

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І
ТЕХНОЛОГІЙ МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ Володимир ШУТКО
« ____ » _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 153 «МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНА
ТЕХНІКА» ОПП «ФІЗИЧНА ТА БІОМЕДИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА»

Тема: «Датчик для визначення температури середовища»

Виконавець

студент групи МН-305Б/стн _____ Бабак Олексій Володимирович

Керівник

д.ф-м.н., професор _____ Азнакаєв Е.Г.

Нормоконтролер _____ Сініцин Р.Б.

КИЇВ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телемунікацій

Кафедра електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей

Галузь знань – 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»,

Освітньо-професійна програма – «Фізична та біомедична електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Шутко В.М.

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Бабака Олексія Володимировича

1. Тема дипломної роботи «Датчик для визначення температури середовища» затверджена наказом ректора від «23» березня 2023 р. № 387/ст
2. Термін виконання роботи : з 23.03.2023 р. по 19.06.2023 р.
3. робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел загальним обсягом 27 сторінок, з них обсяг основного тексту – 20 сторінок, список використаних джерел нараховує 7 позицій.
4. Зміст пояснювальної записки: вступ; розділ 1 методи вимірювання температури; розділ 2 огляд існуючих аналогів приладу та вибір

елементної бази; розділ 3 дослідження характеристик та ефективності диференційного термометра; висновки; список використаних джерел.

6. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1.	Визначення та обґрунтування теми кваліфікаційної роботи	23.02.2023	
2.	Оформлення завдання на виконання кваліфікаційної роботи	31.03.2023	
3.	Визначення об'єкта, мети та завдань дослідження	05.04.2023	
4.	Підбір, опрацювання та вивчення літератури та джерел з теми дослідження	14.04.2023	
5.	Написання основної частини, вступу та висновків	10.05.2023	
6.	Оформлення роботи та подання її на перше читання керівникові	29.05.2023	
7.	Опрацювання зауважень та виправлення недоліків	01.06.2023	
8.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	12.06.2023	
9.	Проходження нормоконтролю	12.06.2023	
10.	Подання роботи на перевірку на плагіат	12.06.2023	
11.	Подання роботи на рецензування	12.06.2023	
12.	Подання остаточного варіанта на кафедру	13.06.2023	
13.	Захист роботи	19.06.2023	

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант	Дата, підпис
--------	-------------	--------------

	(посада, П.І.Б.)	Завдання видав	Завдання прийняв

8. Дата видачі завдання: «23» березня 2023 р.

Керівник дипломної роботи _____ Азнакаєв Е.Г.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання__ Бабак О.В.
(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна до дипломної роботи «Датчик для визначення температури середовища» містить: 26 сторінок, 16 рисунків, 2 таблиці, 7 використаних джерел.

ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ТЕРМОМЕТР, ТЕРМОСЕНСОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ, MICRO-CAP.

Об'єкт дослідження: диференційний термометр.

Мета роботи: створення диференційного термометра з високою точністю вимірювання температури.

У дипломній роботі була здійснена розробка диференційного термометра з високою точністю вимірювання температури. Для розробки схемного моделювання використана програма Micro-CAP. Проведено дослідження та аналіз різних типів сенсорів температури, їх переваг та недоліків. Також було здійснено вибір основних компонентів для моделювання диференційного термометра.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Список умовних скорочень використаних в кваліфікаційній роботі:

1. Наприклад – напр.
2. І так далі – і т.д.
3. Термоелектродвигунна сила – термоЕДС.
4. ТКО – температурний коефіцієнт опору.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
РОЗДІЛ 1	11
МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	11
1.1 Контактний вимір температури	11
1.1.1 Термометри розширення	11
1.1.2 Рідинні скляні термометри	13
1.1.3 Біметалічні та дилатометричні термометри	15
1.1.4 Рідинні манометричні термометри	17
1.1.5 Термометри опору	19
1.1.6 Термоелектричні термометри	23
1.2 Безконтактний вимір температури	24
РОЗДІЛ 2	27
ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ПРИЛАДУ	27
2.1 Необхідні технічні характеристики пристрою	27
2.2 Принцип диференціального виміру температури	27
2.3 Недоліки аналогів приладу	28
2.4 Виправлення недоліків	30
РОЗДІЛ 3	36
ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ТЕРМОМЕТРА	36
3.1 Елементна база	36
3.2 Розробка функціональної блок-схеми	40

3.3 Основні характеристики розробленого диференційного термометра	
.42	
3.4 Переваги приладу	43
ВИСНОВОК.....	45

ВСТУП

Актуальність дослідження. У сучасному світі вимірювання температури є необхідним елементом в різних сферах, включаючи промисловість, науку, медицину та побутові застосування. Актуальність теми дослідження полягає розвитку та вдосконалення технологій вимірювання температури задля контролю та забезпечення оптимальних умов в різних процесах та покращення якості та точності вимірювання температури.

Об'єкт дослідження – датчик для визначення температури середовищам.

Предмет дослідження – диференційний термометр для вимірювання температури.

Мета дослідження – розробка пристрою для вимірювання температури.

Завдання дослідження:

1. Дослідити різні типи температурних датчиків, їхні принципи роботи.
2. Ознайомитись з перевагами та обмеженнями різних температурних датчиків.
3. Дослідити аналоги існуючого пристрою.
4. Розробити елементну базу для датчика.
5. Розробка диференційного термометра.

Методи дослідження. В теоретичній частині дослідження було використано наступні методи: аналіз, порівняння, синтез, обробка використаної інформації. В емпіричній частині дослідження використовувались методи проектування та моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів. В кваліфікаційній роботі було проведено глибокий теоретичний аналіз різних типів температурних датчиків із зазначення їх принципів роботи та ознайомленням з їх

перевагами та недоліками. Було удосконалено роздільну здатність диференційного термометра до $0,001^{\circ}\text{C}$.

Практичне значення отриманих результатів. Результати отримані в задані роботі можуть бути використані в області медицині задля вимірювання температури у роті, під пахвою та у прямій кишці. У сфері промисловості – для контролю температури в котлах, печах реакторах, лабораторних установках та інших системах. Диференційні термометри можуть бути використані в побутових умовах для вимірювання температури під час готування їжі, в акваріумах, холодильниках та інших побутових пристроях.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

1.1 Контактний вимір температури

Температура - це статистична величина, що характеризує тепловий стан тіла та пропорційна середній кінематичній енергії молекул цього тіла. Вимірюється в градусах за шкалою Фаренгейта, Цельсія та інших шкалах.

Вимірювання температури можливе тільки опосередковано, на основі змін фізичних властивостей різних тіл, які отримали назву термометричних. Вимірювання температури - це перетворення інформаційного сигналу вимірювання в властивість, пов'язану з температурою.

Найпоширеніші методи вимірювання температури базуються на:

- тепловому розширенні газів, рідини та твердих тіл;
- зміні тиску всередині закритого об'єму при зміні температури;
- зміні електричного опору тіла при зміні температури;
- термоелектричному ефекті;
- аналізі електромагнітного випромінювання нагрітих тіл.

Прилади, якими вимірюють температуру, називаються термометрами. Вони поділяються на дві великі групи: контактні та безконтактні [1].

1.1.1 Термометри розширення

Дані інструменти мають широке застосування для вимірювання температури через контакт. У таблиці 1.1 представлені основні види механічних контактних термометрів разом з їх характеристиками, недоліками, перевагами та галузями використання [2].

Таблиця 1.1

Основні характеристики механічних контактних термометрів

Найменування	Тип приладу	Діапазон вимірювань, °С	Похибка, %	Інерційність	Переваги	Недоліки	Галузь застосування
Металеві термометри розширення	Дилатометричні	0...1000	±5	Велика	Дешеві, надійні, малий час спрацьовування; дуже великі перестановні зусилля	Висока похибка, висока інерційність	Температурні вимикачі
	Біметалічні	0...500	±5	»	Дешеві, надійні; великі перестановні зусилля	Висока похибка вимірювань	Оціночний контроль температури, температурні вимикачі
Рідина ні термометри	Рідкісні скляні	-55...+60 0	±1	»	Дуже дешеві	Мала механічна міцність, немає дистанційності	Лабораторні термометри, побутові термометри
	Рідинні манометричні	-30...+60 0	±1	»	Дешеві, надійні, не потребують зовнішніх джерел енергії;	Температура з'єднувального капіляра впливає	Промислові термометри, термореле

					дистанційні сть до 50 м, великі перестанов очні зусилля	показання приладу	
	Конденс аційні маномет ричні	0...400	±1	Мала	Те саме	Нелінійна статична характери стика	Те саме
Газові термометр и	З гелієвим заповнен ням				Принцип вимірюванн я відповідає визначенню термодинам ічної температур и	Мала механічна міцність, велика трудоміст кість процесу вимірюва ння	Перевірочні (каліброваль ні) роботи

Після розгляду таблиці можна сказати, що основними перевагами термометрів розширення є їх надійність і доступність, хоча деякі з них мають значну похибку вимірювання. Давайте розглянемо різні типи термометрів розширення детальніше.

1.1.2 Рідинні скляні термометри

Залежно від конструкції, термометри поділяються на два типи: паличкові (рис. 1.1, а) та технічні з вкладеною шкалою (рис. 1.1, б).

Принцип їх роботи полягає у зв'язку між температурою та об'ємом термометричної рідини, що міститься у скляному корпусі.

Рідкісний термометр складається зі скляного корпусу (1), капілярної трубки (3), резервуару (4) та вимірювальної шкали (2). Частина капілярної трубки та резервуару заповнена термометричною рідиною. Решта вільного простору в капілярі витягують повітря або заповнюють інертним газом.

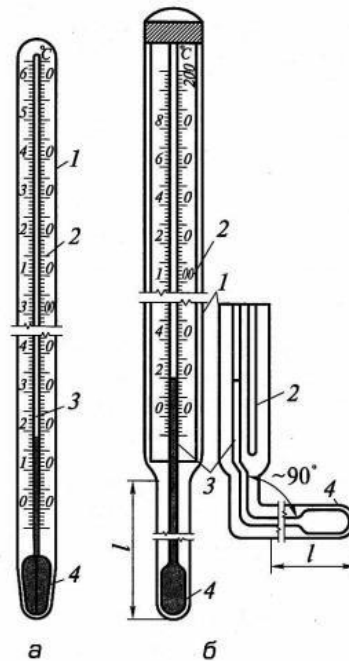


рис. 1.1 Рідкісні скляні термометри

а - паличний; б - технічний з вкладеною шкалою; 1 - скляна оболонка; 2 - шкала; 3 - капілярна трубка; 4 - запасний резервуар.

Термометричні рідини можуть включати органічні розчинники, такі як етиловий спирт, толуол, пентан або керосин. Однак найпоширенішими є термометри з ртутним заповненням, що має свої причини. Ртуть здатна перебувати у рідкому стані при широкому діапазоні температур і не змочує скло, що дозволяє використовувати капіляри з каналом діаметром навіть до 0,1 мм. Крім того, ртуть забезпечує високу точність вимірювання. Так, ртутні зразкові термометри першого розряду мають похибку вимірювань в діапазоні від 0,002 до 2 °С.

Органічні розчинники, зі свого боку, мають обмежений діапазон температурного застосування, меншу вартість та більшу похибку вимірювань [3].

Проте, враховуючи нашу специфічну задачу, рідкісний термометр не є оптимальним вибором, оскільки не забезпечує достатню точність для вимірювання температур у діапазоні від 0 до +120 °С., пристрій матиме великі розміри. Це створює необхідність уважного поводження з ним через недостатню механічну міцність корпусу. Крім того, такі термометри характеризуються високою інерційністю, що не дозволяє отримати точні вимірювання протягом короткого проміжку часу.

1.1.3 Біметалічні та дилатометричні термометри

Термометри, що використовують властивість твердих тіл змінювати свої розміри при зміні температури, базуються на матеріалах з високим коефіцієнтом лінійного розширення, переважно на металах та їх сплавах.

На рис. 1.2, а представлена конструкція біметалевого термометра, де термочутливим елементом є двошарова пластина, виготовлена з латуні (1) та інвару (2). Ці матеріали мають різний коефіцієнт лінійного розширення. При збільшенні температури вільний кінець пластини починає згинатися в напрямку металу з меншим коефіцієнтом розширення. Залежно від величини цього вигину можна визначити температуру.

Ці пристрої широко використовуються як термореле в системах сигналізації та автоматичного регулювання, а також як температурні компенсатори у вимірювальних пристроях, напр., у радіаційних пірометрах.

На рис. 1.2, б наведено ілюстрацію конструкції чутливого елемента пневматичного дилатометричного перетворювача температури.

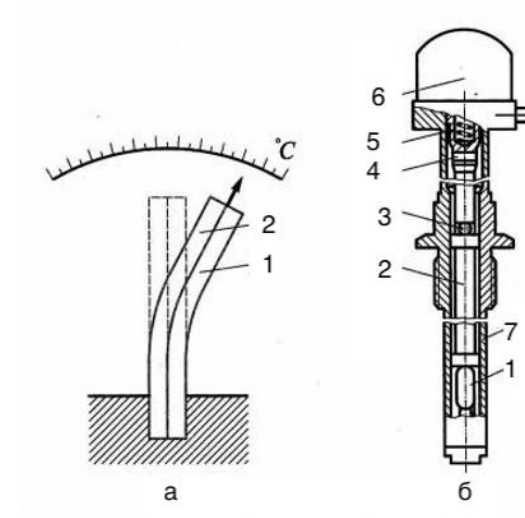


Рис. 1.2 Металеві термометри розширення:

а - біметалічний: 1 - шар пластини з інвару; 2 - шар пластини з латуні; б - дилатометричний: 1 - стержень; 2 - трубка; 3 - кулька; 4 - штовхач; 5 - пружина; 6 – перетворювач, 7 - корпус.

У внутрішній частині корпусу (7), виготовленого з латуні або нержавіючої сталі, розташовані стержень (1) та трубка (2), виготовлені з інвару (кварцу). Шляхом використання пружини (5) та штовхача (4), стержень (1) постійно стискається до нижньої частини корпусу (7). Кулька (4) запобігає утворенню вільних проміжків між стержнем та компенсаційною трубкою. Трубка з латуні використовується для усунення температурних похибок під час монтажу на об'єктах з різною товщиною теплової ізоляції. Зміна різниці подовжень корпусу (7) та стержня (1), що пропорційна зміні температури в середовищі, де проводяться вимірювання, перетворюється на пневматичний сигнал перетворювачем (6), зміцнюється та передається до реєструючого пристрою.

Дилатометричні перетворювачі також можуть мати електричний вихідний сигнал. В цих пристроях можна вимірювати температуру в діапазоні $-30 - +1000$ °С з класом точності 1,5 або 2,5.

Даний тип термометрів не задовольняє нашим вимогам, оскільки має високу похибку вимірювання і потребує постійного візуального контакту для відслідковування температурних значень під час експерименту [4].

1.1.4 Рідинні манометричні термометри

Принцип роботи ґрунтується на використанні залежності між температурою та тиском термометричної речовини (газу, рідини), яка заповнює герметичну термосистему термометра. Термосистема включає термобалон (4), капіляр (5) та манометричну пружину, яка може бути одно- або багатообертовою (6). Нерухомий кінець манометричної пружини з'єднаний капіляром (5) з термобалоном. Рухомий кінець пружини затисканий, а через шарнірне з'єднання (7), тросик (3) та сектор (2) пов'язаний зі стрілкою пристрою (1).

Принцип роботи цього типу термометрів ґрунтується на використанні залежності між температурою та тиском термометричної речовини (газу або рідини), яка заповнює герметичну систему термометра. Ця система складається з термобалона (4), капіляра (5) та манометричної пружини (6), яка може бути одно- або багатоспіральною. Нерухомий кінець манометричної пружини з'єднується з термобалоном через капіляр (5). Рухомий кінець пружини є запаяним і через шарнірне з'єднання (7), тягу (3) та сектор (2) пов'язаний зі стрілкою приладу (1).

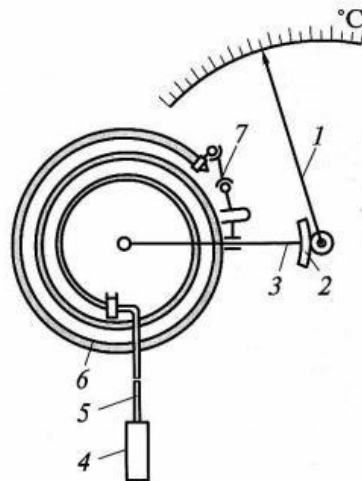


Рис. 1.3 Конструкція манометричного термометра: 1 – стрілка; 2 - сектор; 3 - повідець; 4 - термобалон; 5-капіляр; 6 - пружина; 7 - шарнірне з'єднання.

При зміні температури оточуючого середовища тиск термометричної речовини змінюється, що призводить до деформації манометричної пружини та переміщення її вільного кінця. Це переміщення перетворюється в обертання реєструючої стрілки відносно шкали приладу.

На результати вимірювань таких термометрів можуть вплинути різні зовнішні умови, такими як коливання атмосферного тиску, зміни температури навколишнього середовища, висота, на якій розташовані термобалон та пружина. Манометричні термометри мають обмежену довжину зв'язку від термобалона до вказівного пристрою, а також виявляють велику інерцію та динамічну похибку.

Точність таких термометрів може бути оцінена на рівні 1,0; 1,5; 2,5 та 4,0, при цьому вони працюють в діапазоні температур оточуючого повітря $-5 - +50$ °C, при цьому допустима вологість повітря $> 80\%$. Манометричні термометри застосовуються для вимірювання

температури охолоджувальної води, повітря, рідкого та газоподібного палива, а також на заправних станціях [5].

Оскільки цей тип термометрів піддається впливу різних зовнішніх факторів, його показання не забезпечує необхідну точність вимірювань, тому він не підходить для наших потреб.

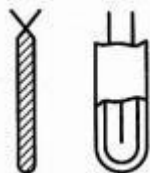
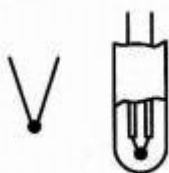
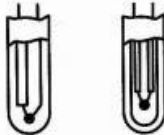
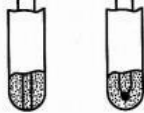
1.1.5 Термометри опору

Термометр опору складається з чутливого елемента - терморезистора, захисної оболонки та з'єднувальної головки. Принцип дії чутливого елемента базується на залежності електричного опору речовини від температури. Для виготовлення таких пристроїв використовують чисті метали: платину, нікель, мідь, а також напівпровідники. Основним матеріалом для виготовлення термометрів опору є платина. У якості чутливого елемента в напівпровідникових термометрах опору використовують германій, оксиди міді та марганцю, магнію та титану.

У таблиці 1.2 наведено характеристики термометрів опору, їх принципові схеми, переваги й недоліки, а також області застосування.

Таблиця 1.2

Основні характеристики електричних контактних термометрів

Характеристики	Термометри опору		Термоелектричні термометри	
	Металеві	напівпровідникові	стандартні	у тонкому чохлі
				

Межі вимірів, °C	-200...+800	-150...+450	0...+1600	0...+2500
Похибка вимірювання, %	±0,5	±(1... 5)	±0,5	±0,5
Інерційність	Велика	Мала	Велика	Мала
Переваги	Висока точність, лінійна статична характеристика	Висока чутливість, можливі вимірювання у точці	Мала вартість, хороша лінійність статичної характеристики	Міцність, мала теплова інерція, лінійна статична характеристика
Недоліки	Неможливо вимір температури в точці	Нелінійна статична характеристика, великий розкид параметрів, низька стабільність параметрів у часу	Велика теплова інерція	Невідомі
Галузь застосування	Енергетика, безперервні технологічні процеси в хімії, харчова промисловість	Енергетика, технологічні процеси в хімії, виробництво штучних матеріалів, медицина	Енергетика, безперервні виробництва, харчова промисловість	Енергетика, безперервні виробництва, медицина, будівництво, виробництво штучних матеріалів

На рис. 1.4, а. показана одна зі структур промислових термометрів з опором, яка використовується для вимірювання температури рідин і газів. Термометр складається з чутливого елемента (5), розташованого у захисному кожуху зі сталі (3), на якому зварений штуцер (2). Проводи (9), які мають фарфорові ізолятори (4), з'єднують виводи чутливого елемента

(5) з клемною колодкою (б), що знаходиться у корпусі головки (1). У верхній частині головки (1) є кришка (10), а у нижній - ущільнювальний проклад (7), через який прокладається монтажний кабель (8).

Чутливий елемент термометра з опором (рис. 1.4, б) виготовлений з тонкого металевого дроту товщиною від 0,03 до 0,1 мм, який намотаний безіндукційно на каркас або без каркасу.

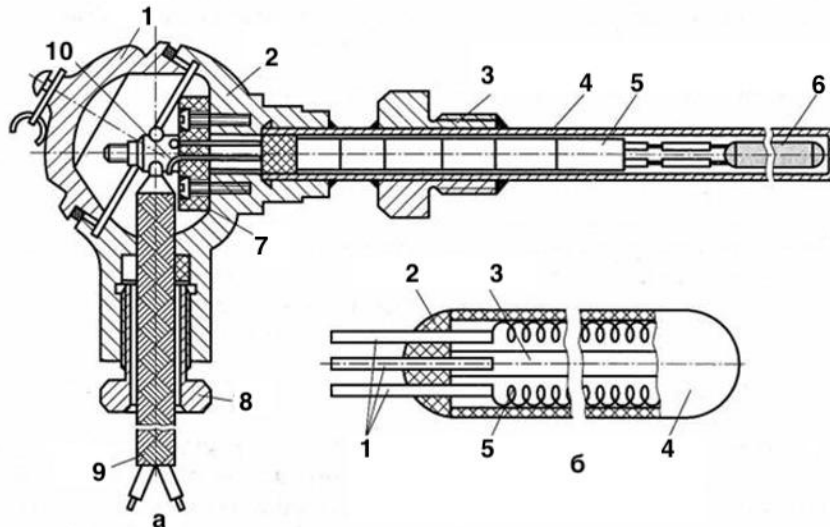


Рис. 1.4 Термометр опору:

а - конструкція термометра: 1 - кришка; 2 - корпус головки; 3 - штуцер; 4 - захисний кожух; 5 - фарфорові намисто; 6 - чутливий елемент; 7 - клемна колодка; 8 - сальниковий введення; 9 - монтажний кабель; 10 - дроти; б - конструкція чутливого елемента термометра: 1 - виводи; 2 - глазур; 3 - простір; 4 - каркас; 5 - платинові спіралі.

Платинові термометри використовують кераміку на основі оксиду алюмінію та плавлений кварц як матеріали для каркасу. У каналах каркаса (2) розташовані чотири (або дві) послідовно з'єднані платинові спіралі (3). Верхні кінці спіралей припаяні до виводів (4), виконаних з платини або сплаву іродію з радієм. Простір (1) між спіралями та каркасом заповнений порошком оксиду алюмінію. Кріплення спіралей та виводів в каркасі виконується глазур'ю (10).

При використанні термометрів опору температуру можна визначити за зміною електричного опору чутливого елемента, падінням напруги на ньому при постійному струмі або значенням струму при постійній напрузі.

Найбільш поширеною є схема, коли зміна опору служить мірою температури (рис. 1.5). У цьому випадку терморезистор (10) підключають до однієї з діагоналей моста послідовно з регулюючим резистором R_V , який служить для приведення опору введених проводів до певного значення. Показання гальванометра (2), який включений до діагоналі моста, також залежать від напруги живлення моста, для забезпечення стабільності якої до ланцюг живлення включають регулюючий резистор [6].

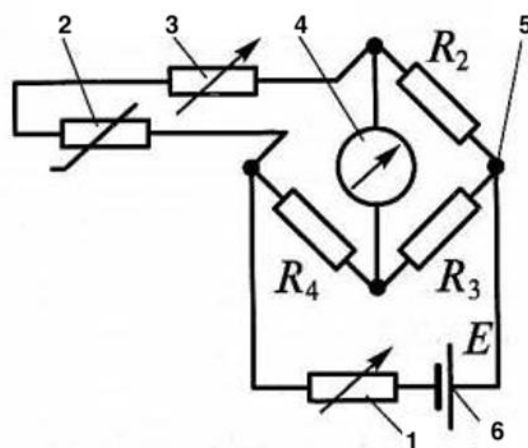


Рис. 1.5 Схема включення термометра опору:

- 2 - терморезистор; 3 - зрівняльний резистор R_A ; 4 - гальванометр; 5 - вимірювальний міст із резисторами R_1, R_2, R_3, R_4, R_A ; 6 - джерело живлення; 1 - регулювальний резистор R_V .

Метод вимірювання температури, який найкраще відповідає нашому пристрою, є фундаментом для розробки диференціальних термометрів з використанням даної схеми.

1.1.6 Термоелектричні термометри

Термоелектричні термометри складаються з термопари, захисного покриття та з'єднувальної головки. Принцип їх роботи ґрунтується на термоелектричних властивостях чутливого елемента.

Суть методу полягає в появі електродиференційної сили (ЕДС) у точці з'єднання двох різних провідників, які мають різну температуру. Щоб мати залежність термоелектродиференційної сили від однієї температури T_2 , необхідно підтримувати температуру T_1 на постійному рівні, зазвичай 0 або $+20$ °С. Точку з'єднання, що знаходиться в середовищі, яке вимірюється, називають "гарячою" або "робочою" кінцевою точкою, а точку з'єднання, температура якої підтримується постійною, - "холодною" або "вільною" кінцевою точкою.

Для збільшення чутливості вимірювання температури за допомогою термоелектричного методу використовують так звану "термобатарей". Термобатарея - це декілька послідовно з'єднаних термопар, де "гарячі" точки знаходяться при температурі T_2 , а "холодні" точки - при відомій і постійній температурі T_1 . Для термопар найчастіше використовують комбінації матеріалів, які мають високе значення термоелектродиференційної сили, стабільні характеристики при різних температурах, відтворюваність та лінійну залежність термоелектродиференційної сили від температури.

Для вимірювання термоЕДС, що виникає при підключенні до холодного з'єднання термопари, існують два варіанти схеми.

У першому варіанті (рис. 1.6, а) містяться три з'єднання: гаряче (2) і два холодні (1 і 3). В цьому випадку необхідно забезпечити постійну температуру холодних з'єднань. Для вимірювання термоЕДС у цій схемі використовується відповідний вимірювальний прилад.

У другому варіанті (рис. 1.6, б) містяться чотири з'єднання: гаряче (4), холодне (1) і два нейтральні (2) і (3). В цьому випадку необхідно забезпечити однакову температуру нейтральних з'єднань. Для вимірювання термоЕДС в цій схемі вимірювальний прилад підключається до розриву одного з термоелектродів [7].

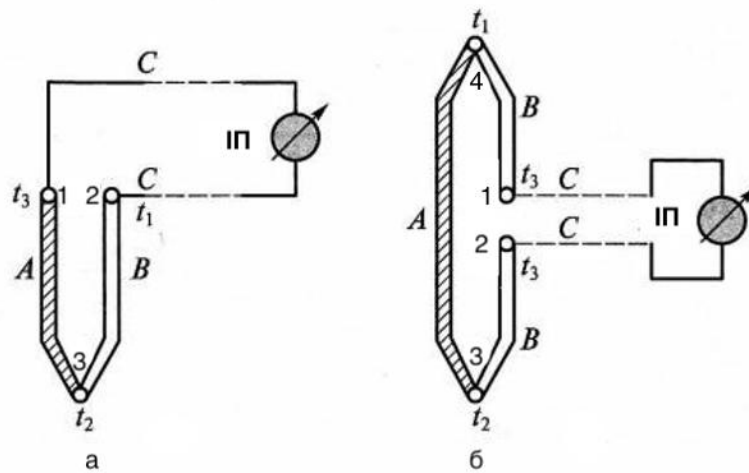


Рис. 1.6 Схеми включення вимірювального приладу:

а: 1 та 2 - холодні спаї; 3 - гарячий спай; б: 4-холодний спай; 1 та 2 - нейтральні спаї; 3 - гарячий спай.

Цей метод вимірювання температури, який ми можемо використовувати в нашому пристрої, базується на термопарах. Ці пристрої мають широкий діапазон вимірювань і високу точність, що дозволяє здійснювати вимірювання температури в різних середовищах, включаючи навіть агресивні умови.

1.2 Безконтактний вимір температури

Пірометри вимірюють параметри теплового випромінювання нагрітого об'єкта, дозволяють визначити його температуру. Ці прилади оперують електромагнітними хвильними довжинами, що відповідають

тепловому випромінюванню. Діапазон вимірювання пірометрів становить від 100 °С до 6000 °С і більше.

Фізичні тіла можуть мати два типи спектрів випромінювання: неперервний та селективний. Неперервний спектр властивий твердим та рідким речовинам, тоді як гази характеризуються селективним спектром. Ультрафіолетове випромінювання охоплює діапазон від 0,02 до 0,4 мкм, видиме випромінювання - від 0,4 до 0,76 мкм, а інфрачервоне випромінювання - від 0,76 до 400 мкм. Загальне випромінювання, яке тіло випромінює у всьому спектрі, називається інтегральним випромінюванням, а випромінювання при певній довжині хвилі - монохроматичним.

На основі законів випромінювання були розроблені різні типи пірометрів:

- Пірометри загального випромінювання вимірюють повну енергію випромінювання.
- Пірометри часткового випромінювання вимірюють енергію в обмеженому спектральному діапазоні за допомогою фільтрів або приймачів.
- Пірометри спектрального відношення вимірюють інтенсивність випромінювання визначених спектральних діапазонів.

При вимірюванні температури реального об'єкта пірометри загального випромінювання вказують на радіаційну температуру тіла, тому їх називають радіаційними пірометрами.

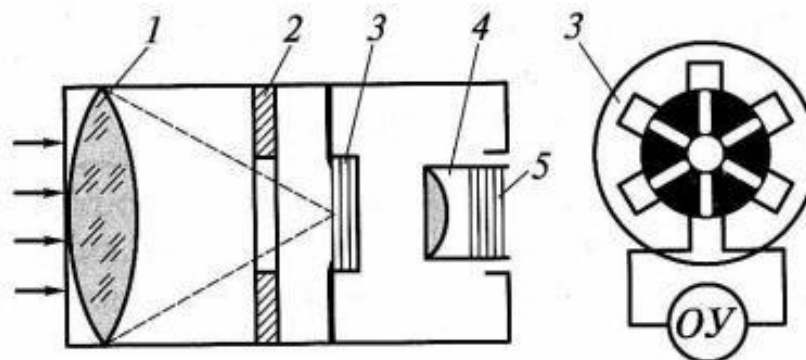


Рис. 1.7 Схема радіаційного пірометра:

1 - лінза; 2 - діафрагма; 3 - приймач випромінювання; 4 - окуляр; 5 - фільтр; ОУ - відліковий пристрій.

У радіаційному пірометрі (рис. 1.8) промені випромінювання від нагрітого об'єкта проникають через лінзу (1), яка спрямовує їх на приймач випромінювання (3) за допомогою діафрагми (2). Приймач випромінювання складається з багатьох термопар, які з'єднані послідовно, а гарячі спаї мають форму секторних тонких пластинок. Сигнал з термопар передається до пристрою для вимірювання. Налаштування радіаційного пірометра на об'єкт вимірювання здійснюється через окуляр (4) з фільтром (5) [8].

РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ПРИЛАДУ

2.1 Необхідні технічні характеристики пристрою

Після вивчення інформації про прилад були сформульовані наступні завдання:

- Визначити технічні характеристики приладу.
- Вивчити принцип диференційного вимірювання температури.
- Провести огляд і визначити елементну базу, на якій буде зібраний прототип приладу.
- Спроекувати блок-схему.

Для прототипу лабораторного диференційного термометра необхідно врахувати такі технічні характеристики:

- Діапазон вимірювання повинен становити від 0 до $+120^{\circ}\text{C}$;
- Точність вимірювань має бути не гіршою за $0,001^{\circ}\text{C}$.

2.2 Принцип диференціального виміру температури

Для вимірювання різниці температур найбільш відомим методом є використання мостових схем з терморезисторами.

У цьому методі два терморезистори, R_{t1} і R_{t2} , підключаються до сусідніх гілок вимірювального моста, а диференційний підсилювач підключається до вимірювальної діагоналі моста. На міст подається напруга живлення V_{in} . Струм, що протікає через мостову схему, розподіляється між гілками пропорційно їх опорам. Більша різниця опору гілок моста призводить до більшого струму через вимірювальну діагональ.

Кожна гілка моста виконує роль подільника напруги, створюючи падіння напруги в кожній гілці моста. При зміні опору терморезистора

змінюється також напруга в відповідній гілці. Диференціальний підсилювач, підключений до вимірювальної діагоналі, підсилює різницю напруг на сусідніх гілках моста.

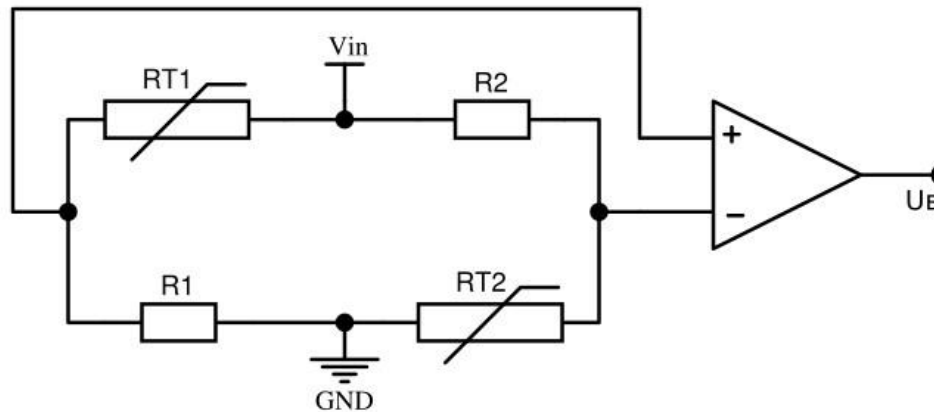


Рис. 2.1 Мостова схема з диференціальним підсилювачем.

На сьогоднішній день, для вирішення нашої задачі, все більш популярним стає використання інтегральних датчиків температури на основі мостових схем, які вже включають в себе аналого-цифровий перетворювач. Це забезпечує зручність і простоту використання, оскільки такі датчики можна безпосередньо підключити до мікроконтролера, не потребуючи будівництва додаткових схем [9].

2.3 Недоліки аналогів приладу

Метою даної роботи було створення первинного вимірювального перетворювача для вимірювання різниці температур і відповідного вторинного сигнального перетворювача, які забезпечували б роздільну здатність на рівні $0,001^{\circ}\text{C}$.

Були виявлені проблеми та визначені принципи підвищення роздільної здатності диференціальних термометрів до рівня $0,001^{\circ}\text{C}$, що на декілька порядків краще, ніж у відомих аналогів.

Першочерговими термочутливими вимірювальними пристроями є термопари, терморезистори та напівпровідникові структури на р-n-переходах. Високочутливі термометри вимагають забезпечення стабільності сигналу та мінімізації самонагрівання первинного пристрою, а також можливості якісного посилення та подальшого аналого-цифрового перетворення сигналу.

З точки зору вказаних вимог, використання термопар у диференціальних термометрах з високою роздільною здатністю стикається з проблемою низького рівня сигналу. Для досягнення роздільної здатності $0,001^{\circ}\text{C}$ при чутливості термопари кількома десятками мікрвольт на градус, необхідна порогова чутливість вторинного сигнального пристрою термопари не менше $0,01$ мкВ. Додатковими проблемами є недостатня часова стабільність термопар та обмеження просторового розташування зон вимірювання.

Терморезистори також мають проблему самонагрівання при подачі електричного струму. Напр., для терморезисторів з тепловим опором структур на рівні $500^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ та максимальному перегріві не більше $0,001^{\circ}\text{C}$, максимальна потужність, що виділяється на резисторі, не повинна перевищувати 2 мкВт. Зокрема, така потужність вимагається для термометрів з опором, напр., металевих мідних терморезисторів, які мають опір $R_{Cu}(T_0) = 100$ Ом. Це обмежує максимальний робочий струм на рівні $0,14$ мА, враховуючи температурний коефіцієнт опору міді $TKC_{Cu} = 0,4\%/^{\circ}\text{C}$, що призводить до чутливості приблизно 50 мкВ/ $^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, для досягнення роздільної здатності $0,001^{\circ}\text{C}$, порогова чутливість вторинного перетворювача повинна бути не менше $0,05$ мкВ.

Складним завданням є створення вторинних перетворювачів сигналу з такими значеннями чутливості та стабільності [10].

2.4 виправлення недоліків

Для вирішення поставленої задачі можна використовувати біполярні транзистори як первинні перетворювачі температури.

Вихідний сигнал таких транзисторних схем відображає зміну температури. На сьогоднішній день на ринку доступний широкий вибір твердотільних інтегральних схем термосенсорів, що включають TMP35, AC590 (аналоговий вихід), AD7416, ADM1028 (цифровий вихід), AD22105, TMP01, TMP02 (контролери температури).

Однак роздільна здатність таких інтегральних сенсорів температури зазвичай обмежується значеннями від 0,03 до 0,1°C.

Для вимірювання різниці температур була обрана схема диференційного транзисторного каскаду, яка широко використовується у сучасних інтегральних схемах, включаючи операційні підсилювачі, аналогові множники, цифрові елементи логіки, що базуються на з'єднанні через емітер і т.д.

Для початкового огляду залежності вихідного сигналу диференційного каскаду будемо використовувати систему рівнянь для розподілу струмів:

$$\begin{cases} I_{C1} = \alpha_1 I_{E1}; \\ I_{C2} = \alpha_2 I_{E2}; \\ I_{E1} + I_{E2} = I_{\Sigma E}, \end{cases} \quad (2.1)$$

де

$$I_{E1} = I_{SE10} \exp\left(\frac{U_{BE1}}{m_1 \varphi_T} - 1\right);$$

$$I_{E2} = I_{SE20} \exp\left(\frac{U_{BE2}}{m_2 \varphi_T} - 1\right)$$

I_{C1}, I_{E1} — відповідні колекторний та емітерний струми транзистора VT1;

I_{C2}, I_{E2} — відповідні колекторний та емітерний струми транзистора VT2;

α_1, α_2 — коефіцієнти передачі струму транзисторів VT1 та VT2 (зазвичай $\alpha=0,99_0,995$);

U_{BE1}, U_{BE2} — напруги емітерно-базових р-п-переходів транзисторів;

I_{SE10}, I_{SE10} , — відповідно струми насичення та коефіцієнти неідеальності

m_1, m_2

цих р-п-переходів;

φ_T — температурний потенціал, $\varphi_T = kT/q$ (в подальшому розрахунку приймемо, що при кімнатній температурі;

k — постійна Больцмана;

T — абсолютна температура;

q — заряд електрона

$I_{\Sigma E}$ — сумарний струм, що тече через емітерні р-п-переходи транзисторів.

Різниця колекторних струмів транзисторів є інформаційним сигналом, який вказує на різницю температур ΔT .

$$\Delta I_C(\Delta T) = I_{C2}(T_2) - I_{C1}(T_1).$$

Оскільки потужність, яка виділяється на транзисторі, P , не повинна перевищувати 2 мкВт при напрузі "колектор-емітер" $U_{CE} \approx 2 \text{ В}$, це обмеження потужності визначає величину колекторних струмів $I_{C21}(T_0) = I_{C2}(T_0) = 1 \text{ мкА}$, де T_0 - значення опорної температури.

Припускаючи, що напруга на емітерних р-п-переходах транзисторів значно перевищує температурний потенціал, тобто $U_{BE}/(m\phi_T) \gg 1$, і такі параметри, як α , I_{E0} та m , однакові для обох транзисторів каскаду, співвідношення колекторних струмів можна виразити як:

$$\frac{I_{C2}}{I_{C1}} = \frac{\alpha I_{E0} \exp(U_{BE2}(T_2)/(m\phi_T))}{\alpha I_{E0} \exp(U_{BE1}(T_1)/(m\phi_T))} = \exp \frac{\Delta U_{BE}(\Delta T)}{m\phi_T}, \quad (2.2)$$

Де $U_{BE}(\Delta T) = U_{BE2}(T_2) - U_{BE1}(T_1)$.

При використанні диференційного транзисторного каскаду для вимірювання різниці температур, емітерні р-п-переходи обох транзисторів підключаються паралельно, отже, на них застосовується однакове напруга. Різниця колекторних струмів транзисторів виникає через температурні зміни висоти потенціального бар'єру переходів. Цю різницю можна описати формулою $\Delta U_{BE}(\Delta T) = TKU_{pn} \cdot \Delta T$, де TKU_{pn} - температурний коефіцієнт зниження напруги на прямосполученому р-п-переході при фіксованому струмі. Зазвичай $TKU_{pn} \approx - (1.8—2.2) \text{ мВ/}^\circ\text{С}$.

Розглянемо зміну співвідношення струмів у диференційному транзисторному каскаді при збільшенні різниці температур на $\Delta T = 1^\circ\text{С}$. Використовуючи наближення $\exp(x) \approx 1 + x$, можемо записати формулу (2) в такому вигляді:

$$\frac{I_{C2}}{I_{C1}} \approx 1 + \frac{\Delta U_{BE}(\Delta T)}{m\phi_T}, \quad (2.3)$$

тоді для $0 < x \ll 1$ виходить

$$\frac{I_{C2}}{I_{C1}}(\Delta T = 1^\circ\text{С}) \approx 1 + \frac{1[\text{мВ}]}{30[\text{мВ}]} \approx 1,066.$$

Таким чином, використання диференційного транзисторного каскаду як перетворювача різниці температур дозволяє досягти високої температурної чутливості, що перевищує можливості металевих

терморезисторів. Біполярні транзистори, які використовуються в цій схемі, мають переваги перед напівпровідниковими термісторами у відношенні лінійності та стабільності [11].

Для оптимізації режимів роботи диференційного каскаду в якості первинного перетворювача різниці температур, можна скористатися програмами схемного моделювання, такими як PSpice або Micro-CAP. Ці програми дозволяють змінювати температуру окремих елементів схеми, що дозволяє досягти оптимальних результатів. Напр., параметр `T_REL_GLOBAL` вводиться в цих програмах для моделювання біполярних транзисторів.

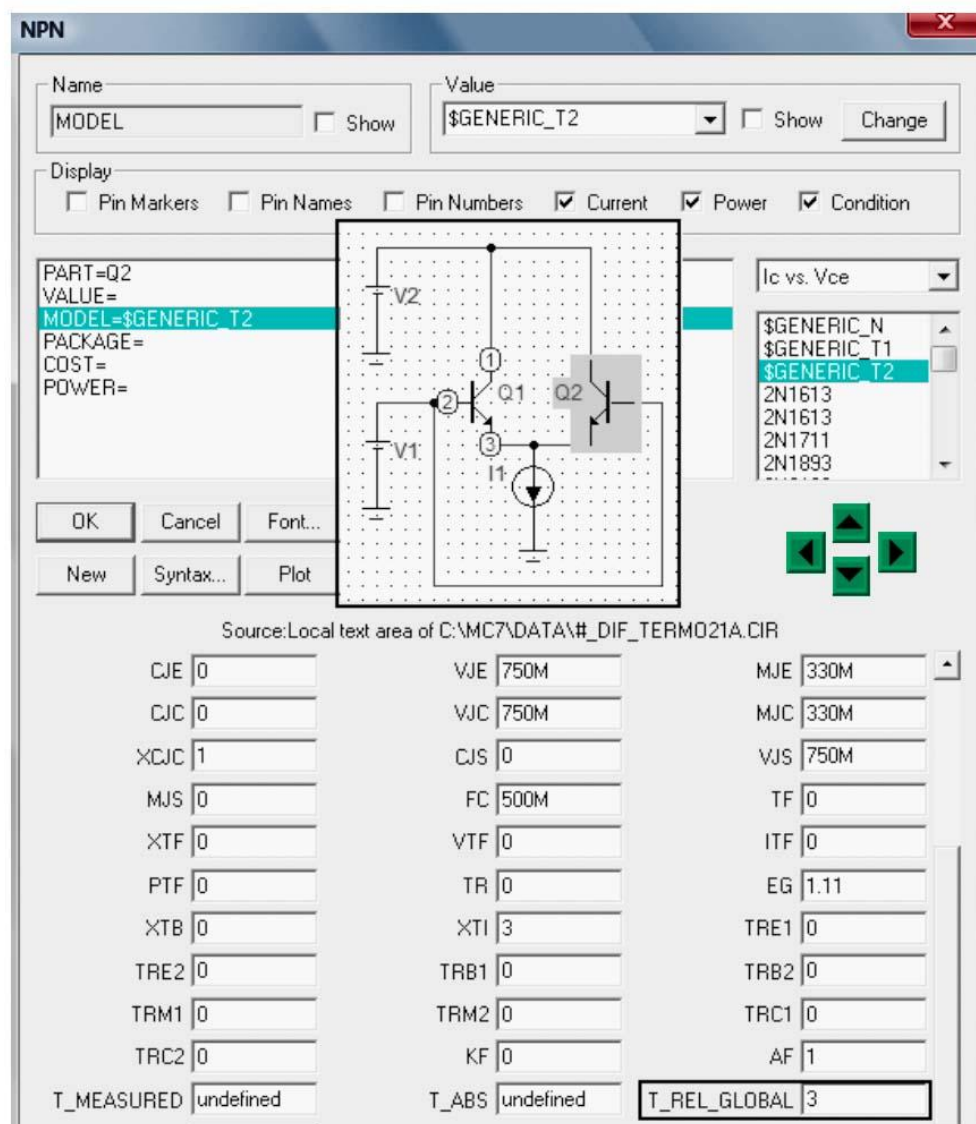


Рис 2.2 Визначення температури T_REL_GLOBAL моделі біполярного транзистора у програмі MicroCap

На рисунку 2.2 показано приклад використання такого параметра для моделі біполярного транзистора, який використовується у диференційному каскаді. Схема каскаду накладена на вікно для більш зрозумілого зображення.

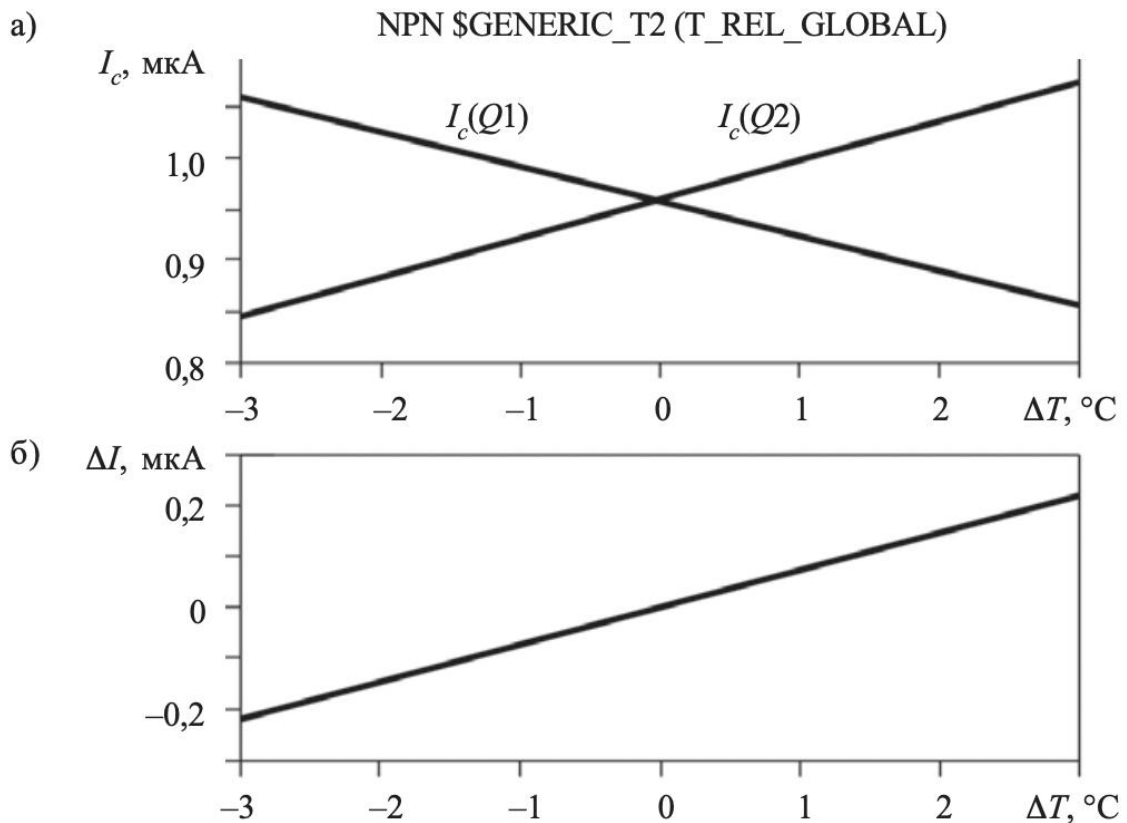


Рис. 2.3 Змодельована температурна колекторна залежність струмів у транзисторах $q1, q2$ (а) і різниця цих струмів $\Delta I = I_c(q2) - (q1)$ (б)

На рисунку 2.3 наведенні результати моделювання температурної залежності сигналів первинного перетворювача диференційного термометра. Біполярні транзистори $q1, q2$ використовують модельний параметр $NPN \$GENERIC_T2$. Змінна величина $NPN \$GENERIC_T2 (T_REL_GLOBAL)$ відображає різницю температур між

ΔT транзистором $Q2$ і іншими елементами схеми (транзистором $Q1$).
Зауважимо, що при балансованому каскаді з колекторними струмами $I_C(Q1) = I_C(Q2) \approx 0,96 \text{ мкА}$, температурний коефіцієнт різниці цих струмів (вихідний сигнал первинного перетворювача) складає приблизно $65 \text{ нА/}^\circ\text{C}$, що підтверджує наші розрахунки [12].

РОЗДІЛ 3

ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ТЕРМОМЕТРА

3.1 Елементна база

ADuC834 - це інтегральна мікросхема, яка належить до сімейства мікроконтролерів MicroConverter від компанії Analog Devices.

Поєднує в собі 8052-сумісний мікроконтролер з 8-бітним процесором, 8 КБ програмованої флеш-пам'яті, 512 байт оперативної пам'яті та 24-бітний аналого-цифровий перетворювач високої роздільної здатності.

Він підтримує різноманітні інтерфейси, такі як UART, I2C, SPI та GPIO, що дозволяє безпроблемну комунікацію з іншими пристроями та зовнішніми компонентами. Працює від одного джерела живлення 3,3 В або 5 В [13].

Цей мікроконвертер може бути успішно використаний в дипломному проекті для розробки електронних систем, сенсорних пристроїв, вимірювальних інструментів та інших застосувань, що вимагають високоточного аналого-цифрового перетворення і обробки сигналу. Включення цієї інформації про компонентну базу в дипломний проект надасть читачам краще розуміння технологічних рішень, що використовуються в дизайні та реалізації проекту.

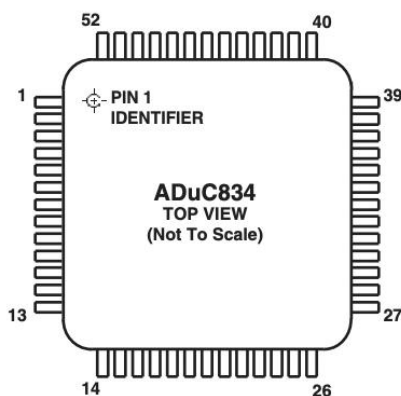


Рис.2.4 Мікросхема ADuC834

FT232R є відомим USB-контролером, розробленим компанією FTDI (Future Technology Devices International Limited).

FT232R є високопродуктивним USB-контролером, який надає широкі можливості для зв'язку між комп'ютером і зовнішніми пристроями через USB-інтерфейс. Він підтримує швидкості передачі даних до 3 Мбіт/с і має вбудований USB 2.0 Full-Speed Transceiver.

Підтримує різні інтерфейси, включаючи USB 2.0, UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) та GPIO (General Purpose Input/Output), що дозволяє його використовувати для різних застосувань, включаючи комунікацію зі сховищами даних, мікроконтролерами, сенсорами та іншими пристроями.

Працює від напруги живлення 3,3 В або 5 В, що забезпечує його сумісність з різними джерелами живлення [14].

FT232R є надійним і широко використовуваним USB-контролером, який забезпечує зручне підключення та комунікацію з пристроями через USB-інтерфейс. Використання FT232R у дипломному проекті дозволяє реалізувати USB-зв'язок з зовнішніми пристроями, забезпечити обмін даними і контроль над ними. Додавання інформації про FT232R до частини елементної бази диплому дозволить читачам отримати краще розуміння компонентів та технологічних можливостей, які використовуються для реалізації проекту.

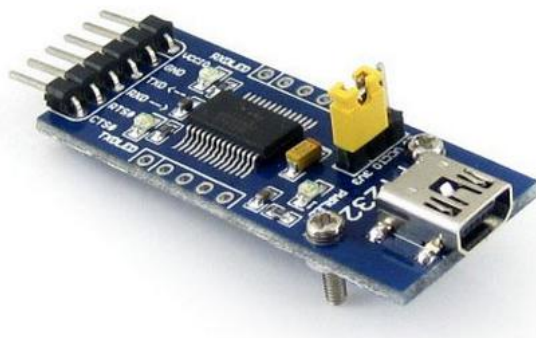


Рис.2.5 USB- інтерфейс FT232R

ADP3367AR є інтегральний стабілізатор напруги, що був розроблений компанією Analog Devices. Його основне призначення полягає в забезпеченні стабільної вихідної напруги в електронних пристроях. Цей стабілізатор відрізняється високою точністю та стабільністю вихідної напруги, а також має вбудовані захисні функції для запобігання перевантаження, короткого замикання та перенапруги.

Може працювати з широким діапазоном вхідних напруг, від 2,5 до 6 В. Він забезпечує вихідну напругу від 1,8 до 5 В та струм до 500 мА. Крім того, стабілізатор характеризується низьким споживанням енергії в режимі очікування та працює в широкому діапазоні температур.

ADP3367AR є популярним компонентом у різних електронних пристроях, таких як мобільні телефони, планшети, камери, аудіо- та відеоапаратура, а також в домашніх пристроях Інтернету речей. Використання цього стабілізатора допомагає забезпечити стабільну роботу електронних схем та захистити їх від небажаних впливів напруги [15].

Включення даного компоненту до складу елементної бази дипломної роботи дозволить продемонструвати його використання для стабілізації напруги в рамках проекту. Це також підкреслить технологічні можливості та використання сучасних компонентів при розробці електронних пристроїв.

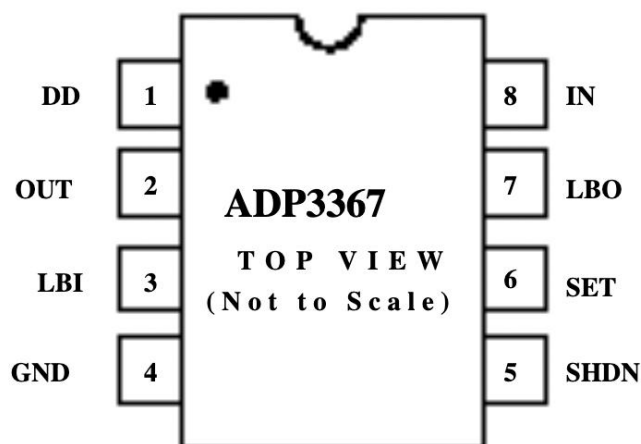


Рис.2.6 Стабілізатор напруги ADP3367AR

BC817 - це набір біполярних транзисторів типу n-p-n, доступних у мікрокорпусному виконанні SOT23. Залежно від конкретної моделі, максимальна напруга колектор-емітер може варіюватися (напр., BC817-25 - до 45 В). Так само, максимальний струм колектора різниться від варіанту до варіанту (напр., BC817-25 - до 500 мА, BC817-40 - до 800 мА). Коефіцієнт підсилення (h_{FE}) також може бути різним в залежності від конкретної моделі (напр., BC817-25 - від 110 до 220, BC817-40 - від 200 до 450) [16].

Мікрокорпус SOT23 характеризується компактними розмірами та малою площею монтажу, що робить його зручним для використання у пристроях з обмеженим простором. Транзистори BC817 знаходять широке застосування в радіоприймачах, аудіо підсилювачах, логічних схемах, джерелах живлення та інших електронних пристроях. Вони мають низький опір відкритого колектора, високий коефіцієнт підсилення і швидкий час комутації, що робить їх ефективними у багатьох застосуваннях [16].



Рис.2.7 Біполярний транзистор BC817

AD8552 є диференційним операційним підсилювачем, розробленим компанією Analog Devices. Цей пристрій має високу точність і низький рівень шуму, що дозволяє йому забезпечувати високу якість підсилення сигналів у широкому діапазоні застосувань (рис. 2.8).

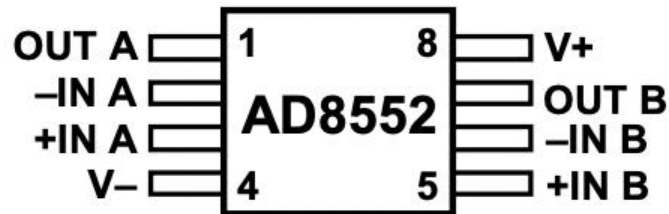


Рис.2.8 Операційним підсилювач AD8552

Основні характеристики AD8552 включають:

- Дві незалежні підсилювачі на одному чіпі, що дозволяє обробляти два вхідних сигнали одночасно.
- Висока точність і стабільність по всьому діапазону температур і напруги живлення.
- Великий діапазон вхідних сигналів і висока вхідна опірність.
- Низький рівень шуму і спотворень, що забезпечують високу якість сигналу.
- Високий коефіцієнт підсилення і швидкодія [17].

AD8552 може бути використаний у багатьох застосуваннях, включаючи вимірювання температури, медичну апаратуру, вимірювальні системи, промислові контролери і багато інших. Його можна інтегрувати в схеми, де потрібно точне і надійне підсилення сигналів.

3.2 Розробка функціональної блок-схеми

На рисунку 3.1 зображено функціональну блок-схему диференціального термометра. Диференціальний каскад, який складається з транзисторів VT1 і VT2, виконує роль першого перетворювача різниці

температур. Вихідна напруга перетворювача формується на резисторах R1 і R2, а струм каскаду визначається резистором R3. Опорна напруга V_{REF} , яка застосовується до базових ланок транзисторів, становить приблизно 1,5 В. Для реалізації буферного підсилювача сигналу з квазідиференціальною конфігурацією використовуються операційні підсилювачі DA1, DA2 та резистори зворотного зв'язку R4, R5, R6. Буферний підсилювач виконує функцію роз'єднання мікросилових ланок першого перетворювача від вхідних ланок аналого-цифрового перетворювача, що представлений 24-бітовим мікроконвертером ADuC834 (24-Bit MicroConverter, Analog Devices, USA).

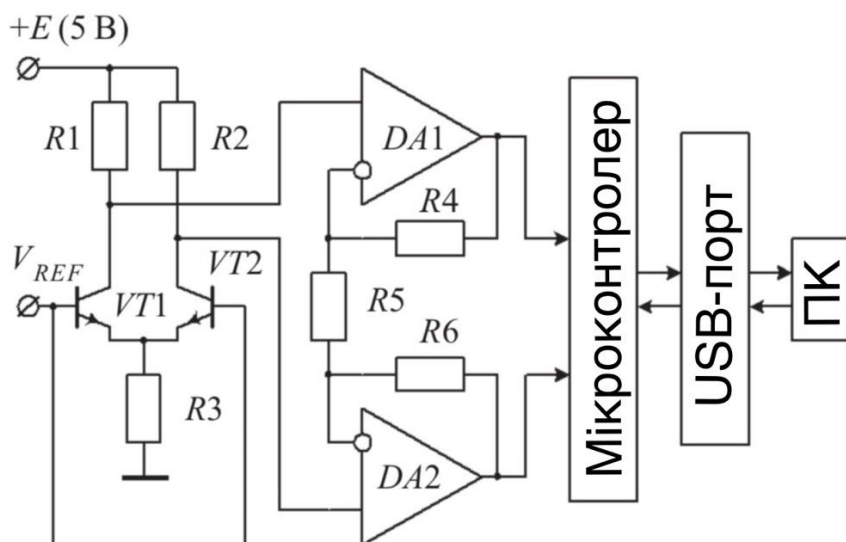


Рис.3.1 Функціональна блок-схема

Окрім високоточного $\Sigma\Delta$ аналого-цифрового перетворювача, мікроконвертер містить всі необхідні компоненти для створення сенсорних систем: мікропроцесорне ядро, підсилювач з програмним керуванням коефіцієнтом підсилення, таймери, цифро-аналоговий перетворювач, точне джерело опорної напруги, оперативну та енергонезалежну пам'ять, широкий набір інтерфейсів тощо. Керування режимами роботи та передача вимірювальних даних до персонального комп'ютера виконуються через USB-порт на основі інтерфейсного контролера FT232R.

3.3 Основні характеристики розробленого диференційного термометра

Оскільки це підрозділ дипломної роботи, нижче наведено додатковий текст, що доповнює основні характеристики розробленого диференційного термометра:

Для досягнення зазначених характеристик, в розробленому диференційному термометрі використовується високочутливий терморезистор, який забезпечує точне і стабільне вимірювання температурної різниці. Внутрішній аналоговий сигнал, отриманий від терморезистора, піддається підсиленню та конвертується в цифровий сигнал за допомогою високоефективного аналого-цифрового перетворювача.

Дві вимірювані діапазони температурної різниці дозволяють адаптувати диференційний термометр до різних застосувань, де необхідно вимірювати як невеликі, так і більші зміни температури. Роздільна здатність не гірша за $0,001^{\circ}\text{C}$ дозволяє отримати дуже точні вимірювання, що особливо важливо у вимогливих дослідницьких або промислових застосуваннях.

Робочий діапазон температур від -40°C до $+120^{\circ}\text{C}$ дозволяє використовувати термометр у широкому спектрі середовищ, включаючи екстремальні умови. Напруга живлення $+5\text{ В}$ забезпечує сумісність з різними джерелами живлення та забезпечує зручну інтеграцію з іншими електронними пристроями. Завдяки інтерфейсу USB, дані можуть бути передані на комп'ютер для подальшого аналізу, збереження або візуалізації.

Розроблений диференційний термометр є потужним інструментом для точного вимірювання температурної різниці в різних доменів

застосування. Його характеристики, включаючи широкий робочий діапазон, високу роздільну здатність та зручний інтерфейс, роблять його важливим компонентом для багатьох дослідницьких, промислових та технічних задач.

3.4 Переваги приладу

Значною перевагою запропонованої схеми диференціального термометра є практично повна відсутність впливу на точність вимірювання зв'язку між вузлом вимірювального перетворювача різниці температур і схемою обробки сигналу. Це пояснюється мікроамперним режимом роботи транзисторів вимірювального перетворювача, що відповідає високим значенням їх вхідного (база-емітер) та вихідного (колектор-емітер) опорів (десятки та сотні кілоом, відповідно). Крім того, вплив спінфазної складової паразитних завад у сигнальних ланках мінімізується диференціальним механізмом високоточного аналого-цифрового перетворення.

Живлення диференціального термометра може здійснюватися окремим джерелом напруги або від шини +5 В USB-порту. Для стабілізації напруги живлення використовується стабілізатор ADP3367AR з низьким втратним напругою.

У диференціальному каскаді використовуються n-p-n транзистори BC817 у мікросхемному виконанні SOT23. Схема відповідає вимогам сучасної високоточної електроніки з низьким енергоспоживанням. З цього погляду важливим є вибір КМОП мікросилових високоточних операційних підсилювачів AD8552 типу Zero-Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail. Останні характеризуються ультранізьким зміщенням напруги $V_{offset} < 1 \text{ мкВ}$ (температурний дрейф становить менше $0,005 \text{ мкВ/}^\circ\text{C}$),

струм споживання не перевищує $0,7 \text{ mA}$, напруга живлення - від $2,7$ до 5 V . Транзистори першого перетворювача диференціального термометра використовуються у мікросхемному виконанні SOT23.

Значною перевагою запропонованої схеми диференціального термометра є практично повна відсутність впливу на точність вимірювання зв'язку між вузлом вимірювального перетворювача різниці температур і схемою обробки сигналу. Це пояснюється мікроамперним режимом роботи транзисторів вимірювального перетворювача, що відповідає високим значенням їх вхідного (база-емітер) та вихідного (колектор-емітер) опорів (десятки та сотні кілоом, відповідно). Крім того, вплив спінфазної складової паразитних завад у сигнальних ланках мінімізується диференціальним механізмом високоточного аналого-цифрового перетворення.

Живлення диференціального термометра може здійснюватися окремим джерелом напруги або від шини $+5 \text{ V}$ USB-порту. Для стабілізації напруги живлення використовується стабілізатор ADP3367AR з низьким втратним напругою.

У диференціальному каскаді використовуються n-p-n транзистори BC817 у мікросхемному виконанні SOT23. Схема відповідає вимогам сучасної високоточної електроніки з низьким енергоспоживанням. З цього погляду важливим є вибір КМОП мікросилових високоточних операційних підсилювачів AD8552 типу Zero-Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail. Останні характеризуються ультранізьким зміщенням напруги $V_{offset} < 1 \text{ мкВ}$ (температурний дрейф становить менше $0,005 \text{ мкВ/}^\circ\text{C}$), струм споживання не перевищує $0,7 \text{ mA}$, напруга живлення - від $2,7$ до 5 V . Транзистори першого перетворювача диференціального термометра використовуються у мікросхемному виконанні SOT23.

ВИСНОВОК

У даній дипломній роботі було проведено детальний аналіз температурних датчиків та їхніх методів вимірювання температури. Були розглянуті різні типи датчиків, включаючи термопари, терморезистори, термістори та інфрачервоні датчики. Кожен з цих типів має свої переваги та обмеження, що потребує уваги при виборі датчика для конкретного призначення.

Для вимірювання температури середовища було рекомендовано використовувати диференційний термометр з високою точністю вимірювання, який використовує диференційний транзисторний каскад для первинного перетворення сигналу, а також високопрецизійні операційні підсилювачі AD8552 та мікроконвертер ADuC834 для обробки сигналу, оскільки він демонструє високу точність, стабільність та широкий діапазон вимірювання. Цей датчик може бути успішно використаний у різних сферах, включаючи промисловість, медицину та побутові застосування.

Процес проектування та виготовлення датчика для вимірювання температури середовища включав детальне вивчення характеристик обраного датчика, розробку схеми підключення у програмі схемного моделювання Мікро-CAP, вибір оптимального джерела живлення та розробку алгоритму обробки вимірюваної інформації. Проведене дослідження підтвердило високу ефективність та точність розробленого датчика.

Загалом, результати дослідження та розробки вказують на великий потенціал використання температурних датчиків для вимірювання температури середовища. Це може сприяти покращенню контролю температури в різних сферах та забезпеченню оптимальних умов для проведення процесів.

Проте, для подальшого розвитку даної теми рекомендується проведення додаткових досліджень, спрямованих на вдосконалення датчиків, збільшення їхньої чутливості та стабільності, а також розширення їхнього застосування в нових областях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Подопригора, Н. В., Волчанський, О. В., & Гур'євська, О. М. (2012). Термодинаміка і статистична фізика.
2. Козир, О. В. (2021). Підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів.
3. Василюха, Х. В. (2017). Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів. Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка».–Львів.
4. Дурєєв, В. О., & Бондаренко, С. М. (2022). ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.
5. Дмитерко, Ю. М. (2022). Розробка системи автоматизації багатокорпусної випарної установки.
6. Воробель, Р. А., Гук, О. П., & Сущик, К. В. (2004). Балансні наближення в оптимальному представленні характеристик термометрів опору.
7. Стадник, Б. І., & Яцишин, С. П. (2015). Термометричні шуми та метрологічні характеристики термоелектричних термометрів. Термоелектрика, (2), 71-82.
8. Бабич, О. О., & Александрова, Н. М. (2011). Визначення безконтактних методів вимірювання температури нагрітих тіл. Системи озброєння і військова техніка, (1), 69-71.
9. Протасов, А. Г. (2010). Формування професійної компетентності у процесі навчання спеціальним дисциплінам майбутніх фахівців з неруйнівного контролю та технічної діагностики. Вісник ЖДУ. Вип, 54, 58-61.
10. Лупина, Б. І. (2017). Мікромеханічні терморезисторні перетворювачі.
11. Азаров, О. Д., Медяний, Р. М., & Ткачук, А. П. (2018). Метод зменшення температурного дрейфу струму зсуву нуля у двотактних

- підсилювачах струму. Вісник Вінницького політехнічного інституту, (4), 15-22.
12. Готра, З. Ю., Голяка, Р. Л., & Бойко, О. В. (2014). Моделювання характеристики перетворення диференційного сенсора температури на біполярних транзисторах.
 13. Денисюк, В. О., & Цирульник, С. М. (2021). Мікропроцесорні системи управління: навч. посіб.
 14. integrated AVCC supply filtering-no, F., & Low, U. S. B. (2010). FT232R USB UART IC.
 15. Павлов, С. В., Вуйцік, В., Голяка, Р. Л., Тітова, Н. В., Никифорова, Л. Є., Азаров, О. Д., ... & Комарова, О. С. (2022). Особливості проектування теплових сенсорів потоку біомедичного призначення. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 44(2), 66-81.
 16. Abuelma'Atti, M. T., & Al-Qahtani, M. A. (1999). On the realization of the current controlled current-mode amplifier using the current controlled conveyor. *International Journal of Electronics*, 86(11), 1333-1340.
 17. Lai, X., Wang, C., & Ge, L. (2012, November). Research on Small Signal Amplification Circuit of Downhole Instrument. In *2012 National Conference on Information Technology and Computer Science* (pp. 498-501). Atlantis Press.