

**МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи  
другого (магістерського) рівня

на тему **ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ КОМБІНАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ  
ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ З МЕТОЮ ЇХ  
ЗАСТОСУВАННЯ У ЦИФРОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ**

Виконав: студент 2 курсу, групи ІКК-2.1  
спеціальності  
123 Комп'ютерна інженерія

\_\_\_\_\_ Козинець В. Д. \_\_\_\_\_

Керівник \_\_\_\_\_ Горбачов В. Е. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_ Русу О. П. \_\_\_\_\_

Одеса – 2023

# ДОВІДКА

кафедри КІтаІТ про виконану магістерську роботу

студента 2 курсу ФКПІ та КН групи ІКК-2.1

Козинець Владислава Дмитровича

на тему Використання методу комбінації елементів для покращення параметрів датчиків температури з метою їх застосування у цифрових сенсорних мережах

Висновок нормоконтролера Пояснюється згідно до кваліфікаційної роботи  
вимогам з методичними рекомендаціями ДСТУ. Формально згідно вимог  
визначеного положення ДСТУ  
Нормоконтролер к.т.н. ромен ВВ Перели  
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і.б. прізвище)

Висновок відповідального на наявність плагіату згідно з архивом ідентифікації  
ID 1015418065 унікальність роботи підтверджено  
Відповідальна особа к.т.н. ромен ВВ Перели  
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і.б. прізвище)

## Попередня експертиза (захист)

магістерської роботи

(бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

студ. Козинець В. Д. проведена "15" 12 2023р.  
(прізвище і.б.)

Висновки Розділи МР відповідають завданню, усі  
пункти завдання виконані. Текстова та графічна  
частина роботи виконані згідно вимог до її оформлення.  
Досліджено методи покращення параметрів частотно  
датчика температури на базі ієрархічного сенсора  
для його використання в сучасних цифрових мережах.  
Магістерська робота відповідає вимогам до кваліфікаційних  
робіт за завданням спеціальності та може бути  
рекомендована до захисту в ДЕК.

Члени комісії

[Підпис]  
(підпис)  
[Підпис]  
(підпис)  
[Підпис]  
(підпис)

к.т.н. доц. Цюпа Л.Г.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)  
к.т.н. доц. Перели В.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)  
викл. каф. КІтаІТ Шибень О.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)



МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій  
Освітній ступінь магістр  
Галузь знань 12 Інформаційні технології  
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІтаІТ

к.т.н., доц.

 Л. Г. Йона

"25" "09" 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Козинець Владиславу Дмитровичу

1. Тема роботи Використання методу комбінації елементів для покращення параметрів датчиків температури з метою їх застосування у цифрових сенсорних мережах  
керівник роботи Горбачов Віктор Едуардович, к.т.н., доцент кафедри ІТ  
затверджені наказом закладу вищої освіти від 25.09.2023 р. № 1953
2. Строк подання студентом роботи 11.12.2023 р.
3. Вхідні дані до роботи: Наукова літератури з інформацією про конкурентні пристрої  
Технічна документація з параметрами пристроїв  
Опис алгоритму покрокової стратегії дослідження
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки Розділ 1: Датчики температури в цифрових сенсорних мережах  
Розділ 2: Моделювання параметрів датчика температури  
Розділ 3: Шляхи покращення характеристик датчика з частотним виходом
5. Перелік графічного матеріалу (з зазначенням обов'язкових слайдів)  
Слайд 1 – Сенсорна мережа в структурі цифрової мережі  
Слайд 2 – Системи контролю температури  
Слайд 3 – Існуючі термочутливі елементи на польових транзисторах  
Слайд 4 – Вибір типу чутливого елемента  
Слайд 5 – Температурна залежність частоти генератора

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 25.09.2023

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	25.09.2023-01.10.2023	<i>вск</i>
2	Цифрові сенсорні мережі	02.10.2023-08.10.2023	<i>вск</i>
3	Вимоги до датчиків в цифрових мережах	09.10.2023-15.10.2023	<i>вск</i>
4	Типи і конструкції датчиків температури	16.10.2023-05.11.2023	<i>вск</i>
5	Теоретичне та експериментальне моделювання характеристик датчика з частотним виходом.	06.11.2023-12.11.2023	<i>вск</i>
6	Дослідження шляхів покращення характеристик частотного датчика температури	13.11.2023-19.11.2023	<i>вск</i>
7	Висновки та рекомендації	20.11.2023-26.11.2023	<i>вск</i>
8	Перелік джерел посилання	27.11.2023-03.12.2023	<i>вск</i>
9	Додаток А Перелік копій демонстраційного матеріалу	04.12.2023-10.12.2023	<i>вск</i>

Студент *Козинець* В. Д. Козинець  
(підпис)

Керівник роботи *Горбачов* В. Е. Горбачов  
(підпис)



## ВІДГУК КЕРІВНИКА

на кваліфікаційну роботу другого (магістерського) рівня  
студента Козинець В. Д.

на тему: Використання методу комбінації елементів для покращення параметрів датчиків температури з метою їх застосування у цифрових сенсорних мережах

Робота студента Козинця В. Д. присвячена вирішенню актуальної задачі покращення параметрів датчика температури виготовленого на базі недорогих промислових компонентів для їх відповідності вимогам, які пред'являються до датчиків при їх використанні у сучасних цифрових сенсорних мережах.

Автором побудована теоретична модель та проведено комп'ютерне моделювання експериментальних досліджень впливу температури на частоту релаксаційного генератора на одноперехідному транзисторі.

Студент Козинець В. Д. добре виконав завдання до КР приділивши основну увагу дослідженням підвищення чутливості, покращення лінійності вихідної характеристики датчика температури для цифрових мереж.

Робота проводилася значною мірою самостійно. Графік консультацій не порушувався. Завдання на КР виконано повністю. Необхідні для цього розрахунки проведені. При оформленні пояснювальної записки використовувались комп'ютерні технології. Під час виконання магістерської роботи студент Козинець В. Д. вивчив методи та прийоми конструювання, показав уміння користуватись навчальною та технічною літературою, ставити та розв'язувати дослідницькі задачі. Результати роботи апробовані на конференції.

Робота Козинця В. Д. відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт другого (магістерського) рівня за освітньо-науковою програмою та заслуговує оцінки «добре». Студент Козинець В. Д. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з комп'ютерної інженерії за заявленою спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Керівник

к.т.н., доц. кафедри ІТ



В. Е. Горбачов

## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу другого (магістерського) рівня  
студента Козинця В. Д.

на тему: Використання методу комбінації елементів для покращення параметрів датчиків температури з метою їх застосування у цифрових сенсорних мережах

Робота Козинця В. Д. виконана на 70 сторінках текстової частини та містить три розділи згідно з завданням на магістерську роботу.

У роботі студента Козинця В. Д. розглянуті методи зниження споживання енергії та підвищення чутливості, покращення лінійності вихідної характеристики частотного датчика температури на базі схеми релаксаційного генератора.

Актуальність теми полягає в тому, що в роботі розглянуто можливості економії ресурсів при побудові сенсорних мереж. У роботі розглядаються нові методи покращення характеристик датчиків температури з частотним виходом. Практичне значення отриманих автором роботи результатів полягає в можливості їх впровадження при обслуговуванні сенсорних мереж на реальних об'єктах.

В роботі студент Козинець В. Д. показав достатню теоретичну підготовку. Пояснювальна записка й графічні матеріали виконані охайно й відповідно до вимог ЄСКД, оформлення демонстраційних слайдів якісне. Студент Козинець В. Д. має дві наукову публікацію тез конференцій.

Недоліки роботи :

- з пояснювальної записки не ясно яке середовище використовувалось для реалізації комп'ютерної моделі;
- не описано як проводилось тестування коду.

Але вказані недоліки не знижують цінності виконаної роботи. Робота Козинця В. Д. відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт другого (магістерського) рівня за освітньо-науковою програмою та заслуговує оцінки «добре». Студент Козинець В. Д. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з комп'ютерної інженерії за заявленою спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент

д.т.н., доц. каф. КН



---

О. П. Русу



Имя пользователя:  
Анна Серединко

ID проверки:  
1016028801

Дата проверки:  
21.12.2023 16:26:23 EET

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:  
28.12.2023 10:33:03 EET

ID пользователя:  
100001433

Название файла: 2023\_MP\_Козинець\_Горбачов\_Використ\_методу\_комбінац\_елем\_датч\_температ

Количество страниц: 73 Количество слов: 12992 Количество символов: 100168 Размер файла: 11.82 MB ID файла: 1015718065

## 13.5% Совпадения

Наибольшее совпадение: 6.63% с источником из Библиотеки (ID файла: 1015695768)

8.47% Источники из Интернета 855 ..... Страница 75

7.17% Источники из Библиотеки 116 ..... Страница 78

## 0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 76

## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 70 с., 37 рисунків, 1 таблиця, 2 додатка, 22 джерела.

### СЕНСОРНА МЕРЕЖА, ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ, МЕТОД КОМБІНАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ

Об'єкт дослідження – параметри частотного перетворювача температури.

Метод дослідження – експериментальні дослідження залежності параметрів частотного датчика від температури за допомогою комп'ютерної моделі.

Дослідження нових конструкцій датчиків низького енергоспоживання дозволить використовувати їх при організації сенсорних мереж.

Результати розрахунків і комп'ютерних експериментальних досліджень дозволяють знайти шляхи покращення характеристик датчиків температури.

В першому розділі на базі аналізу існуючих конструкцій датчиків, зроблено висновок, що використання в цифрових мережах частотних датчиків дозволяє заощаджувати ресурси. В другому розділі на базі експериментальних досліджень зроблено висновок, що частотний датчик на одному транзисторі не може бути використано в цифрових мережах в якості датчика температури без додаткових блоків корекції. В третьому розділі досліджені методи покращення параметрів частотного датчика температури на базі релаксаційного генератора для його використання в сучасних цифрових мережах.

Результати можуть бути застосовані при організації та експлуатації цифрових сенсорних мереж.



## ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis: 70 p., 37 figures, 1 tables, 2 appendix, 22 sources.

### SENSOR NETWORK, TEMPERATURE SENSOR WITH FREQUENCY OUTPUT, ELEMENT COMBINATION METHOD

The object of research is the parameters of the temperature frequency converter.

Research method – experimental studies of the dependence of frequency sensor parameters on temperature using a computer model.

The study of new designs of low-energy sensors will allow their use in the organization of sensor networks.

The results of calculations and computer experimental studies allow finding ways to improve the characteristics of temperature sensors.

In the first section, based on the analysis of existing sensor designs, it was concluded that the use of frequency sensors in digital networks allows saving resources. In the second chapter, on the basis of experimental studies, it was concluded that a frequency sensor on one transistor cannot be used in digital networks as a temperature sensor without additional correction blocks. In the third chapter, the methods of improving the parameters of the temperature frequency sensor based on the relaxation generator for its use in modern digital networks are investigated.

The results can be applied in the organization and operation of digital sensor networks.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК .....	10
ВСТУП .....	11
1 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ В ЦИФРОВИХ МЕРЕЖАХ.....	13
1.1 Сенсорні мережі в цифрових мережах .....	13
1.2 Датчики в цифрових мережах.....	18
1.3 Вимірювання температури в цифрових мережах.....	24
1.4 Вимоги до датчиків температури в цифрових мережах .....	26
1.5 Сучасні конструкції датчиків температури .....	28
1.6 Висновки .....	31
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРИ.....	32
2.1 Дослідження параметрів термочутливого елемента .....	32
2.2 Аналіз схем частотних датчиків температури .....	37
2.2.1 Теоретична модель дослідження датчика температури .....	39
2.2.2 Комп'ютерна експериментальна модель дослідження датчика температури .....	41
2.3 Висновки .....	42
3 ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ .....	44
3.1 Вплив обмежуючого резистора в колі бази на частоту генератора .....	44
3.2 Вплив задаючого струм резистора в колі емітера на частоту генератора .....	46
3.3 Підвищення чутливості датчика температури з частотним виходом .....	47
3.4 Покращення лінійності вихідної характеристики датчика температури з частотним виходом .....	52
3.5 Висновки .....	56
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	60
Додаток А. ПЕРЕЛІК КОПІЙ ДЕМОНСТРАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	63
Додаток Б. РОЗРОБЛЕНІ СКРИПТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	66



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

АТ команда – це абревіатура від англійського слова увага (ATtention)  
GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування  
I2C – (Inter-Integrated Circuit) – синхронний протокол передачі даних  
IP (Internet of Things) – Інтернет Речей  
АЧП — аналогово-частотний перетворювач  
Б – база транзистора  
БС – базова станція  
Е – емітер  
IP – Інтернету речей  
МОППТ – метал-оксид-напівпровідниковий польовий транзистор  
ОПТ – одноперехідний транзистор  
ПТ – польовий транзистор  
ПТЗП – польовий транзистор з *p-n*-переходом  
ЧЦП – частотно-цифровий перетворювач

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

АТ команда – це аббревіатура від англійського слова увага (ATtention)

GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування

I2C – (Inter-Integrated Circuit) – синхронний протокол передачі даних

IP (Internet of Things) – Інтернет Речей

АЧП — аналогово-частотний перетворювач

Б – база транзистора

БС – базова станція

Е – емітер

IP – Інтернету речей

МОНПТ – метал-оксид-напівпровідниковий польовий транзистор

ОПТ – одноперехідний транзистор

ПТ – польовий транзистор

ПТЗП – польовий транзистор з *p-n*-переходом

ЧЦП – частотно-цифровий перетворювач



## ВСТУП

Повсюдне поширення концепції Інтернету речей на всі галузі науки, промисловості, міського господарства, медицини спричинило суттєве збільшення цифрових сенсорних мереж. Це викликало бурхливе зростання кількості досліджень мініатюрних та ресурсномістких датчиків фізичних величин. Найпоширенішими є датчики температури, оскільки з їх допомогою контролюються режими роботи будь-якого пристрою від мікро чіпів до атомних реакторів. У нашому житті датчики температури використовуються повсюдно від побутових нагрівальних і охолоджувальних приладів, мобільних телефонів, до систем управління атомними реакторами і космічними кораблями. Тому в даний час застосовується велике різноманіття конструкцій датчиків температури.

Однак, використання датчиків температури в цифрових сенсорних мережах Інтернету речей висуває особливі вимоги до характеристик датчиків. Вони повинні бути недорогими, споживати мало енергії, мати достатню чутливість і лінійну вихідну характеристику. Крім того, при роботі в цифрових сенсорних мережах, аналогові датчики потребують підсилення та аналогово-частотного перетворення для подальшої обробки сигналу. Тому останнім часом особливий інтерес представляють датчики температури з частотним виходом, які позбавлені цих недоліків і не потребують підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів, дозволяють усунути паразитний вплив вимірювальних каналів один на одного і нестабільність в роботі.

Актуальність. Пріоритети всесвітнього розвитку автоматизованих цифрових систем моніторингу вказують на розширення сфери застосування датчиків фізичних величин в області екстремальних умов. Разом з цим жорстко стоїть питання економії споживання енергії сенсорними мережами. Використання в цифрових сенсорних мережах датчиків з частотним виходом дозволяє заощаджувати ресурси на використання попередніх підсилювачів, аналогово-частотних перетворювачів і пристроїв корекції показань при змінах напруги живлення.

Мета дослідження. Метою роботи є теоретичні та експериментальні дослідження залежності параметрів релаксаційного генератора на базі одноперехідного транзистора та перевірка можливості використання його в якості датчика температури в сенсорних цифрових мережах.

Завдання дослідження. Для досягнення мети треба здійснити огляд

конструкцій існуючих сучасних датчиків температури, які використовуються в цифрових сенсорних мережах; вибрати конструкцію датчика, яка дозволяє заощаджувати ресурси за рахунок вдосконалення схеми детектора і мінімізації числа його активних елементів; дослідити механізми залежності електричних параметрів генератора релаксаційних коливань від температури в теоретичному аспекті; експериментально дослідити залежність електричних параметрів частотного датчика від температури; дослідити можливості покращення характеристик частотного датчика температури; зробити висновки про відповідність параметрів частотного датчика датчикам температури, які використовуються в сучасних цифрових сенсорних мережах.

Вимоги до розробки. Датчик температури повинен споживати меншу енергію у порівнянні з існуючими аналогами, мати мінімальну кількість складових елементів його електричної схеми, мати лінійну вихідну характеристику, мати чутливість, порівнянну з існуючими аналогами.

Метод дослідження. В роботі використовується метод комбінації недорогих промислових елементів, які є чутливими до змінення навколишньої температури для підвищення характеристик комбінованого датчика температури. Методом експериментального дослідження залежності параметрів частотного датчика від температури є побудова комп'ютерної моделі експерименту.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що використані в роботі методи експериментальних досліджень параметрів датчиків та засоби покращення їх характеристик дозволяють в подальшому приймати правильні рішення під час роботи з цифровими сенсорними мережами, знаходити можливості використовувати серійно вироблені промисловістю прилади замість дорогих спеціальних систем.

Ключові слова: сенсорна мережа, датчик температури з частотним виходом, метод комбінації елементів.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати магістерської роботи пройшли апробацію на Козинець В. Д., Горбачов В. Е. Використання методу комбінації елементів для покращення параметрів датчиків температури з метою їх застосування у цифрових сенсорних мережах. Тези ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Гуманітарний і інноваційний ракурс професійної майстерності: пошуки молодих вчених», 15 грудня 2023 р., Одеса Україна.



# 1 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ В ЦИФРОВИХ МЕРЕЖАХ

Найбільш передовою технологією організації цифрових систем дистанційного контролю є концепція Інтернету речей [1], коли процесор із заздалегідь написаним алгоритмом може приймати рішення про коригування параметрів об'єкта без втручання людини. Концепція Інтернету речей (IP) розглядається, як цифрова інформаційна система, що складається з сенсорної мережі датчиків на інтелектуальних об'єктах, метою якої є об'єднання «всіх речей», включаючи повсякденні і промислові об'єкти, таким чином, щоб зробити їх керованими сервером без участі людини.

## 1.1 Сенсорні мережі в цифрових мережах

Повсюдне поширення концепції Інтернету речей (IP) на всі галузі науки, промисловості, міського господарства, медицини спричинило суттєве збільшення цифрових сенсорних мереж. Це викликало бурхливе зростання кількості досліджень мініатюрних та ресурсномістких датчиків фізичних величин. Основою для проектування мережі IP є зниження енергоспоживання окремими її елементами.

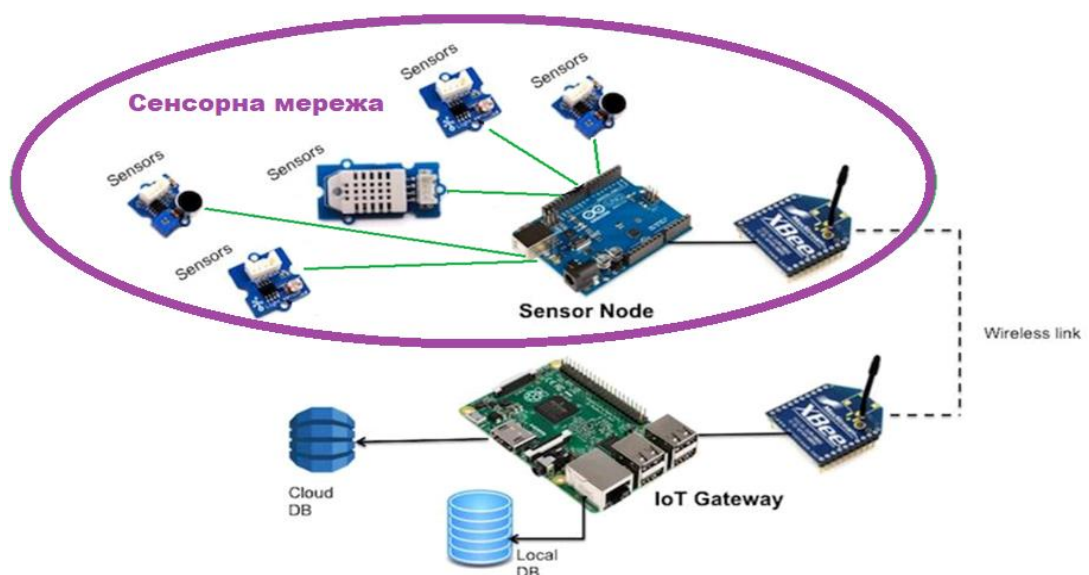


Рисунок 1.1 – Сенсорна мережа в структурі цифрової мережі

Технічно у мережі IP можна виділити п'ять елементів з окремими системами споживання енергії (рис. 1.1): розумні речі с датчики та виконавчі пристрої, шлюз

доступу с засобами передачі даних. Три остатніх елемента складають обчислювальні ресурси (прийнято позначати CLOUD): це – мережа доступу, мережевий сервер і сервер додатків с засобами контролю. Всі ці елементи мають свою незалежну систему енергозабезпечення, тому зниження енергоспоживання в мережі IP вирішується для кожного з цих елементів окремо.

Обладнання розумних речей утворюють кінцеві пристрої – датчики, сенсори, контролери та інше периферійне обладнання для вимірювання необхідних показників та передачі цих даних у мережу за провідними або бездротовими протоколами (Serial, RS-485, MODBUS, CAN bus, OPC UA, BLE, WiFi , Bluetooth, LoRaWAN, Sigfox та ін.). Оскільки кожна «порція» цієї інформації є невеликою за обсягом, такі дані називають малими (Little Data).

Мережеві шлюзи та хаби (Network) – роутери, які об'єднують та підключають кінцеві пристрої до хмари.

Хмара (Cloud) – віддалений сервер у дата центрі, що обробляє, аналізує та надійно зберігає інформацію. Саме тут малі дані перетворюються на Big Data, коли консолідується безліч інформаційних потоків з різних пристроїв. Так інтернет речей стає «інтелектуальним», оскільки підключаються засоби аналізу даних, зокрема. із застосуванням методів машинного навчання (Machine Learning). Це дозволяє ефективно та віддалено керувати технікою, на якій встановлені кінцеві пристрої.

температура, вологість, рух, світло, тиск тощо. Ці сенсори перетворюють збирані дані на цифрові сигнали. Зібрані дані від сенсорів передаються до центральних серверів через мережі зв'язку, такі як Wi-Fi, Bluetooth, стільниковий зв'язок чи навіть LoRaWAN для дальших обчислень та аналізу.

Центральні сервери або хмарні платформи отримують надіслані дані. Тут дані накопичуються, аналізуються та зберігаються. Хмарні системи можуть використовувати різні алгоритми для аналізу цих даних і генерування корисної інформації. На основі обробленої інформації можуть генеруватися команди для сенсорів або пристроїв, щоб вони виконали певні дії. Це може бути автоматичне управління температурою в приміщенні, управління електроприладами чи навіть автоматичне керування процесами у великих промислових системах. Отримані дані можуть використовуватися для створення звітів, аналітики та розумних прогнозів. Ці дані можуть також бути використані для покращення якості послуг, оптимізації бізнес-процесів та розробки нових продуктів чи послуг. Інтернет речей революціонізує спосіб, яким пристрої взаємодіють між собою та з нами,

забезпечуючи нам більше зручності, безпеки та ефективності у різних аспектах життя.

Ці датчики можуть бути підключені до IP-мережі для збору температурних даних з різних середовищ і пристроїв. Ось як IP і температурні датчики взаємодіють у сенсорних мережах:

#### Моніторинг та Контроль Умов:

Інтернет речей поєднує звичайні "речі" з Інтернетом. Інженери комп'ютерів з 90-х років почали додавати датчики та процесори до звичайних предметів. Проте на початку прогрес був повільним через великі та незручні мікросхеми. Комп'ютерні чіпи з низькою потужністю, відомі як RFID-мітки, спочатку використовувалися для відстеження цінного обладнання. З розвитком технологій обчислювальні пристрої стали меншими за розміром, і ці чіпи з часом стали меншими, швидшими та розумнішими.

Додаток Інтернету речей (IP) - це комплекс послуг та програм, які об'єднують дані, отримані від різних пристроїв Інтернету речей. Цей додаток використовує технології машинного навчання або штучного інтелекту (ШІ) для аналізу цих даних і прийняття обґрунтованих рішень. Ці вирішення потім передаються назад на пристрій Інтернету речей, і сам пристрій Інтернету речей розумно реагує на надходження вхідних даних. Керування пристроями IP або їхнім парком можливе за допомогою інтуїтивно зрозумілих графічних інтерфейсів для користувачів. Прикладами є мобільні додатки або веб-сайти, які можна використовувати для реєстрації та управління розумними пристроями.

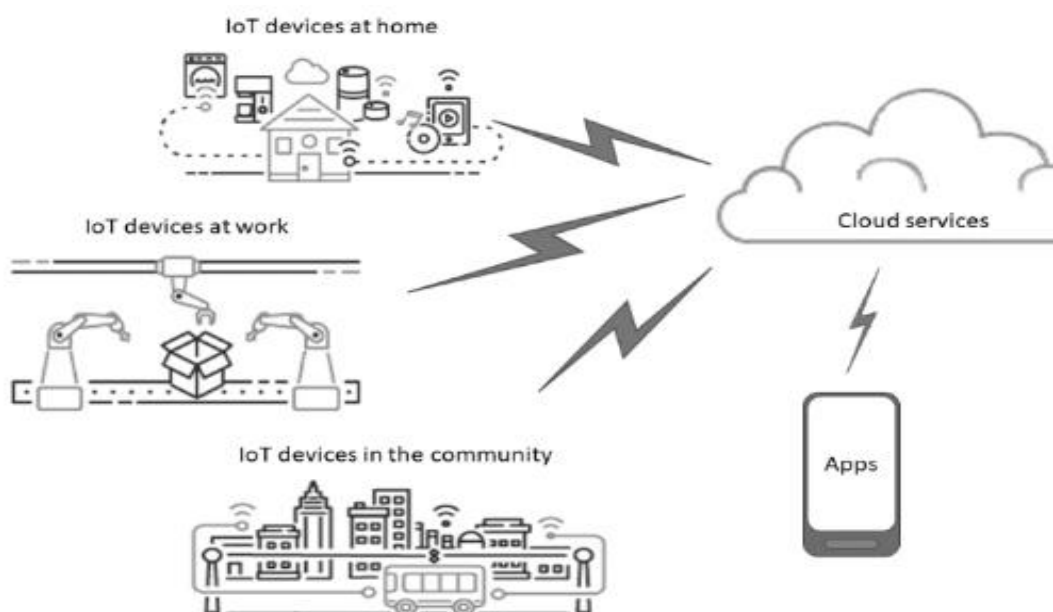


Рисунок 1.2 – Розумні системи в концепції IP



У якості розумні речі інформаційній мережі IP може виступати будь-який фізичний об'єкт від побутових приладів до житлових будинків, дорожніх розв'язок і промислових верстатів. Кожний розумний об'єкт може вважатися «розумним» та бути підключеним до мережі IP, якщо він забезпечений сенсорами фізичних величин, пристроєм передачі даних, і виконавчим пристроєм, який змінює стан розумного об'єкту в залежності від отриманого з мережі сигналу при зміні контрольованої фізичної величини (рис. 1). У якості розумного об'єкту можна розглядати людину зі «розумним годинником», який вимірює його швидкість руху, пульс, тиск, температуру, і який передає цю інформацію в базу даних. Як виконавчий пристрій може бути використаний мобільний телефон, на який приходять повідомлення системи про рекомендації при відхиленні пульсу, тиску або температури від норми. Сам по собі окремий сенсор споживає мало енергії. Однак, сигнал від сенсора повинен бути оброблений у відповідний формат спеціальним конвертором і переданий до мережі спеціальним передавачем. Така система сенсора, конвертора і передавача грають роль кінцевого пристрою мережі IP і її енергоспоживання вже буде порівняно з енергоспоживанням мобільного телефону.

У якості шлюзу доступу частіше використовуються різні бездротові способи передачі даних (WiFi, GSM) зі своїми специфічними пристроями, програмним забезпеченням і протоколами передачі. Зниження споживання енергії та підвищення ефективності роботи на цій ділянці мережі IP вирішується розробниками мобільних мереж.

У якості CLOUD застосовуються передові ефективні ресурсозберігаючі хмарні технології доступу, обробки і зберігання даних. Такі технології дозволяють оперативно реагувати і приймати рішення при змінах параметрів контрольованих розумних об'єктів при мінімальному енергоспоживанні. Подальша економія енергії у цьому елементі досягається новітніми прийомами оптимізації ресурсів мережі, або використанням новітніх технічних рішень. Таким чином, дослідження з енергозбереження на цьому елементі мережі IP вимагають сучасної апаратури і технологій, у чому ми обмежені.

У якості засобів контролю можуть використовуватися будь-які пристрої, які мають зв'язок з Інтернетом. Бази даних CLOUD повинні також мати зв'язок з Інтернетом для того, щоб абонент мав можливість контролювати за допомогою засобів контролю процесу у мережі. Взагалі концепція IP передбачає наявність в комп'ютерній мережі автономної системи прийняття рішень без втручання людини, проте людина завжди повинна мати можливість контролювати процесу і вносити

корективи в алгоритми прийняття рішень з допомогою засобів контролю. Енергоспоживання мережі на цій ділянці повністю забезпечується абонентом, так як тут задіюються стандартні засоби зв'язку абонента з Інтернетом.

Все більше компаній розуміють, що пристрої та датчики Інтернету речей можуть покращити ефективність і доступність їхніх систем, і велике значення має правильний вибір датчиків для відповідності конкретним потребам. Давайте розглянемо деякі з найважливіших факторів, які слід враховувати при виборі датчиків для Інтернету речей.

**Точність:** Для забезпечення ефективного використання пристрою в конкретному місці, особливо коли необхідне точне відстеження інформації або вимірювання, важлива точність датчиків IP.

**Витрати:** Вартість датчиків є фактором бюджету. Для впровадження варіанту використання важливо, щоб вартість датчиків була якнайнижчою.

**Зв'язок:** Зв'язок в мережах IP є ключовим елементом екосистеми Інтернету речей через різноманітність протоколів зв'язку. Датчики повинні бути сумісні з різними протоколами зв'язку.

**Довговічність:** Оскільки розгортання та дистанційне обслуговування пристроїв IP можуть займати багато часу, важливо враховувати їхню довговічність. Сильніший акумулятор сприяє кращій продуктивності сенсорів IP.

**Безпека:** З точки зору датчиків і безпеки слід звертати увагу на постачальників датчиків, щоб переконатися, що вони вирішують питання безпеки належним чином та уникають розголошення даних.

Якщо врахувати, що за такої побудови мережі, коли дані від мільйонів сенсорів можуть оброблятися одним сервером, очевидно, що споживання енергії всіма кінцевими пристроями мережі у багато разів може перевищувати енергоспоживання іншими елементами мережі.

Для вирішення проблеми ефективності енергоспоживання сенсорних мереж, в даний час розробляються високоефективні невеликі бездротові автономні інтерфейси, використовуються нові технології отримання енергії з зовнішніх джерел (наприклад, сонячна енергія, теплова енергія, енергія вітру, електромагнітне випромінювання), застосовується бездротова передача даних, розробляються навіть спеціальні ресурсозберігаючі операційні системи для роботи на кінцевих пристроях IP [1]. Іншим шляхом зниження енергоспоживання кінцевого пристрою мережі є вдосконалення електричної схеми детектора, мінімізація числа його активних елементів.

**Висновки:** Подальший розвиток мереж IoT пов'язаний із заходами щодо



зниження енергоспоживання окремими складовими системи, особливо сенсорними мережами.

## 1.2 Датчики в цифрових мережах

Різні пристрої в Інтернеті речей оснащені сенсорами, які вимірюють фізичні величини, такі як температура, вологість, рух, світло, тиск тощо. Ці сенсори перетворюють збирані дані на цифрові сигнали. Зібрані дані від сенсорів передаються до центральних серверів через мережі зв'язку, такі як Wi-Fi, Bluetooth, стільниковий зв'язок чи навіть LoRaWAN для дальших обчислень та аналізу.

Датчики бувають різних видів та типів, і призначені для різного виду роботи, існують такі основні види датчиків - аналоговий та цифровий.

Електричний – це датчики, в яких чутливий елемент виявляє фізичний параметр і перетворює його на електричний сигнал. Цей сигнал використовується для визначення значення цього фізичного параметра. Більшість датчиків, які у автоматизації, є електричними датчиками. NTC, датчики вологості та ємнісні датчики є прикладами електричних датчиків.

Хімічні датчики – це тип датчиків, які реагують на хімічну реакцію. Наприклад, хімічний датчик рН води показує різні кольори залежно від рівня рН.

Механічні датчики - використовують механізми виявлення фізичних параметрів. Наприклад, тензодатчик - це механічний датчик, який виявляє механічну деформацію і перетворює цю деформацію на електричний сигнал. Прикладами механічних датчиків є сенсорні датчики, біографічні датчики та датчики напруги.

Почнемо по черзі, аналоговий, поділяються на два види, контактні та безконтактні, самими простими є контактні, обираючи із дискретних датчиків, це різноманітні перемикачі, параметричні реле і подібні.

Аналоговий датчик генерує сигнал, який може змінюватися в безлічі значень всередині певного діапазону. Ці значення представлені у вигляді аналогового сигналу і зазвичай вимірюються у вольтах чи мілівольтах.

Вони дозволяють вимірювати змінні величини, такі як температура, тиск, освітленість та інші параметри навколишнього середовища, забезпечуючи точні і неперервні вимірювання.

Існують та використовують датчики для різних цілей, а саме:

Датчик вологості:

- Ємнісні сенсори вологості: Змінюють ємність в залежності від вологості.

- Провідникові сенсори вологості: Змінюють свій опір відносно вологості.

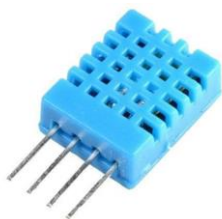


Рисунок 1.3 – Датчик вологості (Humidity sensor)

Датчик освітленості:

- Фоторезистори (LDR - Light Dependent Resistor): Змінюють свій опір в залежності від рівня освітленості.
- Фотодіоди: Генерують електричний струм при попаданні світла на них.

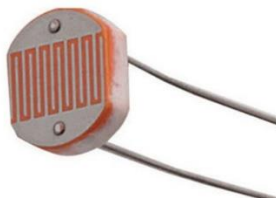


Рисунок 1.4 – Датчик освітленості (LDR Light sensor)

Датчик тиску:

- П'єзорезистивні сенсори: Змінюють опір відносно зміни тиску.
- Датчики торкання: Змінюють ємність в залежності від тиску.



Рисунок 1.5 – Датчик тиску (Force/Pressure sensor)

Датчик відстані:

- Інфрачервоні сенсори відстані: Вимірюють відстань до об'єкта за допомогою відбитих інфрачервоних променів.
- Ультразвукові сенсори відстані: Використовують ультразвукові хвилі для вимірювання відстані.



Рисунок 1.6 – Датчик відстані (Proximity sensor)

Температурні датчики:

- Термістори: Змінюють свій опір залежно від температури.
- Терморезистори (RTD - Resistance Temperature Detector): Змінюють свій опір відносно температури за допомогою металевого провідника.
- Термопари: Генерують електромагнітні сигнали, які залежать від різниці температур між двома їхніми кінцями.



Рисунок 1.7 – Датчик температури (NTC-Thermistor Temperature sensor)

Датчик потоку:

- Датчик швидкості потоку повітря та рідини: Вимірює швидкість потоку і кількість рідини, що рухається (рідини, газу або твердого тіла). Ці датчики можуть бути механічними чи електронними.



Рисунок 1.8 – Датчик потоку рідини (Water flow sensor)

Датчик частинок:



- Оптичні методи: Використовують лазерне випромінювання або інші світлові джерела для розсіяння світла від частинок. Зміна розсіяного світла дозволяє виміряти концентрацію частинок у повітрі.

- Резистивні або конденсаторні методи: При зміні концентрації частинок в повітрі може змінюватися електричний опір або ємність в деякому сенсорі.

- Масо-резонансні методи: Використовують масу частинок для визначення їхнього вмісту у повітрі. Зміни в резонансі можуть свідчити про збільшення чи зменшення маси, що вказує на зміну концентрації частинок.

- Електромагнітні методи: Деякі датчики використовують ефекти електромагнітної індукції або взаємодії частинок з магнітним полем для вимірювання їхньої концентрації.



Рисунок 1.7 – Датчик частинок (PM2.5 Particle sensor)

Датчик газу, хімічної речовини, диму:

- Електрохімічні датчики: Використовують хімічні реакції з газами, щоб створити електричний сигнал.

- Полімерні датчики: Взаємодіють з газами, змінюючи свою електричну провідність або інші фізичні властивості.

- Оптичні датчики: Використовують зміни в поглибленні світла або флуоресценції для виявлення хімічних реакцій, спричинених газами чи димом.

- Каталітичні датчики: Визначають концентрацію газів через каталітичні реакції, які змінюють електричні властивості матеріалу датчика.



Рисунок 1.8 – Датчик Газу/Хімічних речовин/Диму (Gas/Chemical/Smoke sensor)

Детектор металу:

- Індуктивні датчики: Використовують принцип індукції, де зміна електромагнітного поля від металевого предмета призводить до зміни індуктивності датчика.

- Капацитивні датчики: Взаємодіють з металем через зміну ємності конденсатора.

- Резистивні датчики: Засновані на зміні опору внаслідок взаємодії з металом.

Магнітні датчики: Реагують на зміни магнітного поля, спричинені металевим об'єктом.

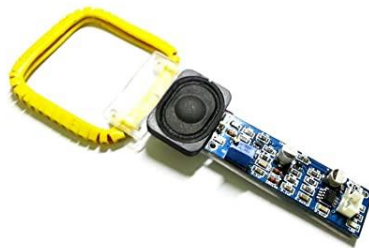


Рисунок 1.9 – Датчик Металу (Metal sensor)

Датчик кольору:

- Оптичні датчики: Використовують світлові сигнали для визначення кольору об'єкта.



Рисунок 1.10 – Датчик Кольору (Color sensor)

- Триколірні датчики, які використовують оптичні фільтри для пропускання або блокування певних діапазонів світла.

- RGB (Red, Green, Blue) датчики, які вимірюють інтенсивність червоного, зеленого та синього світла для визначення кольору.

- Спектроскопічні сенсори, які розкладають світло на різні довжини хвиль, щоб визначити спектральний склад кольору.

- HSV (Hue, Saturation, Value) датчик, який описує колір за трьома параметрами: відтінок, насиченість і яскравість.

Також датчики підрозділяються на дискретні датчики які використовують перервний аналоговий сигнал. Вони часто використовуються в автоматизованих системах та контрольних процесах. Прикладом таких датчиків є автомобільні, де натисканням кнопки чи перемикача, відкриваються двері, багажник, капот, функціонал перемикачів зміною температури. Але не дивлячись на їх простоту, має суттєвий недолік, окислення та ерозію контактів, тому стали частіше використовувати герметизовані датчики, які називають герконами, вони мають ізольовану скляну колбу, яка і допомагає у використанні в різних атмосферних умовах. Дія таких датчиків в умовах ізольованих від зовнішнього середовища відбувається магнітним полем. Розглядаючи параметричні датчики які працюють за релейною логікою, такі як датчики тиску, температури, гальмівної рідини у автомобілях, вони підлаштовують сигнал під мікросхеми, щоб зменшити кількість засобів комунікації. В області автомобільної електроніки спостерігається зміна від релейних параметричних датчиків до аналогових. Тепер мікропроцесор формує дискретний інформаційний сигнал з використанням програми обробки сигналу аналогового датчика.

Цифровий датчик генерує сигнал у цифровому вигляді, що означає, що його значення представлені у вигляді бінарних даних (0 або 1). Це дозволяє використовувати цифрові сигнали для передачі інформації в цифрових системах обробки даних. Цифрові датчики зазвичай менш вразливі до шумів і мають більшу стійкість до спотворень сигналу порівняно з аналоговими датчиками.

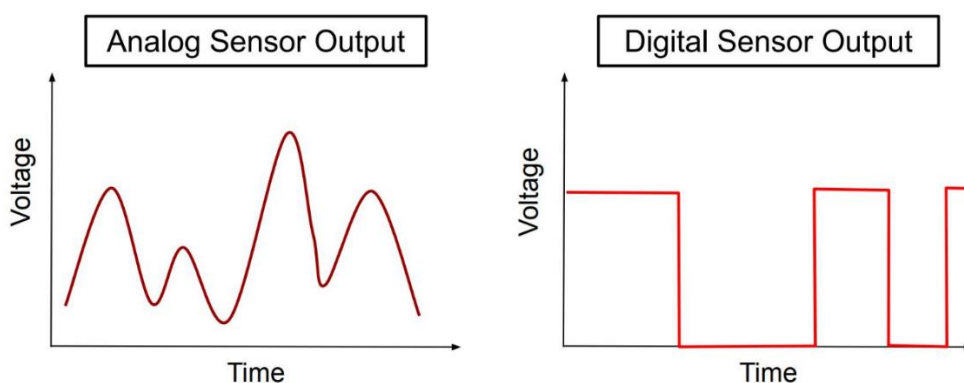


Рисунок 1.11 – Графіки різниці роботи аналогових та цифрових датчиків



Датчики є невід'ємною частиною екосистеми ІР, яка надає пристроям можливість збирати дані та взаємодіяти з оточуючим середовищем. Без можливості виявляти зовнішню інформацію за допомогою датчиків, концепція Інтернету речей стає марною. Різноманітність доступних датчиків ІР охоплює практично всі фізичні параметри, що оточують нас.

Принципи роботи датчиків ІР можуть відрізнятися в залежності від механізмів, що реагують на хімічні, біологічні або фізичні впливи. Датчики можуть бути резистивними, індукційними, ємнісними, магнітоелектричними, фотоелектричними, п'єзоелектричними, магніторезистивними, резонансними, термоелектричними, датчиками ядерного випромінювання або напівпровідниковими. Кожен з цих типів виявлення відгукує на різні впливи, що дозволяє їм забезпечувати різноманітні функції у системах Інтернету речей.

### 1.3 Вимірювання температури в цифрових мережах

Датчики температури є найпоширенішими в мережах ІР. Температура контролюється на всіх без винятку об'єктах, починаючи від мобільного телефону і закінчуючи атомними реакторами, рому кожен розумний об'єкт має свої датчики температури. Більш того жоден автоматизований об'єкт, не зможе працювати без температурних датчиків, тому відразу декілька датчиків температури присутні в кожному звичайному комп'ютері, автомобілі, холодильнику, у будь-якій пожежній сигналізації, в системах опалення і вентиляції, в двигунах літаків, в космічних апаратах, на будь-якому промисловому виробництві. Вимірювання температури важливі в метеорології, в медицині, в атомній промисловості, у будь-яких наукових дослідженнях.

Температурні датчики можуть бути розташовані в різних місцях, таких як будинки, офіси, склади чи інші приміщення, а також у природних середовищах. Ці датчики збирають дані про температуру і надсилають їх до центральної системи ІР через мережу Інтернету. Це дозволяє реальний час моніторингу і контролю за умовами в цих місцях. Температурні датчики можуть вимірювати температуру в різних частинах будівлі чи приміщення. Ці дані можуть бути використані для автоматичного регулювання систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Якщо датчик виявляє збільшення температури в приміщенні, система може автоматично увімкнути кондиціонер для охолодження повітря. У промислових установках температурні датчики можуть вимірювати температуру в різних частинах машин, обладнання чи пристроїв. Ці дані можуть бути використані

для моніторингу та управління тепловим режимом обладнання, що допомагає у підтримці надійності та продуктивності промислового обладнання. Температурні датчики використовуються у сфері логістики для моніторингу та контролю за температурою під час зберігання та транспортування продуктів, особливо у продуктових і фармацевтичних галузях. Це допомагає у підтримці якості та безпеки продуктів. За допомогою IP і температурних датчиків сенсорних мереж можливе ефективне та автоматизоване моніторингове рішення для різних галузей, що включає в себе збір, передачу, обробку та аналіз температурних даних у реальному часі. Це забезпечує оптимальний контроль і оптимізацію великої кількості процесів і забезпечує високу надійність та якість у величезному спектрі застосувань.

Для вирішення деяких завдань контролю температури об'єктів потрібне створення систем моніторингу температури (рис.1.2).

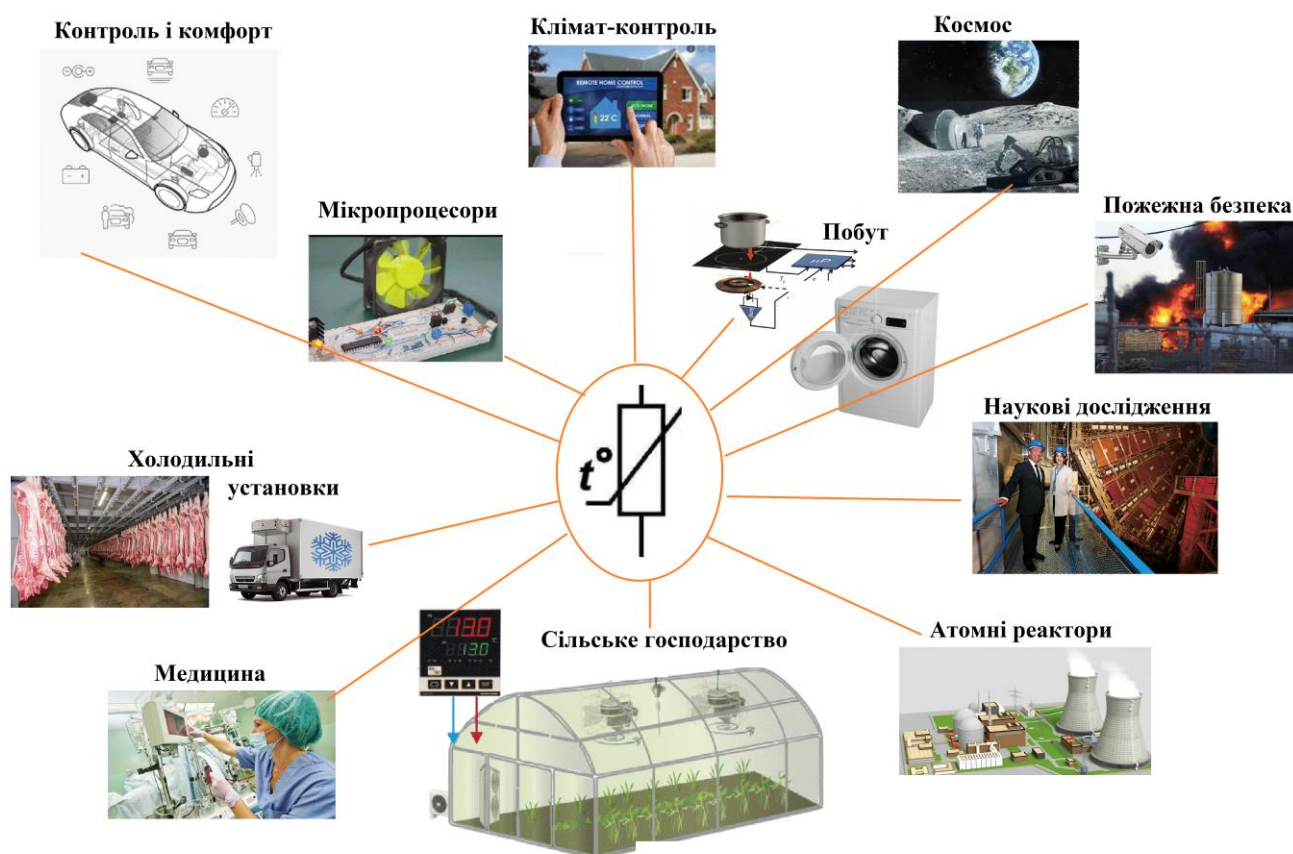


Рисунок 1.12 – Основні системи контролю температури

Це такі системи, як системи моніторингу температури мікропроцесорів та установок клімат-контролю, системи підтримання робочої температури космічних об'єктів, системи пожежної безпеки, системи контролю температури наукових досліджень, системи контролю температури атомних і теплових реакторів, системи контролю температури в сільському господарстві, в медицині, в холодильних

установках, в двигунах та установках підтримання комфортних умов

В цифрових сенсорних мережах застосовуються в основному, напівпровідникові температурні сенсори через їх компактність і можливість інтеграції в електронні компоненти цифрових мереж. Тому з усього різноманіття датчиків фізичних величин предметом дослідження даної роботи є напівпровідникові датчики температури з малим споживанням енергії для сенсорних мережі IP.

Висновки: Датчик температури для цифрових сенсорних мереж повинен мати мінімальну кількість активних елементів, достатню чутливість та лінійну вихідну характеристику.

#### 1.4 Вимоги до датчиків температури в цифрових мережах

Більшість сучасних випущених промисловістю температурних сенсорів є аналоговими, тобто використовують в якості інформаційного параметра напругу або силу струму, які змінюються при зміні температури. Однак, для роботи в цифрових мережах Інтернету речей датчики повинні задовольняти особливим вимогам.

По-перше, він повинен споживати мало енергії. Саме низьке енергоспоживання датчиків зробило можливим впровадження технології IP, тому що один процесор обробляє інформацію, яка надходить від сотень, навіть від тисяч датчиків, і споживання енергії розвиненою розумною системою, яка може включати сотні розумних об'єктів, визначається енергоспоживанням датчиків.

По-друге, він повинен бути мініатюрним, щоб міняти конструкцію самого розумного об'єкта.

Для виконання перших двох пунктів датчик повинен складатися з мінімальної кількості елементів.

Разом з тим, для якісного виконання своїх функцій датчик повинен мати достатню чутливість, мати лінійну вихідну характеристику, тому в промислових датчиках присутні системи регулювання лінійності та чутливості (рис 1.13, *a*).

Основна перевага сенсорних мереж – це можливість проводити моніторинг у важкодоступних місцях та в екстремальних умовах, при цьому показання датчика повинні не залежати від зовнішніх впливів, тому в промислових датчиках присутні системи стабілізації показів датчика при зовнішніх діях, таких як радіація. Таким чином, вирішення проблеми радіаційної стабільності показань датчиків для таких систем є актуальним завданням в даний час.



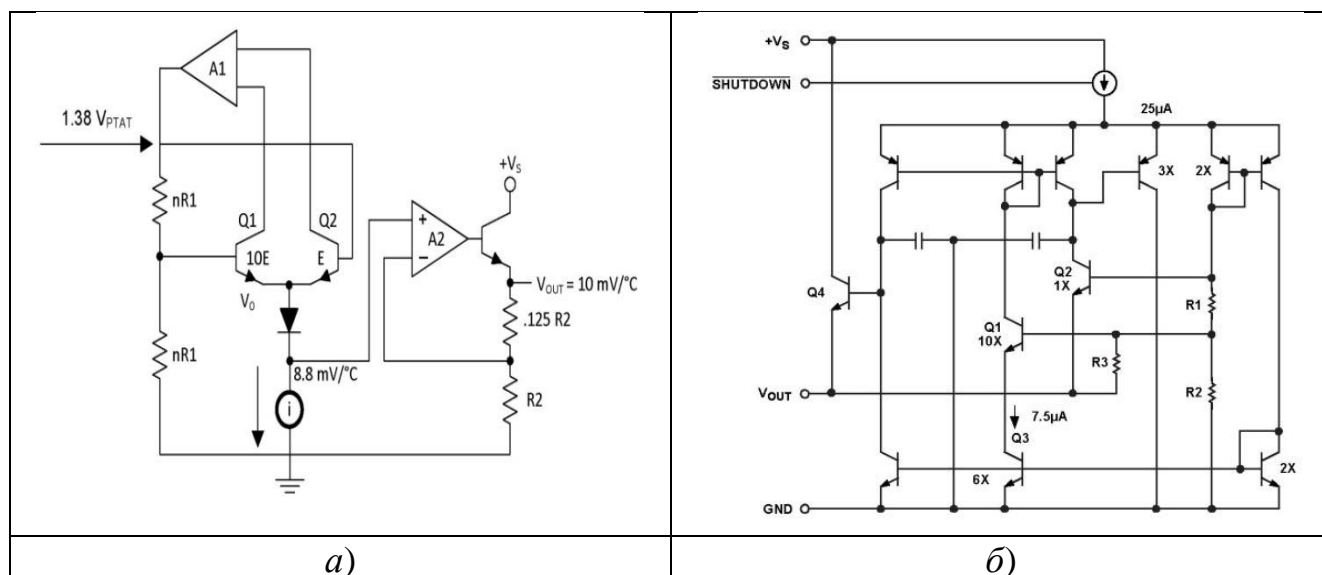


Рисунок 1.13 – Спрощена схема

датчика температури LM35 фірми Texas Instruments [6] а)  
та схема датчика температури TMP35 фірми Analog Devices [7] б)

Крім того, будь-який датчик складається з декількох елементів, основним з яких є чутливий елемент. Чутливий елемент – це об'єкт, який змінює свої електричні властивості в залежності від зміни зовнішнього фізичного впливу. Більшість чутливих елементів змінюють свій струм чи напругу залежно від зовнішнього впливу.

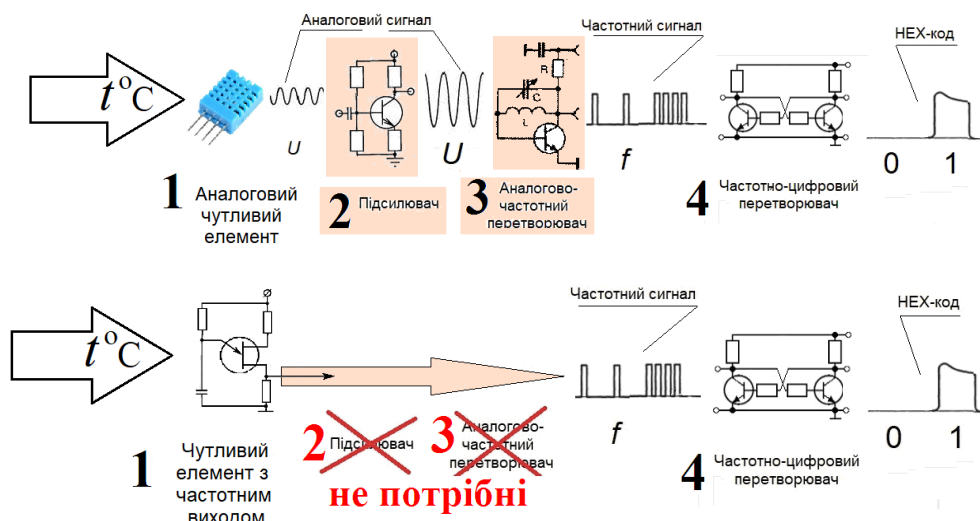


Рисунок 1.14 – Складові частини датчика для цифрових сенсорних мереж

Такі датчики називають аналоговими. Для роботи з цифровими мережами аналоговий вихідний сигнал необхідно посилювати та перетворювати на цифрову

форму (рис. 1.13, б). При цьому кожен із компонентів датчика вимагає енергії і вноситиме спотворення та завади у вихідний сигнал датчика.

Тому особливий інтерес для цифрових бездротових сенсорних мереж представляють датчики з частотним виходом [8]. Ці пристрої мають ряд переваг у порівнянні з перетворювачами з аналоговим виходом, таких як можливість прямого з'єднання з цифровими системами без підсилювачів та АЦП (рис. 1.14), відносно низька вартість, висока чутливість, можливість роботи в умовах підвищеного рівня електромагнітних перешкод, внаслідок завадо захищеності частотно модульованого сигналу.

Висновки: При використанні в цифрових сенсорних мережах датчик повинен споживати мало енергії, бути мініатюрним, тому складатися з мінімальної кількості елементів, та при цьому він повинен мати достатню чутливість, мати лінійну вихідну характеристику, а також бути стабільним до дії зовнішніх сторонніх впливів. Використання в цифрових мережах набагато вигідніше використовувати датчики з частотним виходом, що дозволяє обійтися без підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів. Це економить матеріальні ресурси і споживану енергію.

### 1.5 Сучасні конструкції датчиків температури

У нашому житті датчики температури використовуються повсюдно від побутових нагрівальних і охолоджувальних приладів, мобільних телефонів, комп'ютерів і автомобілів до найскладніших систем запобігання пожеж [9] контролю і управління атомними реакторами [10] і космічними кораблями [11]. Тому в даний час застосовується велике різноманіття конструкцій датчиків температури. Найпоширенішими у промисловості є резистивні датчики температури. В роботі [12] досліджуються резистивні датчики температури на базі платини (рис. 1.15).

Основною перевагою резистивних датчиків є його лінійна характеристика, тому резистивний датчик працює без блоку корекції лінійності вихідної характеристики. Однак платинові датчики досить дорогі і мають значні розміри. Крім того, всі резистивні датчики мають аналоговий вихід, тому для їх використання в цифрових мережах потрібні аналогово-частотні перетворювачі.

У роботі [9] розглядається волоконно-оптичний датчик температури (рис. 1.16), в якому використовується явище залежності інтенсивності розсіяних компонентів лазерного випромінювання від температури. Волоконно-оптичний

датчик температури може контролювати температуру в протяжному оптичному кабелі.

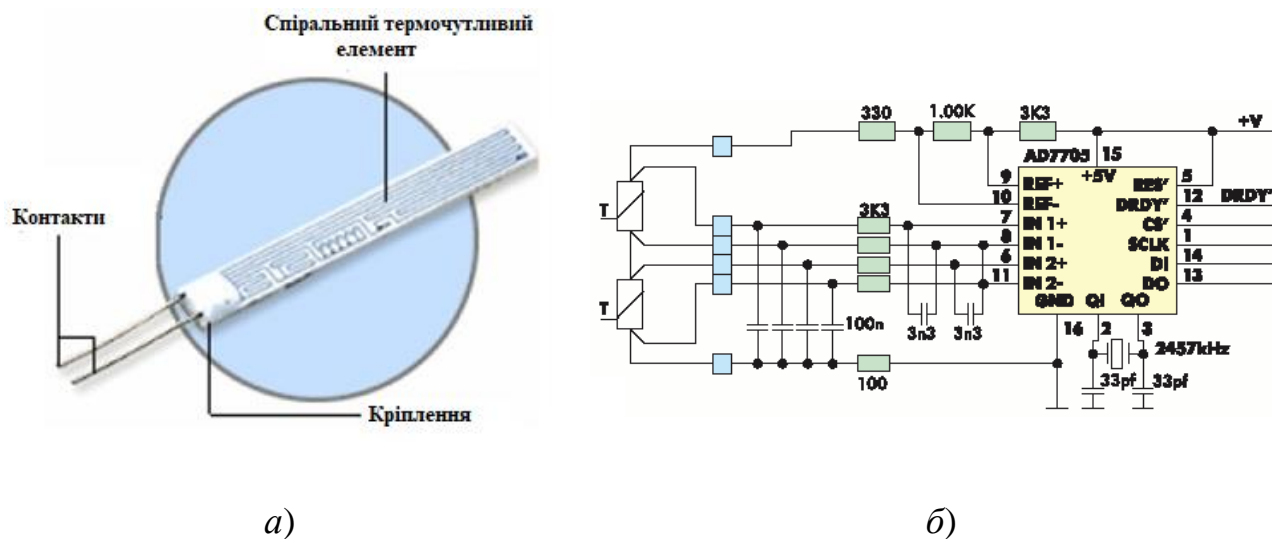


Рисунок 1.15 – Резистивний датчик температури *а)*  
та схема його підключення к цифрову мережу *б)*

Крім того, такі датчики можуть працювати в області високих температур, однак вони мають досить складну конструкцію, протяжні розміри і складну схему перетворення оптичного випромінювання декількох довжин хвиль електричний аналоговий сигнал, а потім і цифровий.

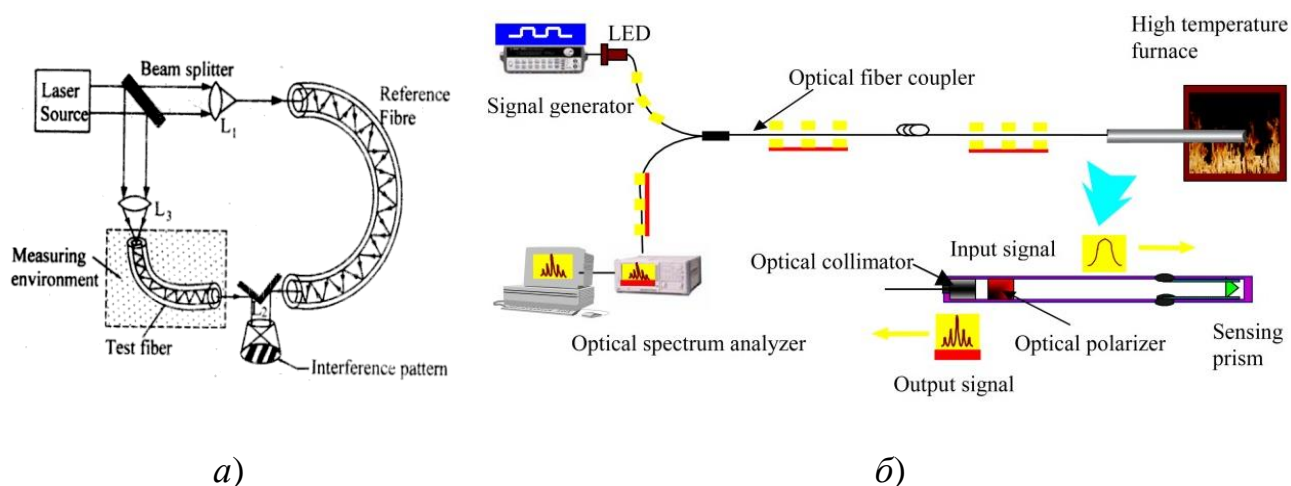


Рисунок 1.16 – Волоконно-оптичний датчик температури *а)*  
та схема його використання *б)*

У роботі [11] розглядається мікроскопічний датчик температури на основі МОН польового транзистора (рис. 1.17), в якому використовується явище залежності електричних характеристик польового транзистора від температури.

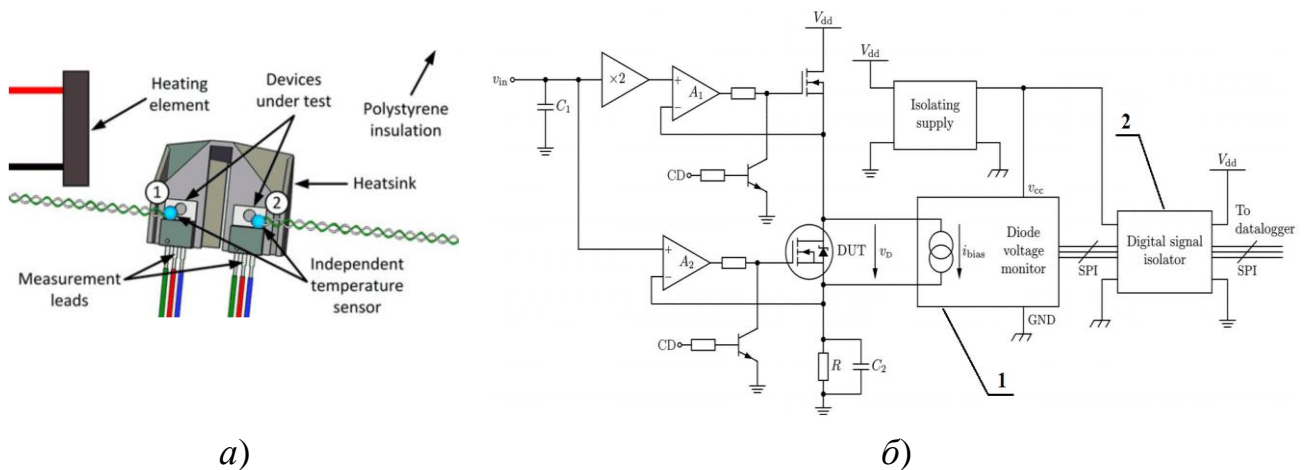


Рисунок 1.17 – Мікроскопічний датчик температури на базі МОН ПТ [11] *a)* та схема його використання в цифрових сенсорних мережах *б)*

Датчик температури на основі МОН польового транзистора для роботи в цифрових сенсорних мережах обладнується блоком корекції лінійності вихідної характеристики (позиція 1 на рис. 1.17, *б)* та аналогово-частотним перетворювачем (позиція 2 на рис. 1.17, *б)*. Основними перевагами такого датчика є його мініатюрність та простота впровадження чутливого елемента у сучасні мікропроцесорні пристрої, що дозволяє проводити вимірювання температури безпосередньо кристала процесора. Однак, крім необхідності оснащувати такі датчики блоками корекції лінійності вихідної характеристики та амплітудно-частотного перетворювача такий датчик має істотний недолік: його показання дуже чутливі до зовнішніх впливів, таких як електромагнітні поля та іонізуюче випромінювання.

Як зазначалося у підрозділі 1.3, використання датчиків температури в цифрових сенсорних мережах Інтернету речей висуває особливі вимоги до характеристик датчиків [12, 13]. Вони повинні бути недорогими, споживати мало енергії, мати достатню чутливість і лінійну вихідну характеристику. Крім того, при роботі в цифрових сенсорних мережах, аналогові датчики потребують підсилення, аналогово-частотному перетворенні для подальшої обробки сигналу, а електричні параметри кожного елемента допоміжних схем змінюються при зміні температури, що вносить спотворення в корисний сигнал. Тому останнім часом особливий інтерес представляють датчики температури з частотним виходом [14], які позбавлені цих недоліків і не потребують підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів, дозволяють усунути паразитний вплив вимірювальних каналів один на одного і нестабільність в роботі. Метою даної роботи є експериментальна



перевірка можливості використання одноперехідного транзистора в схемі релаксаційного генератора в якості датчика температури придатного для використання в цифрових сенсорних мережах.

Висновки: Більшість сучасних конструкцій датчиків температури для роботи в цифрових сенсорних мережах вимагають наявності блоків корекції лінійності вихідної характеристики та аналогово-частотного перетворення, крім того, вони досить дорогі через використання спеціальних передових технологій. Заощадити ресурси можна, якщо використовувати конструкцію датчика з частотним виходом на основі серійних промислових транзисторів з мінімальною кількістю елементів.

## 1.6 Висновки

Подальший розвиток мереж IoT пов'язаний із заходами щодо зниження енергоспоживання окремими складовими системи, особливо сенсорними мережами.

При використанні в цифрових сенсорних мережах датчик повинен споживати мало енергії, бути мініатюрним, тому складатися з мінімальної кількості елементів, та при цьому він повинен мати достатню чутливість, мати лінійну вихідну характеристику, а також бути стабільним до дії зовнішніх сторонніх впливів. Використання в цифрових мережах набагато вигідніше використовувати датчики з частотним виходом, що дозволяє обійтися без підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів. Це економить матеріальні ресурси і споживану енергію.

Більшість сучасних конструкцій датчиків температури для роботи в цифрових сенсорних мережах вимагають наявності блоків корекції лінійності вихідної характеристики та аналогово-частотного перетворення, крім того, вони досить дорогі через використання спеціальних передових технологій. Заощадити ресурси можна, якщо використовувати конструкцію датчика з частотним виходом на основі серійних промислових транзисторів з мінімальною кількістю елементів.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРИ

Як було зазначено в Розділі 1 за останні два роки розроблені новітні конструкції датчиків температури, однак, використання новітніх технологій вимагає залучення значних інтелектуальних та матеріальних ресурсів, що значно збільшує вартість датчиків, а розширення сенсорних мереж накладає жорсткі вимоги на вартість та енергоспоживання датчиків. Крім того, переважно усі датчики температури мають аналоговий вихід (струм чи напруга), тобто для їх поєднання з цифровими сенсорними мережами потрібен аналогово-цифровий перетворювач, який неминуче вносить спотворення в показники датчика, а сама його наявність вимагає додаткових витрат ресурсів і енергії. Тому особливий інтерес для цифрових бездротових сенсорних мереж представляють датчики з частотним виходом. Метою даної роботи є експериментальна перевірка можливості використання одноперехідного транзистора в схемі релаксаційного генератора в якості датчика температури придатного для використання в цифрових сенсорних мережах.

### 2.1 Дослідження параметрів термочутливого елемента

Використання датчиків температури в цифрових сенсорних мережах Інтернету речей висуває особливі вимоги до характеристик датчиків [12, 13]. Вони повинні бути недорогими, споживати мало енергії, мати достатню чутливість і лінійну вихідну характеристику. Крім того, при роботі в цифрових сенсорних мережах, аналогові датчики потребують підсилення, аналогово-частотному перетворенні для подальшої обробки сигналу, а електричні параметри кожного елемента допоміжних схем змінюються при зміні температури, що вносить спотворення в корисний сигнал. Тому останнім часом особливий інтерес представляють датчики температури з частотним виходом [14], які позбавлені цих недоліків і не потребують підсилювача і аналогово-частотних перетворювачів, дозволяють усунути паразитний вплив вимірювальних каналів один на одного і нестабільність в роботі.

Електричні параметри будь-якого транзистора залежать від температури, тому біполярні і польові транзистори часто використовуються як датчики температури. Однак, серед транзисторних датчиків особливий інтерес представляють транзистори з негативним диференціальним опором. Такі прилади

мають важливі застосування в розробці сенсорів, оскільки параметри ділянки вольт-амперної характеристики з негативним опором дуже чутливі до впливу зовнішніх факторів. У роботі [15] були описані принципи роботи одноперехідного транзистора (ОПТ), який має *S*-типу вольт-амперну характеристику. У такого транзистора є унікальні властивості, які дозволяють створювати на його основі високочутливі сенсори, більш прості і економічні, ніж аналогічні пристрої на діодах, польових та біполярних транзисторах.

Одно перехідні транзистори випускаються серійно провідними виробниками, такими як Motorola [16], Philips [17], General Electric Solid State [18].

Одноперехідний транзистор має *S*-образну вольт-амперну характеристику, яка зображена на рис. 2.1 при різних температурах.

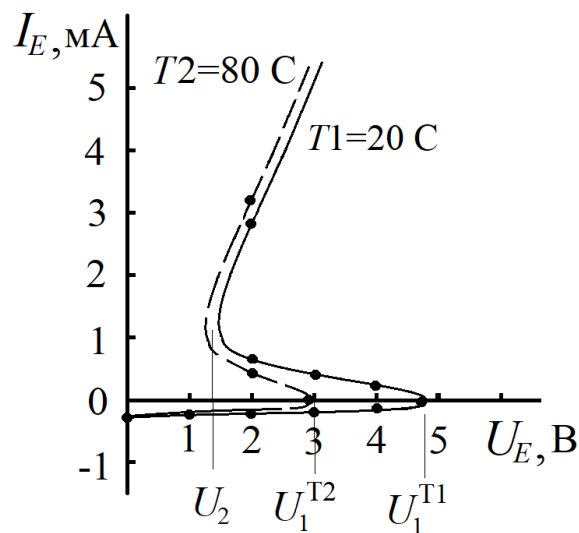


Рисунок 2.1 – Вольт-амперна експериментальна характеристика ОПТ при різних температурах

*S*-образна вольт-амперна характеристика означає, що існує певна напруга переключення  $U_1$  (рис. 2.1) при якій транзистор стрибкоподібно переходить з закритого стану у відкритий, в якому навіть при зростанні струму напруга на емітері буде зменшуватися до залишкової напруги  $U_2$ , яка характеризує відкритий стан транзистору при якому скрізь транзистор протікає емітерний струм.

Параметри одноперехідного транзистора, як і будь-якого напівпровідникового приладу, залежать від температури тому що зі зростанням температури концентрація носіїв заряду у напівпровіднику зростає по експоненті. Найбільш чутливим до температури виявляється напруга включення  $U_1$ , тому що вона визначається відносно невеликим значенням концентрації носіїв заряду в базі

у вимкненому стані, і при зростанні температури ця концентрація істотно зростає, опір бази транзистора зменшується, що призводить до зменшення значення напруги включення  $U_1$ . Залишкова же напруга  $U_2$  визначається концентрацією носіїв в базі у включеному стані, яка має відносно велике значення тому слабо залежить від температури за рахунок зменшення рухливості носіїв заряду.

Таким чином ОПТ є чутливим до зміни температури, та його можна використовувати в якості сенсора температури навіть без зміни його конструкції, однак такий датчик має аналоговий вихід.

Напруга на емітері ОПТ складається з суми напруги на  $p-n$ -переході транзистора  $U_{p-n}$  та напруги на нижній частині бази  $U_B$ :

$$U_E = U_{p-n} + U_B. \quad (2.1)$$

На рис. 2.1 зображена експериментальна вольт-амперна характеристика одноперехідного транзистора. Якщо  $U_E = U_B = U_1$  напруга на  $p-n$ -переході буде дорівнювати нулю, однак цей стан рівноваги є нестійким, внаслідок різних флуктуацій, наприклад теплових, опір нижньої частини бази може виявитися трохи меншим свого стаціонарного значення. Напруга  $U_B$  при цьому також зменшиться, що приведе до зміни балансу напруги  $U_E > U_B$ , емітерний перехід виявиться зміщеним в прямому напрямку і буде постачати в базу дірки.

Під дією електричного поля в базі, інжектвані з емітера до бази дірки рухаються до нижньої частини бази, внаслідок чого її опір ще більш зменшується. Це подальше зменшення опору нижній частині бази призводить до подальшого зменшення напруги  $U_B$  і збільшення  $U_{p-n}$  (2.1). Внаслідок цього інжекція носіїв і струм через  $p-n$ -перехід продовжують рости. Такий процес призводить до лавинного наростання струму через  $p-n$ -перехід та зменшенню падіння напруги на послідовно включених опорах  $p-n$ -переходу і нижній частині бази. Робоча точка стрибкоподібно переходить до точки  $C$ . У колі встановлюється позитивний струм.

Виключення транзистора відбувається за допомогою подачі негативного імпульсу на транзистор. Таким чином, при перемиканні система переходить з одного стійкого стану в інше.

Таким чином, емітерна вольт амперна характеристика ОПТ визначається двома характерними точками: напругою включення  $U_1$ , при якому струм різко зростає і залишковою напругою  $U_2$  на емітері, коли транзистор знаходиться у включеному стані. Суттєвою відмінністю  $S$ -характеристики одноперехідного



транзистора від аналогічних характеристик інших приладів є те, що включення відбувається при практично нульових токах емітера.

Зміна температури впливає практично на всі параметри ОПТ, однак найбільш чутливим до температури параметром є напруга включення  $U_1$ :

$$U_1 \approx I_B \cdot r_{\text{ВИМ}}, \quad (2.2)$$

де  $I_B$  – струм між базами через канал транзистора, А;

$r_{\text{ВИМ}}$  – внутрішній опір області бази між емітером та першою базою у вимкненому стані ОПТ, який сильно залежить від концентрації носіїв заряду у базі, Ом.

Зміна температури впливає практично на всі параметри ОПТ, однак найбільш чутливим до температури параметром є напруга включення  $U_1$  (2.2), оскільки вона визначається малими струмами вимкненому стані ОПТ, коли опір бази між емітером та першою базою у включеному стані ОПТ  $r_{\text{ВИМ}}$  є великим через мали концентрацій носіїв зарядів в базі. При підвищенні температури значно збільшується концентрація носіїв заряду в базі, що істотно зменшує опір нижній частині бази  $r_{\text{ВИМ}}$ . Це призводить до відповідного зменшення напруги включення  $U_1$ .

Остаточна напруга  $U_2$  практично не змінюється зі зміненням температури (рис. 2.1). Це пов'язано з тим, що остаточна напруга ОПТ визначається відносно малим опором бази у включеному стані ОПТ

$$U_2 \approx I_E \cdot r_{\text{ВКЛ}}, \quad (2.3)$$

де  $I_E$  – емітерний струм ОПТ, А;

$r_{\text{ВКЛ}}$  – внутрішній опір області бази між емітером та першою базою у включеному стані ОПТ, який слабо залежить від концентрації носіїв заряду у базі, але сильно залежить від рухливості носіїв заряду, Ом.

Для експериментальних досліджень були використані три серійних промислових ОПТ типу КТ117. Вольт-амперні характеристики ОПТ були виміряні на лабораторній установці (рис. 2.2, а). На зразки подавалося напруга від джерела постійного струму Б5-44А. Напруга та струм вимірялися за допомогою комбінованих цифрових приладів Щ4300. Підбір опорів здійснювався за допомогою магазину опорів КМС-6. Для контролю напруги та струмів

використовувалися стрілочні комбіновані прилади Ц4342.



а)

б)

Рисунок 2.2 – Лабораторна установка для вимірювання вольт-амперних характеристик ОПТ а) та лабораторна піч б)

Для дослідження залежності параметрів вольт-амперних характеристик від температури зразки нагрівалися в лабораторній печі, показаній на рис. 2.2, б).

Характеристики приладів, які використовувалися в установці для вимірювання вольт-амперних характеристик ОПТ представлені у Табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики приладів лабораторної установки рис. 2.2 для вимірювання вольт-амперних характеристик ОПТ

№	Найменування	Тип	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка
1	Комбінований цифровий прилад	Ц4300	2000 В	0,1 мВ	0,1 мВ
2	Комбінований цифровий прилад	Ц4300	20 А	0,1 мкА	0,1 мкА
3	Джерело постійного струму	Б5-44А	30 В	0,1 В	0,1 В
4	Магазин опорів	КМС-6	9999,9 Ом	0,1 Ом	0,02 Ом
5	Термометр спиртовий	СТ-100	100 С	1 С	1 С

Спочатку були виміряні вольт-амперні характеристики при температурі  $T_1 = 20$  С, потім транзистор нагрівався у лабораторній печі (рис. 2.2, б) до  $T_2 = 80$  С з інтервалом 10 С.

На рис. 2.1 показані результати вимірювання вольт-амперних характеристики ОПТ при кімнатній температурі і при температурі  $T_1 = 20$  С та  $T_2 = 80$  С. З рисунку видно, що напруга включення  $U_1$  суттєво зменшується при зростанні температури. Разом з тим добре видно, що остаточна напруга  $U_2$  практично не змінюється при зростанні температури.

На Рис. 2.3 показано експериментальний графік залежності напруги включення  $U_1$  від температури.

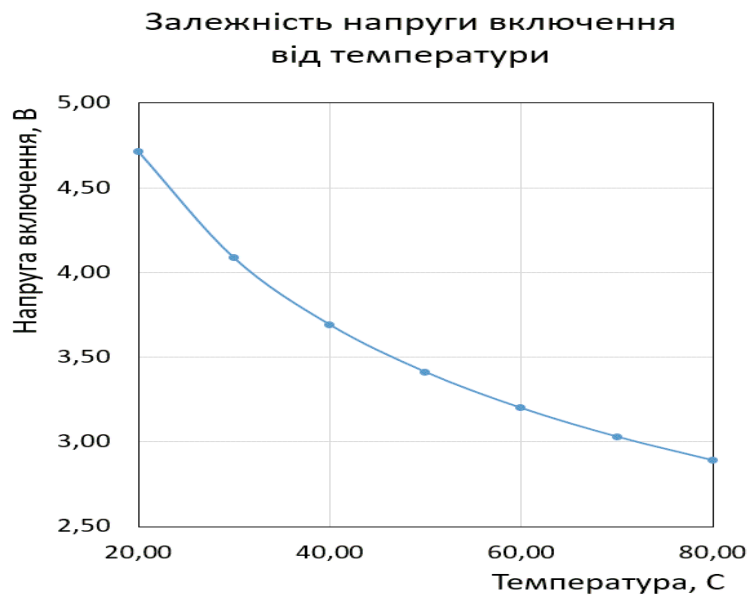


Рисунок 2.3 – Залежність напруги включення ОПТ  $U_1$  від температури

З рисунку 2.3 видно, що при зростанні температури від 20 С до 80 С напруга включення  $U_1$  зменшується від 4,7 В до 2,9 В.

Температурна чутливість такого датчика характеризується величиною

$$\beta = \frac{\Delta U}{\Delta T}, \quad (2.4)$$

де  $\Delta U$  – зміна напруги, В;

$\Delta T$  – зміна температури, С.

Температурна чутливість ОПТ складає  $\beta = 0,03$  В/С.

Висновок: ОПТ є чутливим до зміни температури, однак такий датчик має аналоговий вихід, та його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків корекції та аналогово-частотного перетворення.

## 2.2 Аналіз схем частотних датчиків температури

Як було зазначено в підрозділі 1.3, однією з можливостей зменшення кількості елементів детектора температури є використання сенсора температури з

частотним виходом. У цьому випадку, датчик з частотним виходом не потребує аналогово-частотного перетворювача. Це дає економію енергії порядку сотень міліват.

В даний час проводяться інтенсивні дослідження по створенню температурних перетворювачів з частотним виходом.

Так в роботі [19] описаний температурний датчик з частотним виходом на акустичних хвилях. Конструктивна схема такого датчика представлена на рис. 2.4, а. У зазначеному датчику використовується явище залежності частоти поверхневих акустичних хвиль у спеціальній комірці від температури. В якості чутливого елемента в цьому датчику температури використано акустичну лінію складної конструкції, яка зроблена з багатокомпонентної багатошарової структури. В такому датчику температури з частотним виходом, по змінненню частоти акустичних хвиль можна вимірювати найменші зміни температури з точністю аж до 0,001 С. Однак, цей датчик має великі розміри і в його конструкції використовуються складні спеціальні компоненти, тому він не підходить до використання в цифрових сенсорних мережах.

В роботі [20] описаний температурний датчик з частотним виходом на основі автогенератора. Схема такого датчика представлена на рис. 2.4, б.

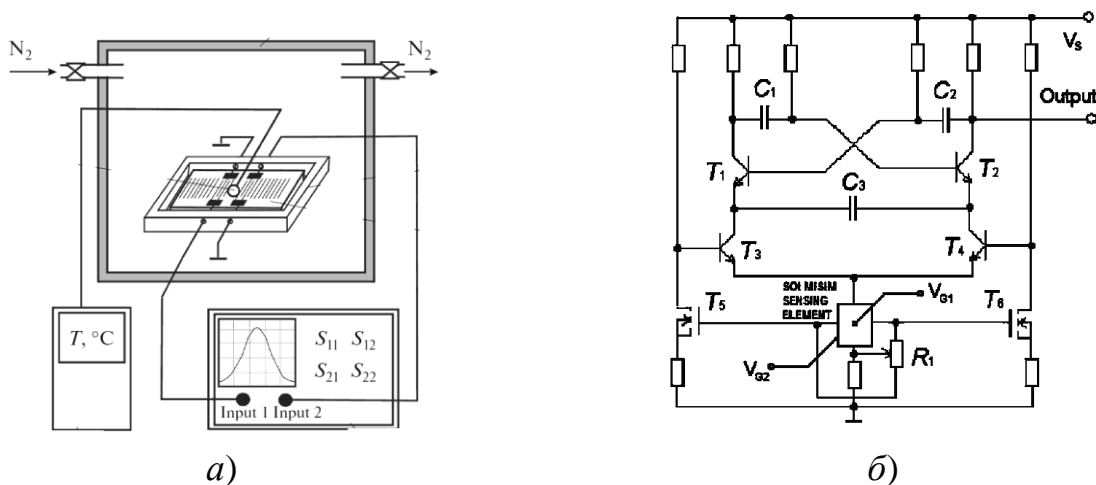


Рисунок 2.4 – Схеми датчиків температури з частотним виходом:  
з чутливим елементом на основі акустичної лінії [19] а)  
та на основі автогенератора [20] б)

У зазначеному датчику використовується явище залежності частоти поверхневих акустичних хвиль у спеціальній комірці від температури. В якості чутливого елемента в цьому датчику температури використано особливий



польовий транзистор з двома затворами, який має складну напівпровідник-оксид-ізолятор (SOI MISIM) структуру (див. рис. 2.4, б). В такому датчику температури з частотним виходом, чутливий до температури польовий транзистор збуджує коливання автогенератора. Перевагою такого датчика є лінійна залежність вихідної частоти від температури. Основним недоліком такого детектора є сильна залежність його чутливості від напруги живлення. Так при нарузі живлення 6 В його чутливість складає 6 Гц/С, а при 10 В зростає до 18 Гц/С. З рис. 2.4, б видно, що в схемі автогенератора застосовуються чотири додаткових біполярних транзистора та, два польових транзистора і десятків резисторів, а частота коливань автогенератора задається спеціально виготовленим польовим транзистором з двома затворами, який має складну напівпровідник-оксид-ізолятор. Для виготовлення такого чутливого елемента необхідні спеціальні технології та наявність відповідного виробництва, що значно здорожує датчик. З урахуванням усіх цих недоліків, можна зробити висновок, що такий датчик не підходить для використання в цифрових сенсорних мережах.

Таким чином, сучасні конструкції температурних сенсорів з частотним виходом в якості чутливих елементів використовують спеціально виготовлені унікальні пристрої. Метою цієї роботи є дослідження можливості перетворення температури в частоту на базі серійних складових.

### 2.2.1 Теоретична модель дослідження датчика температури

З точки зору економії ресурсів самої кращою схемою генератора є релаксаційний генератор на одному одноперехідному транзисторі. Такі генератори давно використовуються в техніці, наприклад, в системах плавного регулювання освітленості ламп розжарювання. Справа в тому, що одноперехідний транзистор має S-образну вольт-амперну характеристику (рис. 2.1), тобто існує певна напруга переключення  $U_1$  при якій транзистор стрибкоподібно переходить з закритого стану у відкритий, в якому навіть при зростанні струму розрядки конденсатора напруга на емітері буде зменшуватися до напруги  $U_2$ , коли транзистор закриється. Такий вид вольт-амперної характеристики призводить до того, що досить включити в коло емітера конденсатор  $C$  (рис. 2.5) з певним часом зарядки, і ми отримаємо коливання напруги заданої частоти. завдяки тому що конденсатор  $C$  буде заряджатися від джерела живлення і розряджатися через транзистор (рис. 2.5). Резистор  $R$  обмежує струм зарядки конденсатора  $C$ , резистор  $R_1$  є навантажувальним, а резистор  $R_2$  обмежує струм між базами  $B_1$  та  $B_2$ .

При підключенні напруги живлення  $+E$  конденсатор  $C$  починає заряджатися

через опір  $R$  до напруги включення  $U_1$ . Коли напруга на емітер досягне напруги включення  $U_1$ , транзистор відкривається і конденсатор починає розряджатися через емітерний перехід транзистора до напруги  $U_2$ . При напрузі  $U_2$  транзистор закривається, а конденсатор  $C$  починає знову заряджатися через опір  $R_3$  до напруги  $U_1$ , тобто процес повторюється.

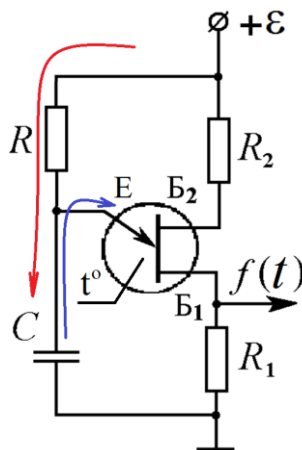


Рисунок 2.5 – Датчика температури з частотним виходом на одному ОПТ в схемі релаксаційного генератора

Змінний корисний сигнал можна знімати з резистора  $R_1$ . Імпульсна вихідна напруга може бути виміряна як безпосередньо на конденсаторі, так і на резисторі  $R_1$ .

Побудована в роботі теоретична модель базується на наступних теоретичних припущеннях. Період коливань релаксаційного генератора на одному одноперехідному транзисторі практично дорівнює часу зарядки конденсатора  $C$  через задаючий резистор  $R$  (рис. 2.5):

$$T = RC \cdot \ln \left( \frac{\varepsilon - U_2}{\varepsilon - U_1} \right), \quad (2.5)$$

де  $\varepsilon$  – напруга живлення (рис. 2.1), В;

$U_2$  – остаточна напруга (рис. 2.1), В;

$U_1$  – напруга включення (2.2), В;

$R$  – опір, який обмежує струм зарядки конденсатора, Ом;

$C$  – електроємність конденсатора, Ф.

Таким чином, у релаксаційному генераторі збуджуються коливання з частотою

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{R_3 C} \ln \left( \frac{\varepsilon - U_1}{\varepsilon - U_2} \right) \approx \frac{I}{C(U_1 - U_2)}, \quad (2.6)$$

з амплітудою напруги на конденсаторі

$$U_m = U_1 - U_2, \quad (2.7)$$

де  $I$  – струм зарядки конденсатора через резистор  $R$ , А.

З (2.6) видно, що вихідна частота генератора не залежить від напруги живлення.

Підбором ємності конденсатора  $C$  можна отримувати різну форму імпульсу: від пілкоподібної до синусоїди.

Як було сказано в підрозділі 2.1, остаточна напруга  $U_2$  (2.3) не залежить від температури, а напруга включення  $U_1$  (2.2) буде зменшуватися при збільшенні температури (рис. 2.3). При цьому відповідно до теоретичної моделі вихідної характеристики датчика (2.6) частота коливань генератора буде збільшуватися зі зростанням температури.

### 2.2.2 Комп'ютерна експериментальна модель дослідження датчика температури

Експериментальна перевірка теоретичної моделі (2.6) залежності вихідної частоти отриманого одно-транзисторного генератора від температури нагріву здійснювалася за допомогою комп'ютерної моделі, код якої написано на мові С+ (див. Додаток Б) з використанням параметрів чутливого елемента на базі ОПТ типу КТ117, отриманих в підрозділі 2.1 та з роботи [21].

У схемі генератора був використаний конденсатор електроємність якого складала  $C = 0,01$  мкФ, резистор  $R = 10$  кОм та резистор  $R_2 = 25$  кОм. Програма моделювала приєднання в таку схему генератора досліджуваній ОПТ, який нагрівався від 0 С до 80 С. Тестування коду проводилося методом порівняння даних нашого експерименту з даними роботи [21].

Для побудови графіку було використано бібліотеку gnuplot.

На рис. 2.7 показана отримана експериментальна залежність вихідної частоти

від температури для генератора на одному ОПТ.

Чутливість такого одно-транзисторного генератора в зазначеному діапазоні температур становить 270 Гц/С. Споживана потужність такого одно-транзисторного генератора становить близько 18мВт, що у 5 разів менше, ніж споживання найбільш економічною збіркою LM35+LM331 фірми Texas Instruments [6].

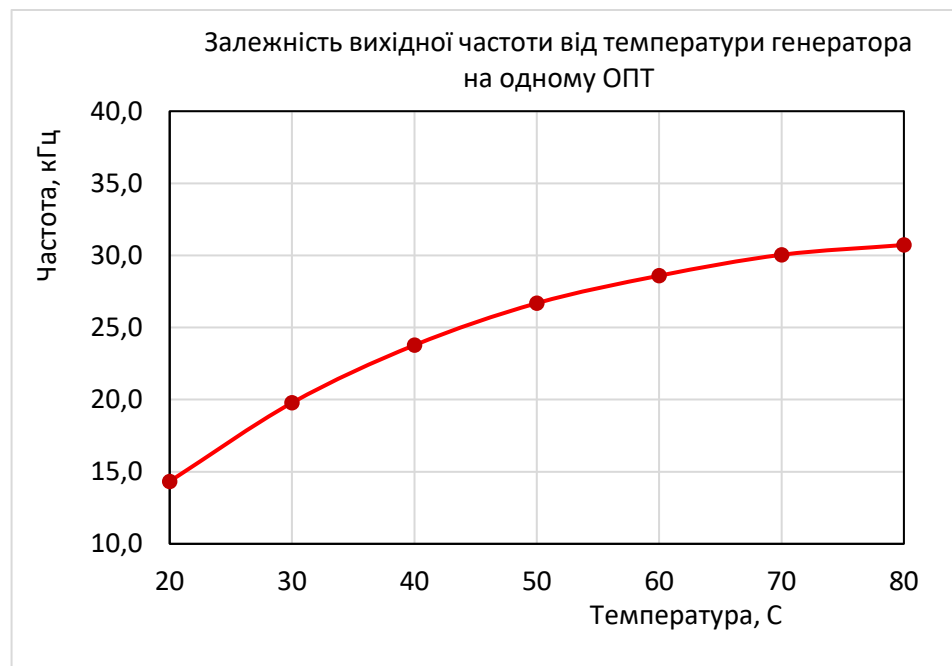


Рисунок 2.7 – Залежність вихідної частоти генератора на одному ОПТ від температури

Однак, з рис. 2.7 видно, що вихідна характеристика має нелінійний характер, тому такий датчик не може у пряму використовуватися в цифрових сенсорних мережах Інтернету речей, бо вимагає додаткових приладів корекції лінійності вихідної характеристики.

Висновок: Релаксаційний генератор на базі одного ОПТ змінює вихідну частоту при зміні температури, однак він має недостатню чутливість та його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків частотних помножувачів та корекції лінійності вихідної характеристики для його використання в цифрових сенсорних мережах.

### 2.3 Висновки

ОПТ є чутливим до зміни температури, та його можна використовувати в



якості сенсора температури навіть без зміни його конструкції, однак такий датчик має аналоговий вихід, та його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків корекції та аналогово-частотного перетворення.

Генератор на базі одного ОПТ є чутливим до зміни температури, та його можна використовувати в якості сенсора температури з частотним виходом, однак його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків корекції лінійності вихідної характеристики.

### 3 ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Як було зазначено у Розділі 1, до датчиків, які використовують у цифрових сенсорних мережах, пред'являються особливі вимоги. Датчик температури на одному ОПТ у схемі релаксаційного генератора, результати дослідження яких представлені в Розділі 2, вже задовольняє деяким з них: він має частотний вихід, зібраний на одному стандартному промисловому транзисторі, тому він недорогий і споживає мало енергії. Однак він має два суттєвих недоліка, які перешкоджають його використанню в цифрових сенсорних мережах: нелінійну вихідну характеристику і недостатню чутливість.

Для усунення цих недоліків зазвичай застосовують спеціальні блоки корекції лінійності вихідної характеристики, підсилювачі та блоки корекції впливу радіаційного опромінення. У випадку релаксаційного генератора, виправити ці недоліки можна додаванням в схему додаткових активних елементів.

Справа в тому, що в схемі релаксаційного генератора (рис. 2.5) Резистор  $R$  задає струм зарядки конденсатора, резистор  $R_1$  є навантажувальним, а резистор  $R_2$  обмежує струм між базами  $B_1$  та  $B_2$ . Це постійні резистори на які не діють жодні зовнішні впливи. Навіть дія температури виявляється дуже малою. Частота генератора може змінюватися, якщо замість якогось із них підключити чутливий до певного впливу елемент.

С точки зору економії ресурсів польові транзистори споживають найменшу потужність з усіх активних елементів і вони достатньо чутливі до дії зовнішніх впливів, тому краще використовувати саме їх для корекції характеристик генератора.

#### 3.1 Вплив обмежуючого резистора в колі бази на частоту генератора

Резистор  $R_2$  обмежує струм між базами транзистора  $I_B$ , якій визначає напругу включення ОПТ  $U_1$ :

$$U_1 \approx I_B \cdot r_{\text{вickl}}, \quad (3.1)$$

де  $r_{\text{вickl}}$  – великий внутрішній опір області напівпровідника між базами у виключеному стані ОПТ, коли май же немає носіїв заряду у базі.

Якщо зменшити міжбазовий струм  $I_B$  за рахунок збільшення опору  $R_2$ , то це приведе до зменшення напруги включення  $U_1$ , а значить, відповідно до теоретичної моделі вихідної характеристики датчика (2.6) частота коливань генератора  $f$  буде збільшуватися.

Експериментальні дослідження впливу обмежуючого резистора  $R_2$  на вихідну частоту генератора на базі одного транзистора здійснювалася з використанням комп'ютерної моделі, код якої написано на мові C+ (див. Додаток Б) з використанням параметрів чутливого елемента на базі ОПТ типу КТ117, отриманих в підрозділі 2.1 та з роботи [21], в якій опір  $R_2 = 25$  кОм було замінено на опір  $R_2 = 30$  кОм.

На рис. 3.1 показана вихідна характеристика частотного датчика температури при двох різних значеннях обмежуючого резистору  $R_2$ .

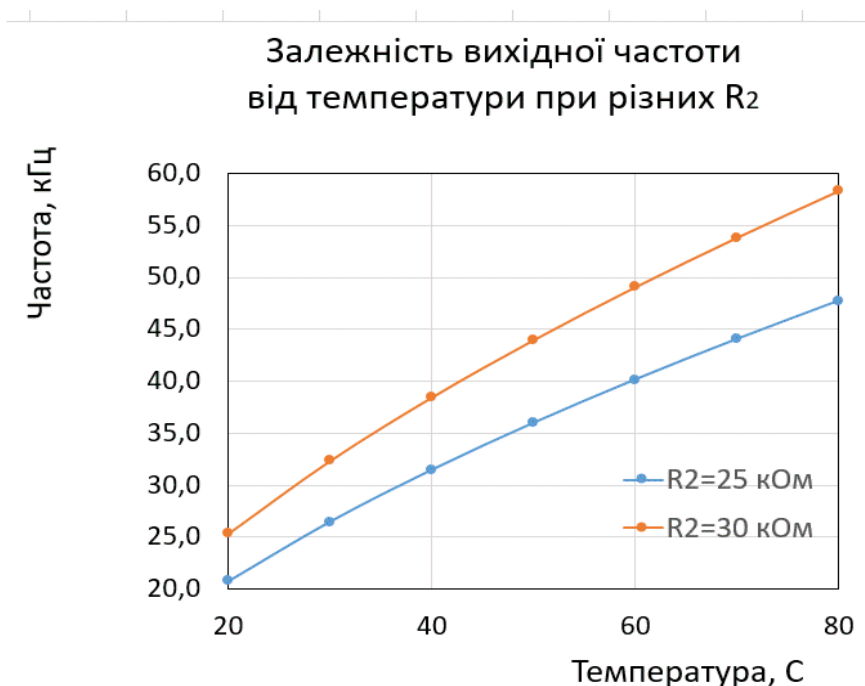


Рисунок 3.1 – Вихідна характеристика частотного датчика температури на базі ОПТ при різних значеннях обмежуючого резистору

З рис. 3.1 видно, що частота коливань генератора при більшому опорі  $R_2$  збільшується.

Висновок: Збільшити вихідну частоту датчика температури на одному ОПТ в схемі релаксаційного генератора можна за рахунок збільшення опору обмежуючого резистора  $R_2$ .

### 3.2 Вплив задаючого струм резистора в колі емітера на частоту генератора

По-перше, задаючий резистор  $R$  в колі емітера задає струм зарядки  $I$  конденсатора  $C$ , якій визначає вихідну частоту релаксаційного генератора (2.6).

По-друге, цей же резистор  $R$  задає також емітерний струм  $I_E$  ОПТ, тому впливає й на остаточну напругу ОПТ

$$U_2 \approx I_E \cdot r_{\text{вкл}}, \quad (3.2)$$

де  $I_E$  – остаточний емітерний струм ОПТ;  $r_{\text{вкл}}$  – внутрішній опір області бази між емітером та першою базою у включеному стані ОПТ, коли велика кількість носіїв заряду у базі.

Якщо зменшити опір резистора  $R$  в колі емітера, то це приведе до збільшення частоти  $f$  генератора за рахунок двох факторів: по-перше, за рахунок збільшення струму зарядки  $I$  конденсатора (2.6), по-друге, за рахунок збільшення емітерного струму  $I_E$  ОПТ, який збільшує остаточну напругу  $U_2$  ОПТ (3.2), та відповідно й частоту (2.6).

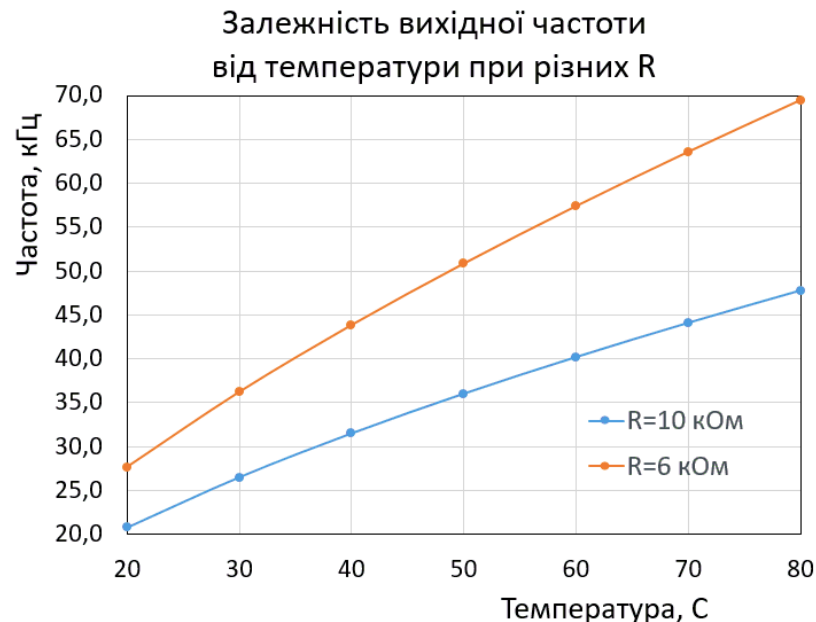


Рисунок 3.2 – Вихідна характеристика частотного датчика температури на базі ОПТ при різних значеннях резистора зарядки в колі емітера

Експериментальні дослідження впливу задаючого резистора  $R_2$  на вихідну частоту генератора на базі одного транзистора здійснювалася з використанням комп'ютерної моделі, код якої написано на мові С+ (див. Додаток Б) з

використанням параметрів чутливого елемента на базі ОПТ типу КТ117, отриманих в підрозділі 2.1 та з роботи [21], в якій опір  $R = 10$  кОм було замінено на опір  $R = 6$  кОм.

На рис. 3.2 показана вихідна характеристика частотного датчика температури при двох різних значеннях задаючого резистору  $R$ .

З рис. 3.2 видно, що частота коливань генератора при меншому значенню опору резистора зарядки  $R$  збільшується.

Також з рис. 3.2 видно, що вихідна характеристика датчика стала більш лінійною. Це пояснюється тим, що струм через резистор  $R$  визначає два чинники залежності вихідної частоти від температури – це струм зарядки конденсатора і залишковий струм емітера від якого залежить залишкова напруга.

Висновок: Збільшити вихідну частоту та поліпшити лінійність вихідної характеристики датчика температури на одному ОПТ в схемі релаксаційного генератора можна за рахунок зменшення опору резистора в колі емітера  $R$ , який задає струм зарядки конденсатора.

### 3.3 Підвищення чутливості датчика температури з частотним виходом

Як було зазначено в підрозділі 2.2 релаксаційний генератор на одному ОПТ має недостатню чутливість для його використання в цифрових сенсорних мережах в якості датчика температури.

Однак, той факт, що частота релаксаційного генератора (2.6) залежить від величини опору обмежуючого резистора  $R_2$  в колі бази ОПТ, можна використовувати для збільшення чутливості частотного датчика температури. Як було зазначено в підрозділі 3.1, для цього необхідно, щоб опір  $R_2$  при підвищенні температури збільшувався. Збільшення опору  $R_2$  викликає зменшення струму між базами  $I_2$ , що згідно до співвідношення (3.1) призводить до зменшення напруги включення  $U_1$ .

Таким чином, для покращення характеристик датчика потрібен чутливий до температури елемент, струм через який зменшуватиметься при його нагріванні. В якості такого пристрою можна використати польовий транзистор з  $p$ - $n$ -переходом (ПТЗП). Справа в тому, що струм через такий ПТЗП зменшується при підвищенні температури.

Вбудований в транзистор  $n$ -канал є з'єднаним з металевим затвором через  $p$ - $n$ -перехід, на який подається зворотна напруга, тому для управління струмом каналу не потрібно жодного вхідного струму. Напруга на затворі створює



електричне поле, тим самим управляє протіканням струму скрізь канал. Тому такий транзистор споживає потужність всього близько 1 - 2 мВт. За цим параметром він підходить для роботи в цифрових сенсорних мережах.

Щоб не використовувати додаткових елементів в схемі транзистор підключають за двополюсною схемою, коли затвор транзистора коротко замикається зі своїм витком (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Схема двополюсного включення ПТЗП

В такому випадку напруга на затворі завжди буде постійною  $U_3 = 0$ . При певній невеликій напрузі струм через транзистор (струм стоку) досягає свого максимально можливого значення – це струм насичення  $I_{C1}$ .

При двополюсному включенні, струм насичення стоку транзистора визначається за формулою:

$$I_{C1} = A \cdot \mu \cdot n. \quad (3.3)$$

де  $A$  – постійна величина, Вт·с;

$\mu$  – рухливість носіїв заряду у каналі, м<sup>2</sup>/В/с;

$n$  – концентрація основних носіїв заряду, 1/м<sup>3</sup>.

Оскільки у ПТЗП затвор є з'єднаним з каналом через  $p$ - $n$ -перехід, то концентрація носіїв заряду  $n$  у каналі велика, і при нагріванні вона практично не буде змінюватися. Проте рухливість  $\mu$  носіїв заряду в каналі буде зменшується з ростом температури. Таким чином, струм насичення  $I_{C1}$  (3.3) транзистора буде зменшуватися при зростанні температури.

Експериментальні дослідження проводилися на серійному ПТЗП типу КП202. Були дослідженні три зразки. Вимірювання залежності струму насичення транзистора ПТЗП від температури проводилися на лабораторній установці (рис. 2.2) за допомогою приладів, які перераховані в Табл. 2.1. Результати вимірювань показані на рис. 3.4.

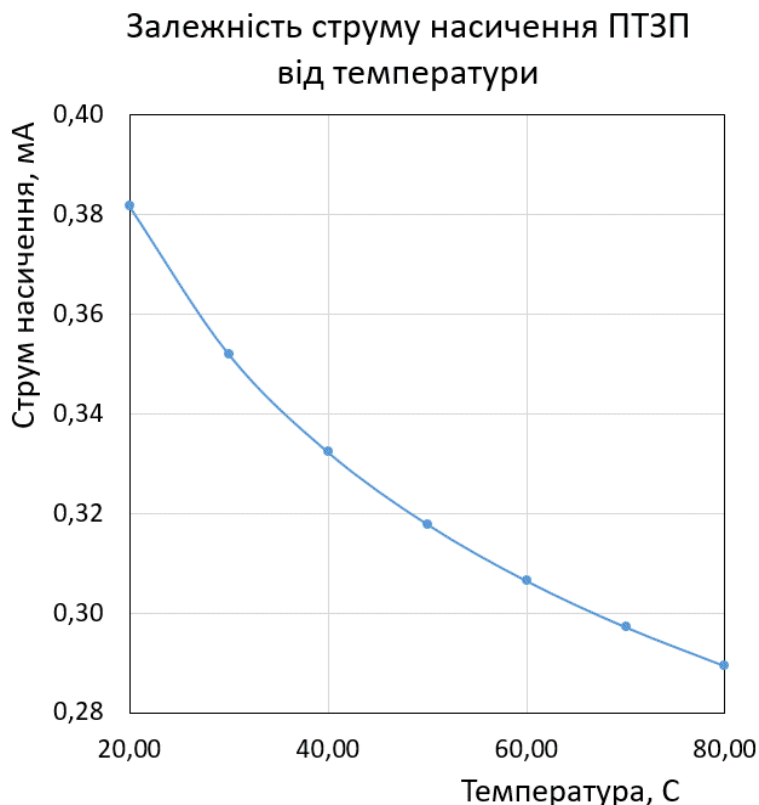


Рисунок 3.4 – Залежність струму насичення ПТЗП від температури

З рис. 3.4 видно, що зі збільшенням температури струм насичення ПТЗП зменшується, а залежність виявляється нелінійною. Температурна чутливість такого ПТЗП складає  $\beta = 0,0015 \text{ мА/С}$ .

Таким чином, експерименти показали, що струм насичення ПТЗП зменшується зі збільшенням температури, а транзистор ПТЗП може бути використаний в якості термочутливого елемента з цифрових сенсорних мережах, завдяки своєму мінімальному споживанню енергії, але його вихідна характеристика є нелінійною.

В нашій роботі [22] наведено результати досліджень частотного датчика температури отриманого підключенням за двополюсною схемою (рис 3.3) в коло бази ОПТ замість обмежуючого опору  $R_2$  вищезгаданий ПТЗП. Схема отриманого двох-транзисторного датчика температури при двополюсному включенні ПТЗП показана на рис. 3.5.

При такому підключенні напруга включення  $U_1$  (3.1) буде визначатися струмом насичення транзистора ПТЗП, тобто  $I_B = I_{C1}$ , який буде зменшуватися зі збільшенням температури за законом (рис. 3.4).

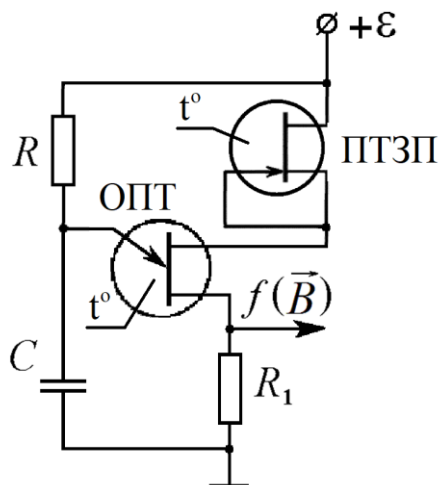


Рисунок 3.5 – Схема двох-транзисторного ОПТ+ПТЗП датчика температури

Для двох-транзисторної схеми ОПТ+ПТЗП частота коливань генератора згідно до теоретичної моделі (2.6) з урахуванням (3.1) буде мати вигляд:

$$f = \frac{I}{C(I_{C1} \cdot r_{\text{ВИМ}} - U_2)}, \quad (3.4)$$

де  $I_{C1}$  – струм насичення додаткового ПТЗП транзистора, А.

Таким чином, частота генератора з ростом температури збільшується з двох причин: зменшення опору нижній частині бази  $r_{\text{ВИМ}}$  одноперехідного транзистора ОПТ та зменшення струму насичення  $I_{C1}$  польового транзистора ПТЗП. Таким чином обидва активні елемента генератора будуть чутливими елементами, які додають вклад в чутливість датчика температури.

Експериментальна перевірка теоретичної моделі (3.4) залежності вихідної частоти отриманого двох-транзисторного генератора від температури нагріву здійснювалася за допомогою комп'ютерної моделі, код якої написано на мові С+ (див. Додаток Б) з використанням параметрів чутливого елемента на базі ОПТ типу КТ117, отриманих в підрозділі 2.1 та з роботи [21].

У схемі генератора електроємність конденсатора складала  $C = 0,01$  мкФ, а резистор мав опір  $R = 10$  кОм. Програма моделювала приєднання в таку схему генератора досліджуваній ОПТ, який нагрівався від 0 С до 80 С. Тестування коду проводилося методом порівняння даних нашого експерименту з даними роботи [21].

Для побудови графіку було використано бібліотеку gnuplot.

На рис. 3.7 показана експериментальна залежність вихідної частоти від

температури для двох-транзисторного ОПТ+ПТЗП датчика с конденсатором  $C = 0,01$  мкФ.

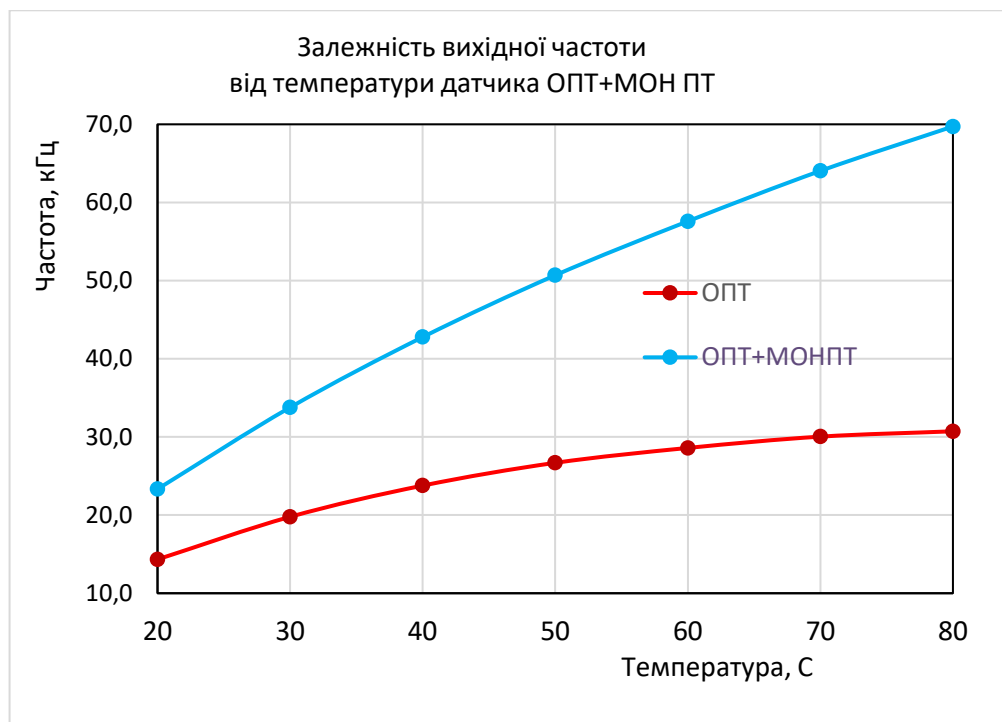


Рисунок 3.7 – Залежність вихідної частоти двох-транзисторного ОПТ+ПТЗП датчика від температури

Чутливість такого двох-транзисторного ОПТ+ПТЗП датчика в зазначеному діапазоні температур становить 770 Гц/С, що у 30 разів більше за чутливість датчика на автогенераторі з роботи [20]. Споживана потужність такого двох-транзисторного генератора становить близько 20 мВт, що у 4 рази менше, ніж споживання найбільш економічною збіркою LM35+LM331 фірми Texas Instruments [6].

Однак, з рис. 3.7 видно, що вихідна характеристика має нелінійний характер, тому такий датчик не може у пряму використовуватися в цифрових сенсорних мережах Інтернету речей, бо вимагає додаткових приладів корекції лінійності вихідної характеристики.

Висновок: Релаксаційний генератор на базі двох транзисторів ОПТ+ПТЗП є чутливим до зміни температури, та його можна використовувати в якості сенсора температури з частотним виходом, однак його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків корекції лінійності вихідної характеристики.

### 3.4 Покращення лінійності вихідної характеристики датчика температури з частотним виходом

Як було зазначено в підрозділі 2.2 релаксаційний генератор на одному ОПТ має нелінійну вихідну характеристику, що перешкоджає його використанню в цифрових сенсорних мережах в якості датчика температури.

Однак, той факт, що частота релаксаційного генератора (2.6) залежить від величини опору резистора  $R$  в колі емітера ОПТ, можна використовувати для збільшення чутливості частотного датчика температури. Як було зазначено в підрозділі 3.2, для цього необхідно, щоб опір  $R$  при підвищенні температури зменшувався. Зменшення опору  $R$  одночасно викликає збільшення струму зарядки конденсатора  $I$  в (2.6) та збільшення остаточного струму ОПТ, що згідно до співвідношення (3.2) призводить до збільшення остаточної напруги  $U_2$ . Обидва цих фактори згідно до формули теоретичної моделі (2.6) призводить до зростання вихідної частоти  $f$ . Як було зазначено в підрозділі 3.2, одночасна дія двох факторів на вихідну частоту датчика підвищує шанс покращення лінійності вихідної характеристики датчика.

Таким чином, для покращення характеристик датчика потрібен чутливий до температури елемент, струм через який збільшуватиметься при його нагріванні. В якості такого пристрою можна використати метал-оксид-напівпровідникового польовий транзистор (МОНПТ). Справа в тому, що струм через такий МОНПТ збільшується при підвищенні температури.

Вбудований в транзистор  $n$ -канал є ізольованим від металевого затвора шаром оксиду, тому для управління струмом каналу  $I_C$  не потрібно жодного вхідного струму. Напруга на затворі створює електричне поле, тим самим управляє протіканням струму скрізь канал. Тому такий транзистор споживає потужність всього близько 1 - 2 мВт. За цим параметром він підходить для роботи в цифрових сенсорних мережах.

Щоб не використовувати додаткових елементів в схемі транзистор підключають за двополюсною схемою, коли затвор транзистора коротко замикається зі своїм витокком (рис. 3.8).

В такому випадку напруга на затворі завжди буде постійною  $U_3 = 0$ . При певній невеликій напрузі струм через транзистор (струм стоку) досягає свого максимально можливого значення – це струм насичення  $I_C$ .



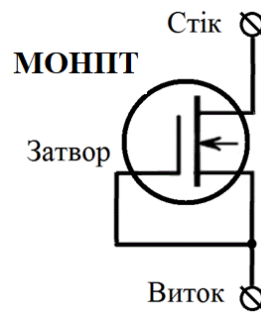


Рисунок 3.8 – Схема двополюсного включення МОПТ з ізольованим затвором

При двополюсному включенні, струм насичення стоку транзистора визначається за формулою:

$$I_C = A \cdot \mu \cdot n. \quad (3.5)$$

де  $A$  – постійна величина, Вт·с;

$\mu$  – рухливість носіїв заряду у каналі, м<sup>2</sup>/В/с;

$n$  – концентрація основних носіїв заряду, 1/м<sup>3</sup>.

Оскільки у МОПТ канал транзистора відділений від затвора шаром оксиду, тому концентрація носіїв заряду  $n$  у каналі мала. З ростом температури вона значно збільшується, а рухливість  $\mu$  з ростом температури хоча і зменшується, але це зменшення не компенсує суттєві збільшення концентрації.



Рисунок 3.9 – Залежність струму насичення МОПТ від температури

Таким чином, струму насичення  $I_C$  польового транзистора МОНПТ збільшується при зростанні температури, через сильне збільшення концентрація носіїв заряду  $n$  у каналі МОНПТ (3.5).

Експериментальні дослідження проводилися на серійному МОНПТ типу КП305. Були дослідженні три зразки. Вимірювання залежності струму насичення транзистора МОНПТ від температури проводилися на лабораторній установці (рис. 2.2) за допомогою приладів, які перераховані в Табл. 2.1. Результати вимірювань показані на рис. 3.9.

З рис. 3.9 видно, що зі збільшенням температури струм насичення МОНПТ збільшується, а залежність виявляється нелінійною. Температурна чутливість такого МОНПТ складає  $\beta = 0,0041 \text{ мА/С}$ .

Таким чином, експерименти показали, що струм насичення МОНПТ збільшується зі збільшенням температури, а транзистор МОНПТ може бути використаний в якості термочутливого елемента з цифрових сенсорних мережах, завдяки своєму мінімального споживання енергії, але його вихідна характеристика є нелінійною.

В нашій роботі [23] наведено результати досліджень частотного датчика температури отриманого підключенням за двополюсною схемою (рис 3.8) в коло емітера ОПТ замість резистора  $R$  вищезгаданий МОНПТ. Схема отриманого двох-транзисторного датчика температури при двополюсному включенні МОНПТ показана на рис. 3.10.

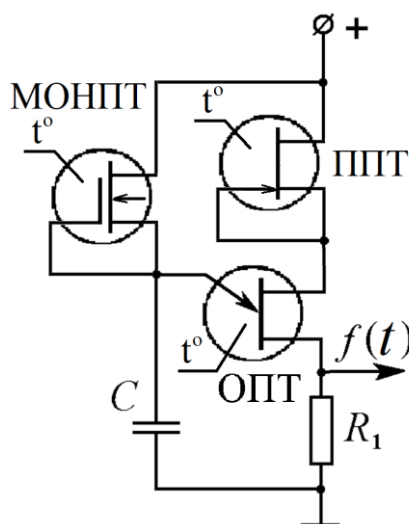


Рисунок 3.10 – Схема трьох-транзисторного ОПТ+ПТЗП+МОНПТ датчика температури

При такому підключенні струм насичення  $I_C$  МОНПТ буде заряджати

конденсатор  $C$  (див. рис. 3.10), та коли конденсатор буде зарядженим та ОПТ буде відкритим, то цей струм буде остаточним емітерним струмом для ОПТ  $I_C = I_E$ , який визначає остаточну напругу  $U_2$  (3.2). Цей струм насичення  $I_C$  буде збільшуватися зі збільшенням температури за законом (рис. 3.9).

Для трьох-транзисторної схеми ОПТ+ПТЗП+МОНПТ частота коливань генератора згідно до теоретичної моделі (2.6) з урахуванням (3.2) буде мати вигляд:

$$f = \frac{I_C}{C(I_B \cdot r_{\text{ВИМ}} - I_C \cdot r_{\text{ВКЛ}})}, \quad (3.6)$$

де  $I_C$  – струм насичення додаткового МОНПТ транзистора, А.

Таким чином, частота генератора з ростом температури збільшується з трьох причин: зменшення опору нижній частині бази  $r_{\text{ВИМ}}$  одноперехідного транзистора ОПТ, збільшення струму насичення  $I_C$  польового транзистора МОНПТ у чисельнику та у знаменнику виразу (3.6). Таким чином обидва активні елемента генератора будуть чутливими елементами, які додають вклад в чутливість датчика температури.

Експериментальна перевірка теоретичної моделі (3.4) залежності вихідної частоти отриманого трьох-транзисторного генератора від температури нагріву здійснювалася за допомогою комп'ютерної моделі, код якої написано на мові С+ (див. Додаток Б) з використанням параметрів чутливого елемента на базі ОПТ типу КТ117, отриманих в підрозділі 2.1 та з роботи [21].

У схемі генератора електроємність конденсатора складала  $C = 0,01$  мкФ. Програма моделювала приєднання в таку схему генератора досліджуваній ОПТ, який нагрівався від 0 С до 80 С. Тестування коду проводилося методом порівняння даних нашого експерименту з даними роботи [21]. Для побудови графіку було використано бібліотеку gnuplot.

На рис. 3.11 показана експериментальна залежність вихідної частоти від температури для трьох-транзисторного ОПТ+ПТЗП+МОНПТ датчика.

Чутливість такого трьох-транзисторного ОПТ+ПТЗП+МОНПТ датчика в зазначеному діапазоні температур становить 880 кГц/С, що у 30 разів більше за чутливість датчика на автогенераторі з роботи [20]. Споживана потужність такого двох-транзисторного генератора становить близько 20 мВт, що у 4 рази менше, ніж споживання найбільш економічною збіркою LM35+LM331 фірми Texas Instruments [6].

Також, з рис. 3.11 видно, що вихідна характеристика має лінійний характер,

тому такий датчик може у пряму використовуватися в цифрових сенсорних мережах, і не вимагає додаткових приладів корекції лінійності вихідної характеристики.

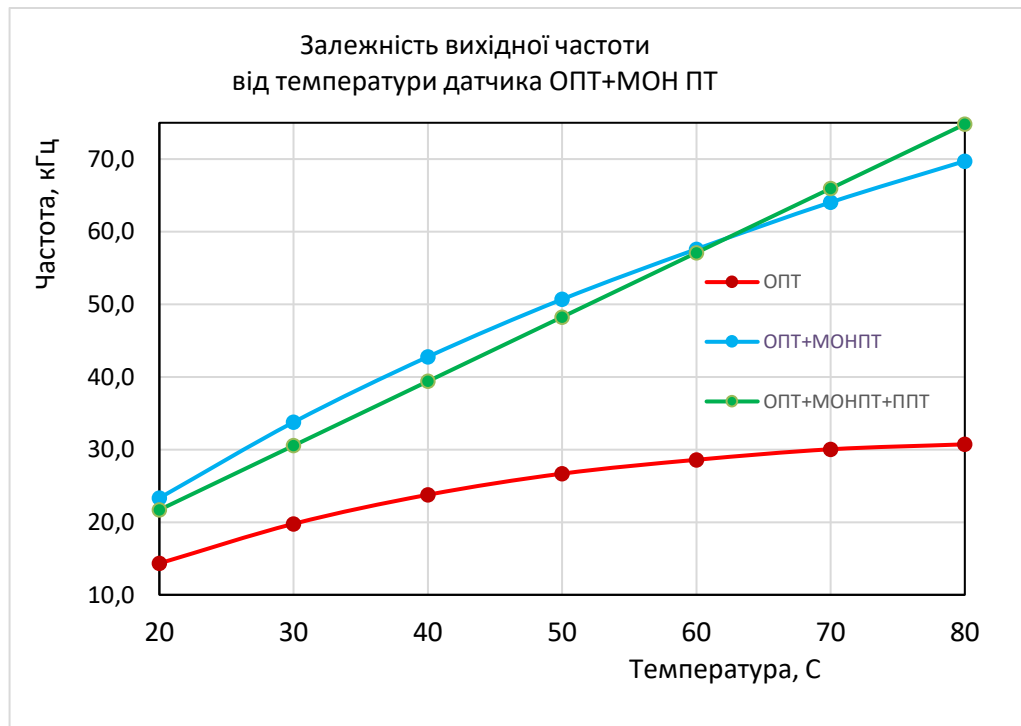


Рисунок 3.11 – Залежність вихідної частоти  
трьох-транзисторного ОПТ+ПТЗП+МОНПТ датчика  
від температури

Висновок: Релаксаційний генератор на базі трьох транзисторів ОПТ+ПТЗП+МОНПТ є достатньо чутливим до зміни температури, та його вихідна характеристика є лінійною, тому його можна використовувати в якості сенсора температури з частотним виходом цифрових сенсорних мережах.

### 3.5 Висновки

Збільшити вихідну частоту датчика температури на одному ОПТ в схемі релаксаційного генератора можна за рахунок збільшення опору обмежуючого резистора  $R_2$ .

Збільшити вихідну частоту та поліпшити лінійність вихідної характеристики датчика температури на одному ОПТ в схемі релаксаційного генератора можна за рахунок зменшення опору резистора в колі емітера  $R$ , який задає струм зарядки конденсатора.

Релаксаційний генератор на базі двох транзисторів ОПТ+ПТЗП є чутливим до зміни температури, та його можна використовувати в якості сенсора температури з частотним виходом, однак його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків корекції лінійності вихідної характеристики.

Релаксаційний генератор на базі трьох транзисторів ОПТ+ПТЗП+МОНПТ є достатньо чутливим до зміни температури, та його вихідна характеристика є лінійною, тому його можна використовувати в якості сенсора температури з частотним виходом цифрових сенсорних мережах.



## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В першому розділі магістерської роботи на базі аналізу конструкцій існуючих промислових датчиків температури зроблено висновки:

- Подальший розвиток мереж IoT пов'язаний із заходами щодо зниження енергоспоживання окремими складовими системи, особливо сенсорними мережами.

- При використанні в цифрових сенсорних мережах датчик повинен споживати мало енергії, бути мініатюрним, тому складатися з мінімальної кількості елементів, та при цьому він повинен мати достатню чутливість, мати лінійну вихідну характеристику, а також бути стабільним до дії зовнішніх сторонніх впливів. В цифрових мережах набагато вигідніше використовувати датчики з частотним виходом, що дозволяє обійтися без підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів. Це економить матеріальні ресурси і споживану енергію.

- Більшість сучасних конструкцій датчиків температури для роботи в цифрових сенсорних мережах вимагають наявності блоків корекції лінійності вихідної характеристики та аналогово-частотного перетворення, крім того, вони досить дорогі через використання спеціальних передових технологій. Заощадити ресурси можна, якщо використовувати конструкцію датчика з частотним виходом на основі серійних промислових транзисторів з мінімальною кількістю елементів.

В другому розділі магістерської роботи на базі проведеного теоретичного аналізу та експериментальних досліджень впливу температури на характеристики одноперехідного транзистора та генератора релаксаційних коливань зроблено висновки:

- ОПТ є чутливим до зміни температури, однак такий датчик має аналоговий вихід, та його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків корекції та аналогово-частотного перетворення.

- Релаксаційний генератор на базі одного ОПТ змінює вихідну частоту при зміні температури, однак він має недостатню чутливість та його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків частотних помножувачів та корекції лінійності вихідної характеристики для його використання в цифрових сенсорних мережах.

В третьому розділі на основі теоретичних та експериментальних досліджень методів покращення параметрів частотного датчика температури зроблено висновки:

- Збільшити вихідну частоту датчика температури на одному ОПТ в схемі релаксаційного генератора можна за рахунок збільшення опору обмежуючого резистора.

- Поліпшити лінійність вихідної характеристики датчика температури на одному ОПТ в схемі релаксаційного генератора можна за рахунок зменшення опору резистора в колі емітера, який задає струм зарядки конденсатора.

- Релаксаційний генератор на базі двох транзисторів ОПТ+ПТЗП є достатньо чутливим до зміни температури, та його можна використовувати в якості сенсора температури з частотним виходом, однак його вихідна характеристика є нелінійною, що вимагає додаткових блоків корекції лінійності вихідної характеристики.

- Релаксаційний генератор на базі трьох транзисторів ОПТ+ПТЗП+МОНПТ є достатньо чутливим до зміни температури, та його вихідна характеристика є лінійною, тому його можна використовувати в якості сенсора температури з частотним виходом цифрових сенсорних мережах.

Результати роботи дозволяють рекомендувати використання релаксаційного генератора на базі ОПТ с додатковими ПТ в сенсорних цифрових мережах в якості недорогого ефективного та радіаційно стійкого датчика температури з частотним виходом.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1 Porambage P. Survey on Multi-Access Edge Computing for Internet of Things Realization / J. Okwuibe, M. Liyanage, M. Ylianttila // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – V. 20. – №. 4, – P. 2961-2991.

2 Kaliyar R. K. Analyzing IoT Temperature Sensor Application on IBM Bluemix Cloud / A. Bhardwaj // 2023 8th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India. – 2023, – P. 316-321, doi: 10.1109/ICCES57224.2023.10192636.

2 Pangestu A. IoT-based tire pressure monitoring system for air and temperature pressure using MPX5500D and LM35 sensor / I. Sodikin, M. Yusro, R. Sapundani // IEEE 8th International Conference on Computing, Engineering and Design (ICCED), Sukabumi, Indonesia. – 2022. – P. 1-4, doi: 10.1109/ICCED56140.2022.10010355.

3 Xu Z. M. Space Measurement System Design and Space Environment Adaptation Experiment of Commercial Sensor DS18B20 / Z. M. Xu, P. Liu, X. Y. Chang // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 635. – P. 760 - 767.

4 Prasad D. An ultra-low power high-performance CMOS temperature sensor with an inaccuracy of 0.3°C/0.1°C for aerospace applications / D. Prasad, V. Nath // Microsystem Technologies. – 2017. – V. 25. – № 5, – P. 1553 - 1563.

5 Courts S. High level gamma radiation effects on Cernox™ cryogenic temperature sensors / S. Courts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Madison. – 2017. – V. 278. – P. 1 - 8.

6 Texas Instruments Precision Analog Output Temperature Sensor LM35 [електронний ресурс]. – 2019. Режим доступу: <http://www.ti.com/product/lm35.pdf>.

7 Analog Devices Low Voltage Centigrade Temperature Sensor TMP35. Datasheet. Офіційний сайт Analog Devices [електронний ресурс]. – 2019. Режим доступу: [https://eu.mouser.com/datasheet/2/609/TMP35\\_36\\_37-794389.pdf](https://eu.mouser.com/datasheet/2/609/TMP35_36_37-794389.pdf).

8 Seokhyeon J. A Fully-Integrated 71 nW CMOS Temperature Sensor for Low Power Wireless Sensor Nodes / J. Seokhyeon, Z. Foo, Y. Lee // IEEE journal of solid-state circuits. – 2014. – V. 49. – № 8. – P. 1682 - 1693.

9 Li J. Long-range Raman Distributed Fiber Temperature Sensor with Early Warning Model for Fire Detection and Prevention / J. Li, Y. Baoqiang, Z. Mingjang, et al. // IEEE Sensors Journal. – 2019. – V. 19. – No. 10. – P. 3711 - 3717. doi: 10.1109/JSEN.2019.2895735.

10 Zhiwei X. A Poly Resistor Based Time Domain CMOS Temperature Sensor

with 9b SAR and Fine Delay Line / X. Zhiwei, S. Byun // *Sensors*. – 2020. – V. 20. – No. 7. – P. 2053 - 2059. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20072053>

11 Prasad D. A 0.6V 117nW high performance energy efficient system-on-chip (SoC) CMOS temperature sensor in 0.18 $\mu$ m CMOS for aerospace applications / V. Nath, V. Vishwanthan, M. Mehta // *Microsystem Technologies*. – 2019. – V. 25, – No. 7, – P. 2301 - 2311. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-018-4115-8>.

12 Ali A. A 47nW, 0.7-3.6V wide Supply Range, Resistor Based Temperature Sensor for IP Applications / S. Kiran, A. Jain and Z. Abbas // 2019 IFIP/IEEE 27th International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SiC). – 2019. – P. 293 - 298. DOI: 10.1109/VLSI-SoC.2019.8920345.

13 Vikulin I. Radiation resistant FET-based Temperature Sensor for End Devices of IP / V. Gorbachev, V. Litvinenko, et al. // *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT-2019)*. Lviv, Ukraine, 2-6 July. – 2019. – P. 272 - 277. DOI:10.1109/AIACT.2019.8847905.

14 Hedayatipour A. Quasi-Digital Output Low Power CMOS Temperature Sensor / M. A. Haque, N. McFarlane // 2018 IEEE 61-st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). – 2018. – P. 992 - 995. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623933.

15 Ching H. L. Negative differential resistance and characteristic nonlinear electromagnetic response of a Topological Insulator [электронный ресурс] / H. L. Ching. – 2016. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1503.01097.pdf>.

16 Motorola SC. 2N2647 Silicon PN unijunction transistor / *Datasheet Library*. [электронный ресурс]. – 2022. Режим доступа: [http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet\\_pdf/motorola/2N2646\\_and\\_2N2647.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet_pdf/motorola/2N2646_and_2N2647.pdf).

17 Philips International. 2N2646 Semiconductors Silicon unijunction transistor / *Datasheet Library*. [электронный ресурс]. – 2022. Режим доступа: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/philips/2N2646.pdf>.

18 General Electric Solid State. GE2646 Silicon unijunction transistor 30V 50mA / *Datasheet Library*. [электронный ресурс]. – 2022. Режим доступа: [http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet\\_pdf/general-electric-solid-state/2N2646\\_to\\_GES2647.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet_pdf/general-electric-solid-state/2N2646_to_GES2647.pdf).

19 Kryshnal R.G. Devices based on surface acoustic waves for temperature sensors / R. G. Kryshnal, A. P. Kundin, A.V. Medved // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2017. – V. 62. – № 3. – P. 282 - 288.

20 Leonov A. V. Sensors with SOI FET primary transducer and frequency output / A. V. Leonov, Malykh A. A., Pavlyk M. I. // *Proceedings of AMA conference: Sensors*

2015 and IRS2 2015. – Nuremberg. – 2015. – P. 864 - 867.

21 Vikulin I. Radiation resistant FET-based Temperature Sensor for End Devices of IP / Gorbachev V., Litvinenko V., et al. // Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT-2019). Lviv, Ukraine. – 2019. – P. 272 - 277. DOI:10.1109/AIACT.2019.8847905.

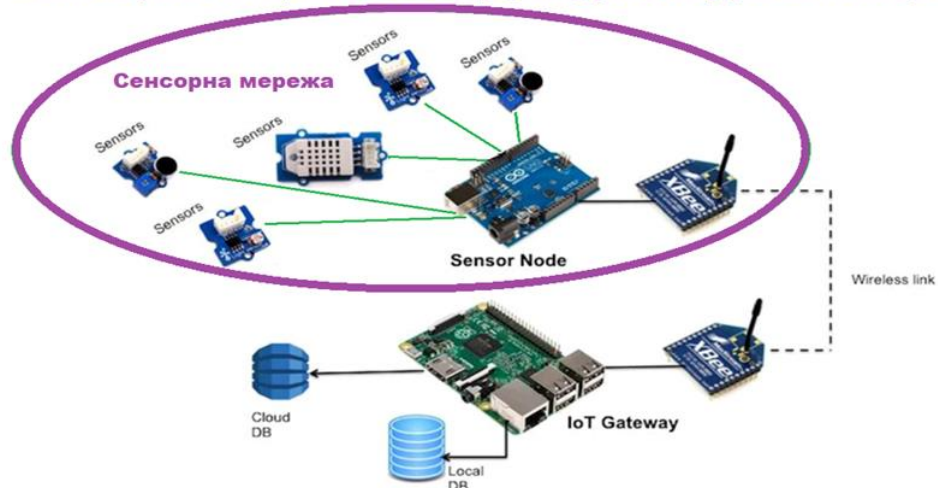
22 Козинець В. Д., Горбачов В. Е. Використання методу комбінації елементів для покращення параметрів датчиків температури з метою їх застосування у цифрових сенсорних мережах. Тези ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Гуманітарний і інноваційний ракурс професійної майстерності: пошуки молодих вчених», 15 грудня 2023 р., Одеса, Україна. (У друку).



# Додаток А

## ПЕРЕЛІК КОПІЙ ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

### 1 Сенсорна мережа в структурі цифрової мережі



Особливі вимоги до датчиків Сенсорної мережі:

- 1) **Мінімальна кількість активних елементів.**
- 2) **Достатня чутливість.**
- 3) **Лінійність вихідної характеристики.**
- 4) **Невелика вартість.**

Слайд А1 – Сенсорна мережа в структурі цифрової мережі (рис. 1.1 с. 12)

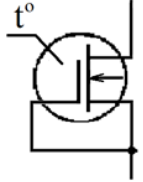
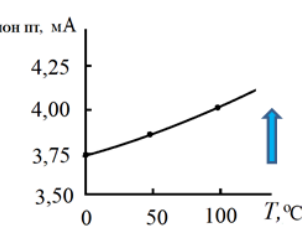
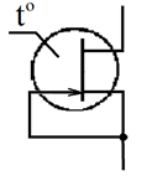
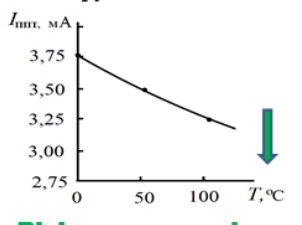
### 2 Системи контролю температури



**Мета роботи:** використовуючи метод комбінації стандартних промислових недорогих транзисторів дослідити можливість отримання датчика температури для сучасних цифрових сенсорних мереж.

Слайд А2 – Системи контролю температури (рис. 1.2 с. 15)

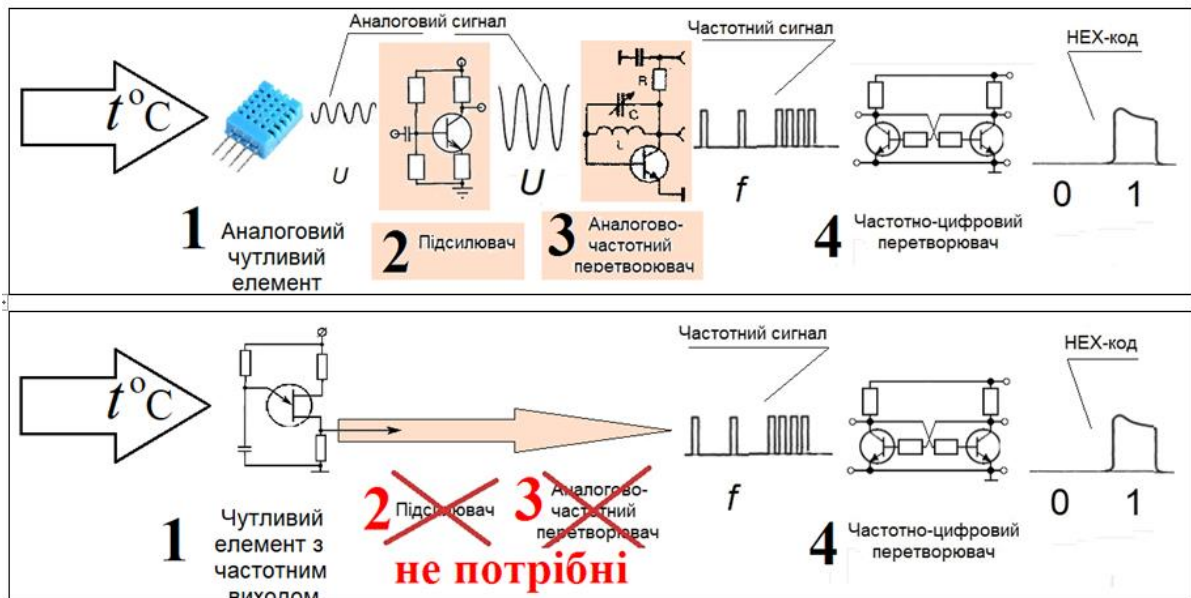
### 3 Існуючі термочутливі елементи на польових транзисторах

<p><b>Метал-оксид-напівпровідниковий МОН ПТ (MOSFET)</b></p> 	<p><b>Теоретична модель:</b> Якщо <math>T \uparrow</math> зростає, то струм насичення ПТ <b>зменшується</b>:</p> $I_{\text{МОН ПТ}} \uparrow\uparrow = \frac{\mu \uparrow C (U_{\text{ПОВ}} - U_{\text{ПОР}} \downarrow)^2}{2l^2}$ <p><math>I_{\text{МОН ПТ}} \uparrow</math> за рахунок: - збільшення рухливості <math>\mu \uparrow</math> та - зменшення порогової напруги <math>U_{\text{ПОР}} \downarrow</math>.</p>	<p>струм насичення</p>  <p><b>Позитивна чутливість</b> до температури</p>
<p><b>3 р-п-переходом ППТ (JFET)</b></p> 	<p><b>Теоретична модель:</b> Якщо <math>T \uparrow</math> зростає, то струм насичення ППТ <b>зменшується</b>:</p> $I_{\text{ППТ}} \downarrow\downarrow = \frac{(U_{\text{ПОР}} - b \cdot T \uparrow)^2}{d \cdot T^2 \uparrow}$ <p><math>I_{\text{ППТ}} \downarrow</math> за рахунок: за рахунок збільшення опору каналу.</p>	<p>струм насичення</p>  <p><b>Від'ємна чутливість</b> до температури</p>

→ це чутливі елементи з аналоговим виходом, але ...

Слайд А3 – Існуючі термочутливі елементи на польових транзисторах (рис. 1.4 с. 18)

### 4 Вибір типу чутливого елемента

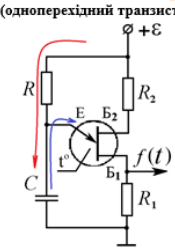
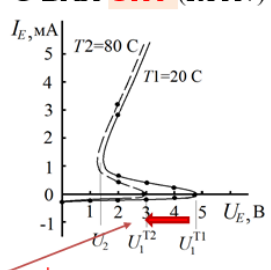


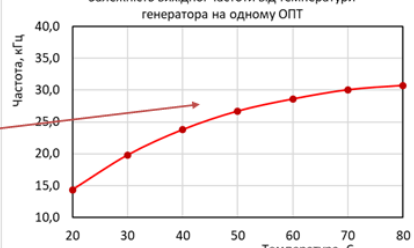
**Висновок:** чутливий елемент з частотним виходом є кращим

– менша кількість активних елементів !!!

Слайд А4 – Вибір типу чутливого елемента (рис. 2.1 с. 24, рис. 2.5 с. 31, рис. 2.7 с. 34)

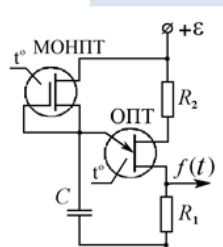
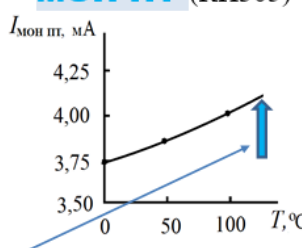
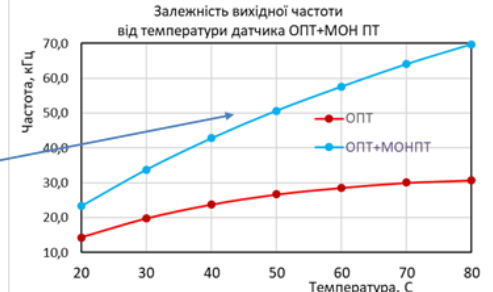
## 5 Температурна залежність частоти генератора

<p><b>на одному ОПТ</b> (одноперехідний транзистор)</p> 	<p><b>Теоретична модель:</b> Якщо <math>T \uparrow</math> зростає, то</p> $f \uparrow = \frac{I}{C(I_B \cdot r_B \downarrow - U_2)}$ <p><math>f \uparrow</math> за рахунок того, що: <math>r_B \downarrow</math> - опір бази зменшується</p>	<p><b>S-BAH ОПТ (КТ117)</b></p>  <p><math>U_1 \downarrow = I_B \cdot r_B \downarrow</math></p>
---	--	---

<p><b>Отримано:</b> у датчика на одному ОПТ (КТ117):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Чутливість <b>мала</b>: 27 Гц/°С.</li> <li>2) Вихідна характеристика <b>нелінійна</b></li> </ol> <p><b>Висновок:</b> датчик на одному ОПТ <b>не підходить</b> для цифрових мереж!</p>	<p>Залежність вихідної частоти від температури генератора на одному ОПТ</p> 
--	--

Слайд А5 – Температурна залежність частоти генератора (рис. 2.1 с. 24, рис. 2.5 с. 31, рис. 2.8 с. 37)

## 6 Підвищення температурної чутливості

<p><b>Комбінований на ОПТ+МОН ПТ</b></p> 	<p><b>Теоретична модель:</b> Якщо <math>T \uparrow</math> зростає, то</p> $f \uparrow \uparrow = \frac{I_{\text{МОН ПТ}} \uparrow}{C(I_B \cdot r_B \downarrow - U_2)}$ <p><math>f \uparrow \uparrow</math> за рахунок <b>двох факторів</b>: <math>r_B \downarrow</math> - опір бази зменшується, <b>та ще</b> <math>I_{\text{МОН ПТ}} \uparrow</math> - струм через МОН ПТ зростає</p>	<p>струм насичення <b>МОН ПТ (КП305)</b></p> 
<p><b>Отримано:</b> у комбінованого датчика на ОПТ (КТ117) + МОН ПТ (КП305):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Чутливість <b>зросла у 2,8 разів</b>: 77 Гц/°С, <b>але</b></li> <li>2) Вихідна характеристика <b>нелінійна</b></li> </ol> <p><b>Висновок:</b> комбінований датчик на ОПТ+МОН ПТ <b>не підходить</b> для цифрових мереж!</p>	<p>Залежність вихідної частоти від температури датчика ОПТ+МОН ПТ</p> 	

Слайд А6 – Підвищення температурної чутливості (рис. 3.9 с. 49, рис. 3.10 с. 50, рис. 3.11 с. 51)

## Додаток Б

### РОЗРОБЛЕНІ СКРИПТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Моделювання експерименту дослідження вихідної частоти релаксаційного генератора

```
#include <iostream>
#include <cmath>
#include <iomanip>

using namespace std;

// Константи
const double I = 13.0;
const double C = 0.01;
const double E = 1.23;
const double k = 1.38;
const double b = 0.05;

// Функція для розрахунку частоти F
double calculateFrequency(double T) {
    return I / C / (pow(T, 3.0 / 4.0) * exp(-E / (2 * k * T)) - b * pow(T, 3.0 / 2.0));
}

int main() {
    // Значення температури
    double temperatures[] = {0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80};
    int numTemperatures = sizeof(temperatures) / sizeof(temperatures[0]);

    // Вивід заголовка таблиці
    cout << setw(10) << "T" << setw(15) << "Frequency (F)" << endl;

    // Вивід даних у табличному вигляді
    for (int i = 0; i < numTemperatures; ++i) {
        double T = temperatures[i];
        double F = calculateFrequency(T);

        cout << setw(10) << T << setw(15) << F << endl;
    }

    return 0;
}
```

```

#include <cstdio>

// Функція для генерації файла для графіка у форматі, зрозумілому gnuplot
void generatePlotFile() {
    FILE *gnuplotPipe = popen("gnuplot -persist", "w");
    if (gnuplotPipe) {
        fprintf(gnuplotPipe, "plot 'data.txt' with lines\n");
        fflush(gnuplotPipe);
        fclose(gnuplotPipe);
    } else {
        cout << "Error: Could not open gnuplot pipe" << endl;
    }
}

int main() {
    // ...

    // Запис даних у файл для графіка
    FILE *dataFile = fopen("data.txt", "w");
    fprintf(dataFile, "# T\tF\n");

    for (int i = 0; i < numTemperatures; ++i) {
        double T = temperatures[i];
        double F = calculateFrequency(T);

        fprintf(dataFile, "%f\t%f\n", T, F);
    }

    fclose(dataFile);

    // Генерація графіка
    generatePlotFile();

    return 0;
}

```

Скрипт розрахунку струму насичення скрізь ПТЗП:

```

#include <iostream>
#include <cmath>
#include "gnuplot_i.hpp"

// Константи

```

```

const double A = 0.42;
const double m = 3.71;
const double k = 1.38;

// Функція для розрахунку струму I
double calculateCurrent(double T) {
    return A * m * exp(-2 * k * T);
}

int main() {
    // Значення температури
    double temperatures[] = {0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80};
    int numTemperatures = sizeof(temperatures) / sizeof(temperatures[0]);

    // Вивід заголовка таблиці
    std::cout << std::setw(10) << "T" << std::setw(15) << "Current (I)" << std::endl;

    // Вивід даних у табличному вигляді та побудова графіка
    Gnuplot plot;
    plot.set_title("Current vs Temperature");
    plot.set_xlabel("Temperature (T)");
    plot.set_ylabel("Current (I)");

    std::ofstream dataFile("data.txt");
    dataFile << "# T\tI\n";

    for (int i = 0; i < numTemperatures; ++i) {
        double T = temperatures[i];
        double I = calculateCurrent(T);

        std::cout << std::setw(10) << T << std::setw(15) << I << std::endl;

        // Запис даних для графіка у файл
        dataFile << T << "\t" << I << "\n";
    }
}

```

Скрипт розрахунку струму насичення скрізь МОНПТ:

```

#include <iostream>
#include <cmath>
#include "gnuplot_i.hpp"

// Константи

```



```

const double A = 0.005;
const double m = 2.34;
const double k = 1.38;

// Функція для розрахунку струму I
double calculateCurrent(double T) {
    return A * m * exp(2 * k * T);
}

int main() {
    // Значення температури
    double temperatures[] = {0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80};
    int numTemperatures = sizeof(temperatures) / sizeof(temperatures[0]);

    // Вивід заголовка таблиці
    std::cout << std::setw(10) << "T" << std::setw(15) << "Current (I)" <<
std::endl;

    // Вивід даних у табличному вигляді та побудова графіка
    Gnuplot plot;
    plot.set_title("Current vs Temperature");
    plot.set_xlabel("Temperature (T)");
    plot.set_ylabel("Current (I)");

    std::ofstream dataFile("data.txt");
    dataFile << "# T\tI\n";

    for (int i = 0; i < numTemperatures; ++i) {
        double T = temperatures[i];
        double I = calculateCurrent(T);

        std::cout << std::setw(10) << T << std::setw(15) << I << std::endl;

        // Запис даних для графіка у файл
        dataFile << T << "\t" << I << "\n";
    }
}

```

```
dataFile.close();

// Побудова графіка
plot.plotfile_xy("data.txt", 1, 2, "Current vs Temperature");

return 0;
}
```