вплив на об'єкт – наприклад, включення охолодження або відсічення навантаження. JTAG залишено як сервісний інтерфейс для налагодження і тестування системи під час обслуговування.

Конструкція контролеру температури розроблена в системі автоматизованого проектування друкованих плат.

Перш за все був створений проект системи, до якого додана схема електрична принципова. Для введення схеми електричної принципової використані елементи бібліотеки системи автоматизованого проектування. Наступним етапом є створення між з'єднань між окремими елементами схеми. наступний етап – перевірка електричної схеми на правила проектування, тобто наявність підключення до відповідних джерел живлення, а, також, наявність виводів компонентів, що не мають підключень (рис. 2.7).

В результаті, при відсутності помилок, формуються файли експорту, що необхідні для формування конструкції друкованої плати. Перший з них, це файл, що містить перелік компонентів, що складають схему пристрою з посиланнями на компоненти бібліотеки символів. тобто умовних позначень корпусів на друкованій платі. Інший – список між з'єднань, в якому вказано призначення кожної шини, або з'єднання між елементами схеми.



Після закінчення розміщення компонентів рекомендується особливо чутливі з точки зору електромагнітної сумісності, енергоспоживання і взаємних зв'язків траси між з'єднань провести в ручному режимі. Після чого можливо провести трасування в автоматичному режимі.

На завершення редактор друкованих плат генерує файли, що необхідні для виготовлення плати і монтажу пристрою рис. (2.9).

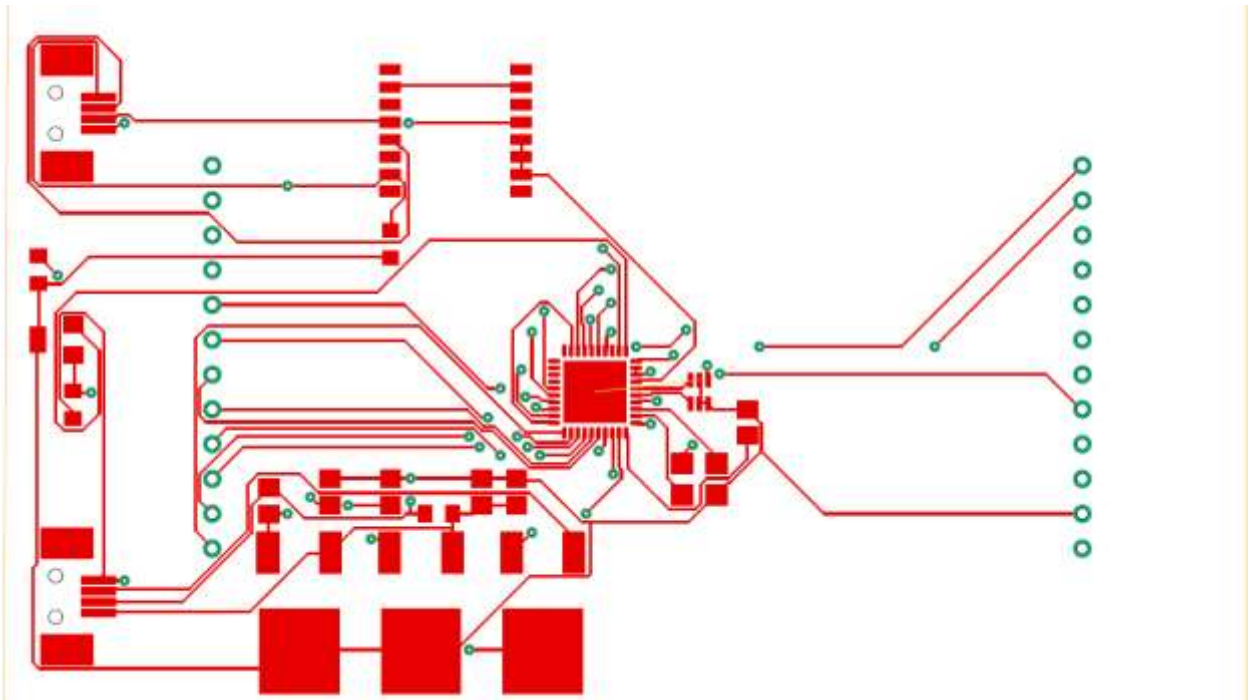


Рисунок 2.9 – Вид вікна САПР з топологією верхнього шару друкованої плати

Після закінчення роботи формується пакет документів для передачі проєкту на виробництво.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було розглянуті системи контролю температури акумуляторів.

На основі аналізу були прийняті рішення щодо шляхів вирішення поставленої задачі, методів та засобів її реалізації.

Розроблені структурні схеми фрагменту системи контролю температури акумуляторів, структура і електрична схема пристрою.

Також із застосуванням системи автоматизованого проектування розроблена конструкція блоку системи контролю і технологічні файли для виробництва.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. «Мікропроцесорні системи контролю та керування»: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
2. <http://www.ti.com>
3. Hardware for Providing Smart Farming Technologies. / Volodimir Karnaushenko, Liudmyla Sviderska. DOI: 10.35598/mcfpga.2023.003
4. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Сучасна компонентна база електронних систем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 241с.
5. Інформаційні технології в транспортних додатках. Горбенко Є.О., Васильєв Ю.С., Карнаушенко В.П., Пятайкіна М.І. Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» АЕРТ-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178 с.
6. «Прилади та пристрої інтегральної електроніки» Карнаушенко В.П. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Васильєв Ю.С. Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
7. Field Programmable Counter Arrays Integration with Field Programmable Gates Arrays, р.р.14-16. I Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні та прикладні аспекти розробки пристроїв на мікроконтролерах і ПЛІС» МС&FPGA-2019.
8. Головні тенденції у виробництві електроніки. Васильєв Ю.С., Горбенко Є.О., Карнаушенко В.П., Пятайкіна М.І. Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» АЕРТ-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178.