

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки
Кафедра електронних пристроїв та систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«__» _____ червня _____ 2025 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Електронні прилади та пристрої»
спеціальності 171 «Електроніка»
на тему: «Модуль датчика конденсаційного вологоміра»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ДЕ-11
Духно Антон Григорович

Керівник:

Доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент.
Михайлов Сергій Ростиславович

Консультант:

Рецензент:

Професор кафедри АМЕС, д.т.н., професор
Дідковський Віталій Семенович

Консультант

з нормоконтролю:
Доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент
Батрак Лариса Миколаївна

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

Студент _____

Київ – 2025 року

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

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 «Електроніка»

Освітньо-професійна програма «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«21» травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Духну Антону Григоровичу

1. Тема проєкту «Модуль датчика конденсаційного вологоміра»

керівник проєкту Михайлов Сергій Ростиславович Доцент, к.т.н

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання,

затверджені наказом по університету від «03» червня 2025 р. №1885-с.

2. Термін подання студентом проєкту: 11 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту: протокол SPI для передачі даних, напруга живлення від 4,5 до 20 В, діапазон вимірювання температур від -45 до + 25°C

4. Зміст пояснювальної записки:

огляд загальних відомостей про вологоміри для природного газу, класифікації методів вимірювання вологості природного газу, найбільш розповсюджених видів датчиків для вологомірів для природного газу та принципів їх роботи, поетапна розробка модуля датчика конденсаційного вологоміра, розробка прошивки мікроконтролера для перевірки роботоздатності приладу, виготовлення і випробування тестового зразка.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема електрична функціональна, схема електрична принципова, плата.

6. Консультанти розділів проекту:

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

7. Дата видачі завдання: 21 травня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури	21.05.2025 – 22.05.2025	
2	Розробка структурної та функціональної схеми	23.05.2025 – 24.05.2025	
3	Підбір компонентної бази, розробка і розрахунок принципової схеми	25.05.2025 – 27.05.2025	
4	Розробка друкованої плати	28.05.2025 – 29.05.2025	
5	Моделювання підсилювача сигналу фотодіоду	30.05.2025 – 31.05.2025	
6	Розробка прошивки мікроконтролера для перевірки роботоздатності приладу	01.06.2025 – 02.06.2025	
7	Виготовлення і випробування тестового зразка	03.06.2025 – 07.06.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки і кресленика, підготовка доповіді	08.06.2025 – 11.06.2025	
9	Захист дипломної роботи	17.06.2025	

Студент

Антон ДУХНО

Керівник

Сергій МИХАЙЛОВ

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячений розробці модуля датчика конденсаційного вологоміра для природного газу. Актуальність теми зумовлена неперервним щорічним зростанням об'ємів споживання природного газу і рядом недоліків більшості сучасних вологомірів.

Метою даного проєкту є розробка універсального модуля датчика для конденсаційних вологомірів. Для її досягнення були поставлені такі завдання:

- провести огляд науково-технічної літератури за напрямком роботи;
- провести комплексну поетапну розробку і проєктування пристрою;
- виготовити і випробувати тестовий зразок пристрою.

У ході роботи проведено огляд і аналіз існуючих рішень у галузі, проведено поетапну розробку модуля. Основну увагу приділено схемотехнічним і конструкторським рішенням.

У проєкті змодельовано роботу блоку підсилювача сигналу фотодіоду в програмному середовищі LTspice, розроблено прошивку мікроконтролера для перевірки роботоздатності модуля, виготовлено перший прототип модуля та проведено випробування в умовах, наближених до реальних умов експлуатації. Результати випробувань підтверджують правильність всіх рішень, які було прийнято на етапах проєктування і розробки.

Результати проєкту можуть бути використані для контролю вологості природного газу в контексті його видобутку, транспортування, обробки і використання.

Ключові слова: електроніка, вологомір, точка роси, природний газ.

ABSTRACT

The diploma project is dedicated to the development of a sensor module for a condensation moisture meter for natural gas. The relevance of the topic is due to the continuous annual growth in natural gas consumption and a number of shortcomings of most modern moisture meters.

The goal of this project is to develop a universal sensor module for condensation moisture meters. To achieve this, the following tasks were set:

- to review the scientific and technical literature in the field of work;
- to conduct a comprehensive phased development and design of the device;
- to manufacture and test a test sample of the device.

During the work, a review and analysis of existing solutions in the industry was conducted, a phased development of the module was carried out. The main attention was paid to circuit and design solutions.

The project simulated the operation of the photodiode signal amplifier unit in the LTspice software environment, developed microcontroller firmware to check the module's operability, manufactured the first prototype of the module and tested it in conditions close to real operating conditions. The test results confirm the correctness of all decisions made during the design and development stages.

The project results can be used to control the humidity of natural gas in the context of its production, transportation, processing and use.

Keywords: electronics, hygrometer, dew point, natural gas.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА НАПРЯМКОМ РОБОТИ.....	12
1.1 Загальні відомості про вологоміри для природного газу.....	12
1.1.1 Класифікація вологомірів.....	12
1.1.2 Системи відбору проб.....	13
1.1.3 Вимоги до промислових вологомірів.....	13
1.2 Класифікація методів вимірювання вологості природного газу.....	15
1.3 Найбільш розповсюджені види датчиків вологомірів для природного газу та їх принципи роботи	18
1.3.1 Керамічний датчик.....	18
1.3.2 Кварцові мікроваги	19
1.3.3 Лазерний абсорбційний спектроскоп.....	21
1.3.4 Напівпровідниковий оптичний детектор точки роси.....	23
Висновки до першого розділу.....	26
2 РОЗРОБКА МОДУЛЯ ДАТЧИКА	27
2.1 Постановка технічного завдання	27
2.2 Розробка структурної схеми модуля	28
2.3 Розробка функціональної схеми модуля.....	29
2.4 Підбір компонентної бази	30
2.5 Розробка принципової схеми та її розрахунок.....	35
2.6 Розробка друкованої плати.....	39
Висновки до другого розділу	41
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	43
3.1 Моделювання блоку підсилювача сигналу фотодіоду.....	43

<i>ДП.ДЕ11.04.000 ПЗ</i>				
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
<i>Розроб.</i>		Духно А.Г.		
<i>Перевір.</i>		Михайлов С.Р.		
<i>Н. Контр.</i>		Батрак Л.М.		
<i>Затверд.</i>		Михайлов С.Р.		
<i>Модуль датчика конденсаційного вологоміра. Пояснювальна записка</i>				
		<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
		7	7	57
<i>«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-11</i>				

3.2 Розробка прошивки мікроконтролера для перевірки роботоздатності приладу	46
3.3 Виготовлення і випробування тестового зразка	55
Висновки до третього розділу.....	60
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	63
ДОДАТОК А. Функціональна схема модуля	66
ДОДАТОК Б. Принципова схема модуля.....	67
ДОДАТОК В. Перелік елементів.....	68
ДОДАТОК Г. Плата	70
ДОДАТОК Д. Лістинг програми	71
ДОДАТОК Е. Реферат	78

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		8

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МК – мікроконтролер;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ОП – операційний підсилювач;

ТТР – температура точки роси;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
						<i>9</i>
<i>Змн.</i>	<i>Анк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Попри численні спроби людства перейти до альтернативних джерел енергії природний газ по сьогоднішній день залишається одним із ключових енергетичних ресурсів для більшості сфер промислової та побутової діяльності людини. Однією з особливостей природного газу є те, що він потребує ретельного контролю параметрів якості на всіх етапах: під час видобутку, транспортування, обробки та безпосередньо під час використання.

Якість природного газу первинно оцінюється його вологістю, вторинно – вмістом вуглеводнів. Дана робота головним чином присвячена проблемі контролю вмісту вологи. Висока вологість газу не тільки знижує його енергетичну цінність, але і чинить негативний вплив на устаткування і трубопроводи, оскільки може призводити до утворення газових гідратів та сприяти корозійним процесам у системах. На фоні описаних вище причин і виникла потреба у ретельному контролі вологості природного газу.

Серед усіх сучасних методів вимірювання вологості стиснутих природних газів найбільш широкого застосування набули конденсаційні методи. Конденсаційні вологоміри в основній масі містять у своєму складі напівпровідниковий оптичний датчик, за допомогою якого система керування фіксує утворення конденсату в процесі вимірювання. До недоліків таких сучасних датчиків здебільшого можна віднести їх неуніверсальність, вбудоване виконання та вузькоспеціалізовану компонентну базу, що значно ускладнює ремонт та обслуговування відповідних приладів в цілому.

Завданням дипломного проекту є розробка модуля датчика для конденсаційного вологоміра. Він буде включати у себе напівпровідниковий оптичний датчик і датчик для вимірювання температури конденсаційної поверхні. До модуля висувуються наступні вимоги: легка інтеграція у системи, доступна та універсальна компонентна база, гарна ремонтпридатність.

Об'єктом дослідження є модуль датчика конденсаційного вологоміра для природного газу (напівпровідниковий оптичний детектор точки роси).

									Анк
									10
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

Предметом дослідження є визначення температури конденсаційної поверхні вологоміра в процесі вимірювання, а також виявлення плівки конденсату.

Процес розробки модуля зводиться до дослідження принципу роботи напівпровідникового оптичного датчика конденсаційного вологоміра, розробки структурної та функціональної схем модуля, підбору компонентної бази, розробки принципової схеми пристрою та проектування друкованої плати. Також в рамках роботи буде проведено розробку прошивки мікроконтролера для перевірки роботоздатності модуля, виготовлено тестовий зразок пристрою та буде проведено його випробування.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>11</i>

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА НАПРЯМКОМ РОБОТИ

1.1. Загальні відомості про вологоміри для природного газу

Вологомір (гігрометр) для природного газу (рис. 1.1) – це пристрій або система, які призначені для вимірювання кількості водяної пари в газовій суміші. Контроль вологості має вирішальне значення для оцінки якості газу, що дає змогу вчасно вжити заходи щодо запобігання утворенню газових гідратів, що закупорюють трубопроводи, та мінімізації корозійної дії на обладнання [1]. Надмірна вологість газу може стати причиною серйозних техногенних катастроф, такі як вибухи та розриви трубопроводів, а також може призвести до пошкодження дороговартісного устаткування.



Рис. 1.1. Приклад зовнішнього вигляду гігрометра для природного газу

1.1.1. Класифікація гігрометрів

Гігрометри класифікують за наступними ознаками і характеристиками:

1. Виконання (переносні та стаціонарні);
2. Принцип роботи;
3. Тип (проточний, занурювальний);
4. Діапазон робочих тисків;
5. Межа основної похибки;
6. Діапазон температур навколишнього середовища;

					ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		12

7. Кліматичне виконання;
8. Сертифікат вибухозахисту.

1.1.2. Системи відбору проб

Для підвищення точності вимірювань та подовження строку служби гігрометри функціонують як частина комплексів, які включають у себе системи відбору проб. До них належать різноманітні фільтри (рис. 1.2), що видаляють пил, механічні домішки, крапельні домішки гліколів, важкі вуглеводні та інші речовини, наявність яких у досліджуваній пробі газу може ввести значну похибку у покази приладу чи навіть пошкодити його [3].



Рис. 1.2. Зовнішній вигляд фільтра-адсорбера ФТ-4 для видалення парових домішок важких вуглеводнів та гліколів

1.1.3. Вимоги до промислових гігрометрів

Промислові гігрометри повинні відповідати низці технічних та експлуатаційних умов, що гарантують точність, надійність та безпеку під час експлуатації.

1. Висока точність вимірювання.

Гігрометри повинні забезпечувати високу точність вимірювання вологості, оскільки навіть невеликі коливання можуть негативно впливати на якість газу та стан обладнання. Наприклад, вологоміри, що використовують

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
						<i>13</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

технологію TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), забезпечують стандартну точність $\pm 1\%$ від показань у ppmv, а прилади з охолоджуваним дзеркалом мають точність до $0,1-0,5^\circ\text{C}$ температури точки роси [6].

2. Стійкість до суворих умов експлуатації.

Вологоміри для природного газу, повинні мати можливість працювати за наявності агресивних домішок, таких як гліколі, метанол, сірководень та інші компоненти, присутні в газовій суміші. Ці домішки можуть спричинити хімічну деградацію матеріалів датчиків та спровокувати нестабільність показів вимірювань. Щоб запобігти цьому, необхідно використовувати правильну систему підготовки та відбору проби, яка очищає досліджувану пробу газу від механічних та крапельних домішок. Такий підхід забезпечує точність, стабільність та надійність показань метрологічного обладнання незалежно від умов експлуатації в реаліях різних галузей промисловості [7].

3. Швидкий час відгуку.

Гігрометри повинні мати швидку реакцію на зміну вологості. Наприклад, гігрометри з технологією TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) мають час відгуку менше 2 секунд, що дозволяє швидко реагувати на коливання вмісту вологи у потоці досліджуваного газу [6].

4. Вибухобезпечна конструкція

Оскільки вимірювання зазвичай проводяться у вибухонебезпечних умовах, гігрометри повинні мати відповідні сертифікати, які підтверджують можливість безпечного використання відповідних приладів в таких умовах.

5. Можливість інтеграції у автоматизовані індустріальні системи

Сучасні гігрометри повинні мати можливість інтеграції з автоматичними системами керування процесами, що дозволяє проводити безперервний контроль вологості під час різноманітних складних технологічних процесів. Це дає змогу автоматизувати деякі технологічні процеси на виробництві та виключити вплив людського фактору.

					ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		14

Гігрометри для природного газу зазвичай встановлюють на газорозподільних станціях, у контрольних вузлах газопроводів, на станціях первинної осушки газу та родовищах [4].

1.2 Класифікація методів вимірювання вологості природного газу

Вимірювання вологості є одним з найважливіших аспектів контролю якості природного газу, особливо його енергетичної цінності. З удосконаленням технологій у сфері газорозподілу, газопереробної та нафтохімічної промисловості зростає потреба в обладнанні, здатному швидко реагувати на коливання вмісту вологи навіть у складних газових сумішах. Це питання стало особливо актуальним за умов необхідності проводити вимірювання безпосередньо в потоці, в реальних технологічних газах і дуже часто в технологічних умовах. У цих випадках вимога до швидкої реакції є першочерговою, оскільки перевищення допустимого вмісту вологості може призвести до аварії або викиду дефіцитної продукції.

Така складність також виникає через необхідність проводити вимірювання у вибухонебезпечних умовах та за різного тиску. Крім того, неможливість точного визначення коефіцієнта стислості природного газу призводить до подальшої складності вимірювання вологості. Це вимагає пошуку більш ефективних методів та механізмів контролю, здатних задовольнити конкретні вимоги галузі.

Сьогодні існує доволі велика кількість методів визначення вологості газу. Систематична класифікація цих методів включає близько двадцяти типів. Всі вони поділяються на прямі та непрямі. Прямі методи базуються на безпосередньому розділенні сухого газу та вологи з подальшим визначенням вмісту вологи. Вони охоплюють методи повної абсорбції, гравіметричні, хімічні та методи заморожування (рис. 1.3).

									Анк
									15
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

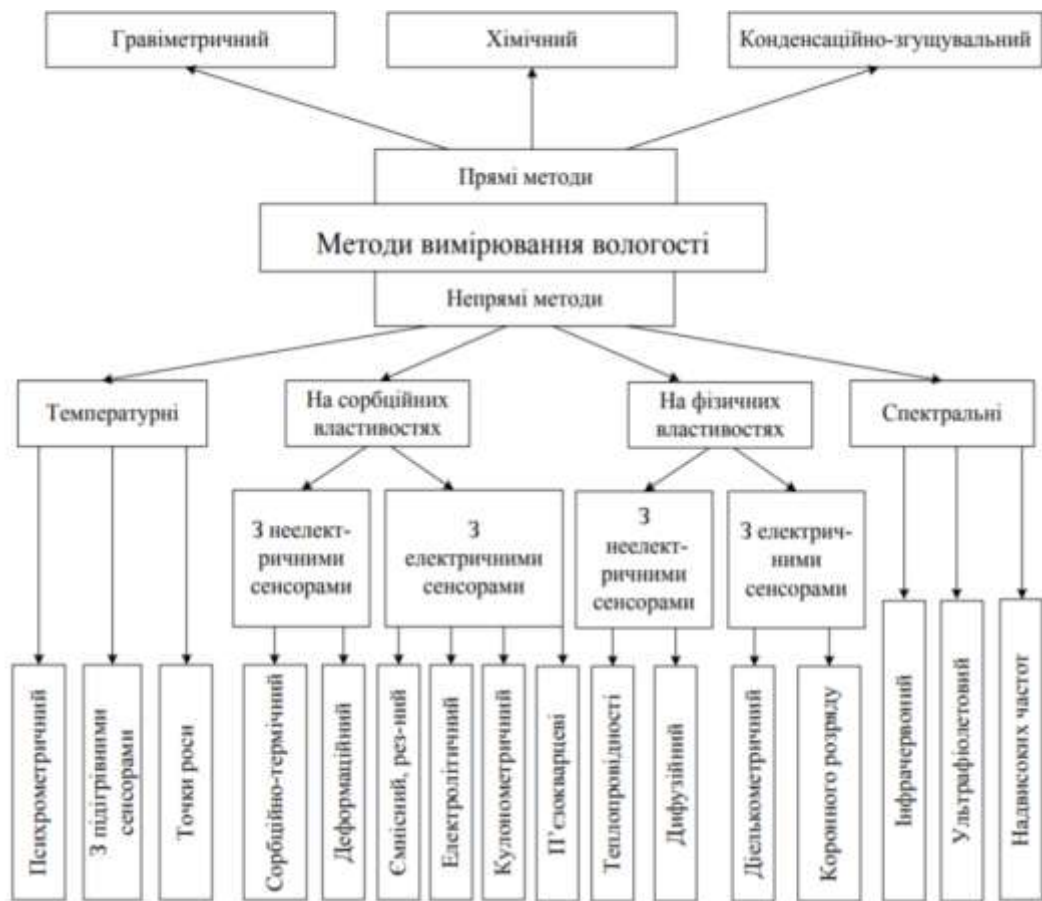


Рис. 1.3. Класифікація методів вимірювання вологості природного газу

Непрямі методи базуються на вимірюванні фізичних властивостей, функціонально пов'язаних з вмістом вологи в газі. Наприклад, психрометричний метод базується на явищі охолодження зволоженого тіла шляхом випаровування, яке відбувається інтенсивніше при нижчій відносній вологості.

Сорбційні методи базуються на властивостях гігроскопічних речовин поглинати воду з газоподібного середовища. Кількість поглиненої води прямо пропорційна вологості середовища та кількісно визначається шляхом вимірювання зміни маси або кольору сорбенту.

Ємнісні методи вимірювання вологості базуються на зміні діелектричної проникності матеріалів під впливом вологи. Недоліком є вплив щільності досліджуваного матеріалу на результати вимірювання.

Електролітичні гігрометри працюють на принципі зміни електричних властивостей деякого матеріалу внаслідок поглинання вологи. Вони можуть бути різної конструкції, наприклад, нагрівальні або сорбційні.

Інфрачервоні методи (ІЧ-спектроскопія) використовують здатність речовин поглинати або відбивати ближнє ІЧ-світло. Метод використовується, наприклад, у харчовій промисловості для контролю вологості борошна або сухого молока.

Абсорбційний метод базується на поглинанні водяної пари діетиленгліколем та подальшому титруванні поглиненої води за допомогою розчину К. Фішера. Через обмежений вміст води та сполук сірки в газі, метод використовується здебільшого для лабораторних робіт.

П'єзосорбційний метод, який набув поширення протягом останніх десятиліть, базується на зміні властивостей сенсорного елемента в результаті впливу вологості. Метод вимагає калібрування та може бути чутливим до домішок у газах.

Кулонометричні гігрометри використовують спеціальний чутливий елемент з електродами, між якими знаходиться сорбент. Коли газ проходить через нього, вода повністю поглинається, після чого її кількість визначається за допомогою електролізу. Метод дозволяє кількісно визначити дуже низьку вологість, але не підходить для газів з лужними або полімерними домішками.

Резонансні методи базуються на зміні резонансних характеристик коливального контуру після введення діелектрика. Ці методи надзвичайно точні та можуть бути використані як для газів, так і для рідин з малим об'ємом зразка. У цьому випадку необхідно враховувати вплив ємності.

Метод точки роси вимірює температуру, за якої водяна пара в газі починає конденсуватися. Оскільки ТТР прямо пропорційна вологості, можна визначити відносну вологість газу з відповідних таблиць [8].

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		17

1.3. Найбільш розповсюджені види датчиків для гігрометрів природного газу та їх принципи роботи

1.3.1. Керамічний датчик

Точне та стабільне вимірювання точки роси та вмісту вологи в рідинах і газах стає можливим завдяки керамічним датчикам. Вони розроблені для роботи в складних умовах нафтохімічної та газової промисловості. Висока хімічна стійкість цих датчиків дозволяє їм зберігати свою роботоздатність при контакті з агресивними домішками. Датчик стійкий до механічних навантажень, навіть таких як гідравлічний удар.

Активний пористий шар між двома електропровідними пластинами є основним компонентом датчика, він адсорбує молекули водяної пари до стану рівноваги концентрації з досліджуванним середовищем. Висока чутливість забезпечується навіть для дуже низьких концентрацій вологи завдяки надтонкому напівпровідниковому покриттю, яке знову ж таки екрановано металевим мікропористим шаром. Це дозволяє датчика майже миттєво реагувати як на зниження вологості під час запуску системи, так і на її раптове підвищення під час роботи.

Керамічні датчики Michell мають високу точність вимірювання (до $\pm 1^\circ\text{C}$ температури точки роси) та довготривалу стабільність, що дозволяє використовувати їх для безперервного контролю процесів. До недоліків даного типу датчиків можна віднести відносно високу вартість та необхідність у просушці і калібруванні після використання.

Вологоміри Michell Instruments, оснащені цією технологією: Promet EExd, Promet IS, Liquidew EExd, Liquidew IS – усі вони сертифіковані для застосування у вибухонебезпечних зонах і забезпечують надійне вимірювання вологості в багатьох сферах застосування [9].

Зовнішній вигляд керамічного датчика зображений на рис. 1.4:

									Анк
									18
Змн.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				



Рис. 1.4. Зовнішній вигляд керамічного датчика

Керамічні датчики застосовуються у приладах Promet EExd від виробника Michell Instruments (рис. 1.5):



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд комплексу вологоміра Michell Promet EExd, у якому використовується керамічний датчик

1.3.2. Кварцові мікроваги

Вимірювання вологості за допомогою кварцових мікроваг (Quartz Crystal Microbalance) здійснюється на основі дуже чутливого процесу фіксації зміни маси кварцового резонатора, яка виникає в процесі адсорбції молекул пари води на поверхні спеціального чутливого елемента, який являє собою кварцовий резонатор, покритий тонким шаром речовини, яка здатна вибірково поглинати молекули води із проби досліджуваного газу.

В разі контакту водяної пари з цим чутливим шаром відбувається її фізична адсорбція, що призводить до зростання ефективної маси кристалу.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		19

Частота коливань кварцового резонатора однозначно пов'язана зі зміною маси кварцового резонатора. Навіть незначне на перший погляд її підвищення спричиняє зміну резонансної частоти, яку фіксує система керування. Величина, на яку знижується частота строго пропорційна кількості адсорбованої вологи і відповідно – вологості газової суміші.

Завдяки високій стабільності кварцових резонаторів та точно контрольованій геометрії, зміна частоти може бути виміряна з дуже високою точністю – до одиниць герц, що відповідає змінам ефективної маси кристалу порядку одиниць нанограм. Задля уникнення впливу температурних та інших чинників, вимірювання здійснюється диференціально: сигнал з чутливого до вологи резонатора порівнюється з сигналом з еталонного (зразкового) кристала, який не має чутливого покриття [10].

Ключовою перевагою даної технології є повна оборотність адсорбційних процесів. Це забезпечує надійне функціонування датчика протягом тривалого часу без втрати точності показів та необхідності у повторному калібруванні [9]. Недоліком кварцових мікроваг є дуже жорсткі вимоги до відбору проби газу через непередбачувану поведінку кварцового кристалу при контакті з механічними чи високо хімічно активними паровими і крапельними домішками.

Зовнішній вигляд кварцових мікроваг схематично зображений на рис. 1.6:

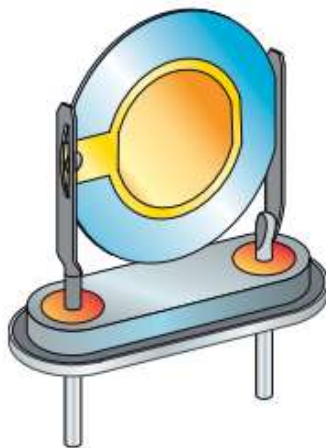


Рис. 1.6. Схематичне зображення зовнішнього вигляду кварцових мікроваг

									Арк
									20
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

Кварцові мікроваги встановлюють у вологоміри QMA601 виробника Michell Instruments (рис. 1.7):



Рис. 1.7. Зовнішній вигляд комплексу вологоміра Michell QMA601, у якому застосовується технологія кварцових мікроваг

1.3.3. Лазерний абсорбційний спектроскоп

Технологія лазерної абсорбційної спектроскопії з діодом, що налаштовується (TDLAS, Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) є передовим методом для безперервного вимірювання концентрації домішок у природному газі. Технологія розроблена компанією Endress+Hauser, забезпечує точне та надійне визначення вмісту водяної пари (H_2O), сірководню (H_2S) та вуглекислого газу (CO_2) у газових потоках, що є критично важливим для контролю якості та безпеки в процесах обробки природного газу.

Принцип роботи TDLAS базується на використанні діодного лазера, який випромінює світло в інфрачервоному діапазоні. Це світло проходить через пробу досліджуваного газу, молекули домішок поглинають випромінювання на певних довжинах хвиль. Вимірюючи ступінь поглинання, можна точно визначити концентрацію конкретних компонентів у газовій суміші. Цей метод дозволяє досягати високої чутливості та селективності, що особливо важливо при низьких концентраціях домішок.

До основних переваг технології TDLAS можна віднести:

1. Безконтактний процес вимірювання.

									Анк
									21
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

Лазер і детектор ізольовані від газового потоку, що запобігає забрудненню та корозії сенсорів, забезпечуючи довготривалу стабільність роботи приладу.

2. Швидкий відгук.

TDLAS забезпечує миттєве виявлення змін концентрації домішок, що дозволяє оперативно реагувати на порушення процесу, наприклад, при прориві вологи через молекулярне сито.

3. Висока селективність.

Технологія дозволяє точно розрізняти схожі за властивостями речовини, наприклад, відрізняти водяну пару від метанолу, що важливо для запобігання хибним спрацьовуванням.

4. Низькі експлуатаційні витрати.

TDLAS не потребує витратних матеріалів, таких як реагенти чи калібрувальні гази, що знижує загальні витрати на обслуговування та експлуатацію приладу.

Завдяки високій точності, надійності та низьким експлуатаційним витратам, TDLAS є ефективним рішенням для забезпечення якості та безпеки в обробці та використанні природного газу [4]. Недоліком даної технології є висока вартість комплексу вологоміра, через що вона поки не набула широкого застосування у промисловості.

Датчик вологоміра з технологією TDLAS схематично зображений на рис. (1.8):

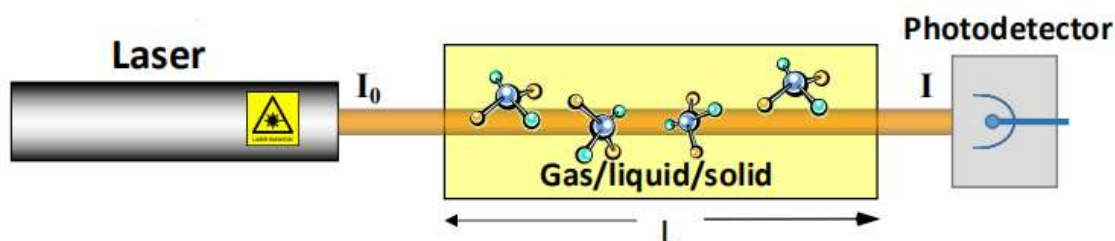


Рис. 1.8. Схематичне зображення датчика вологоміра з технологією TDLAS

					ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ	Анк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		22

Датчики з технологією TDLAS встановлюють у прилади OptiPEAK TDL600 виробника Michell Instruments (рис. 1.9):



Рис. 1.9. Зовнішній вигляд комплексу вологоміра Michell OptiPEAK TDL600, у якому застосовується технологія TDLAS

1.3.4. Напівпровідниковий оптичний детектор точки роси

У переважній більшості конденсаційних гігрометрів застосовується напівпровідниковий оптичний датчик для виявлення плівки вологи, яка утворюється на конденсаційній поверхні в процесі вимірювання.

Така система містить у собі джерело інфрачервоного випромінювання (світлодіод) та фоточутливий елементу (фотодіод, фототранзистор). Конденсаційна поверхня (дзеркало) закріплена на холодній стороні термоелектричного охолоджувача (елементу Пельтьє) [5]. В процесі вимірювання дзеркало охолоджується і на ньому конденсується волога із проби досліджуваного газу. На конденсаційній поверхні як правило також встановлюється датчик температури, завдяки якому система керування має змогу зчитувати поточну температуру дзеркала протягом всього циклу вимірювання.

Схематичне зображення детектору точки роси з напівпровідниковим оптичним датчиком та дзеркалом, що охолоджується зображена на рис. 1.10:

									Анк
									23
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

На рис. 1.13 зображено зовнішній вигляд конденсаційного гігрометра Торос 3-2В, який має у своєму складі напівпровідниковий оптичний датчик:



Рис. 1.13. Зовнішній вигляд конденсаційного гігрометра Торос 3-2В, який має у своєму складі напівпровідниковий оптичний датчик

Висновки до першого розділу

У розділі було висвітлено основні положення, які стосуються вологомірів для природного газу та особливостей їх експлуатації. Було розглянуто ознаки, за якими класифікуються гігрометри та основні вимоги, які висуваються до приладів даного класу. Було наведено відомості про найрозповсюджені види датчиків гігрометрів для природного газу, принципи їх роботи, основні переваги та недоліки, а для саме: керамічного датчика, кварцових мікроваг, лазерного абсорбційного спектроскопа та напівпровідникового оптичного детектору точки роси. Було розглянуто методи вимірювання вологості природного газу. Особливу увагу у розділі було приділено принципу роботи напівпровідникового оптичного датчика, оскільки цей вид датчика безпосередньо стосується об'єкта дослідження.

Основними перевагами конденсаційних гігрометрів з напівпровідниковими оптичними детекторами точки роси є дешеве, швидке та легке обслуговування, відсутність потреби у частому калібруванні, відносно висока швидкість вимірювання та точність до 0,5 °С температури точки роси. Основним недоліком є потреба у ретельному очищенні проби від важких вуглеводнів задля забезпечення правильності показів приладу, оскільки як

									ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата						26

правило вуглеводні конденсуються раніше води і перешкоджають подальшій її конденсації.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>27</i>

2. РОЗРОБКА МОДУЛЯ ДАТЧИКА

2.1. Постановка технічного завдання

Для коректної та стабільної роботи напівпровідникового оптичного датчика в парі з мікроконтролерною системою керування необхідна проміжна ланка, а саме система для попереднього підсилення сигналу фоточутливого елемента.

Метою дипломного проекту є розробка універсального модуля датчика для конденсаційного вологоміра, який забезпечить надійне та стабільне підсилення сигналу напівпровідникового оптичного датчика та його передачу до мікроконтролера для подальшої обробки. У модулі буде передбачено можливість підключення термістора для зчитування мікроконтролером температури конденсаційної поверхні вологоміра у процесі вимірювання. Модуль має легко інтегруватися у системи, бути виконаним на універсальній та доступній компонентній базі, бути легким у виготовленні і ремонті.

Для легкої інтеграції у системи було прийнято рішення використовувати інтерфейс SPI для передачі даних між модулем та мікроконтролером. Даний інтерфейс характеризується гарною завадостійкістю, простою програмною реалізацією обміну даними зі сторони мікроконтролера та більш ніж достатньою швидкістю та пропускною здатністю для даної задачі. На одній лінії SPI мікроконтролера можна розміщувати декілька пристроїв, отже однією з переваг розроблюваного пристрою буде те, що до системи керування можна буде під'єднати декілька датчиків одночасно, що, у свою чергу, дасть змогу проводити синхронні/асинхронні вимірювання температури точки роси відразу у декількох точках відбору проби газу. На практиці сигнал SPI можна передавати по кабелям на відстані порядку 10-15 метрів, отже пристрій можна буде застосовувати як у ситуаціях коли датчик знаходиться у безпосередній близькості до електронного блоку, так і коли датчик винесений на відстань до 15 метрів.

									Арк
									28
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

Універсальність та доступність компонентної бази буде досягнуто за рахунок використання більшості електронних компонентів, які мають широкий асортимент аналогів від багатьох світових виробників. Це дасть змогу не залежати від конкретного виробника, чи постачальника та мінімізувати вплив геополітичної ситуації на стабільність виробництва.

Висока ремонтпридатність пристрою та легкість у виробництві будуть забезпечені простими та ефективними схемотехнічними та конструкторськими рішеннями. На виготовлення, тестування, налагодження та можливий ремонт пристрою буде витрачатися мінімальний час, що дасть змогу значно пришвидшити темпи та збільшити об'єми виробництва у ситуаціях коли це необхідно.

2.2. Розробка структурної схеми

Для того щоб відповідати умовам, висунутим у технічному завданні, повноцінно, стабільно та справо функціонувати, пристрій повинен мати наступні складові частини:

1. Джерело інфрачервоного випромінювання (світлодіод);
2. Фоточутливий елемент (фотодіод);
3. Підсилювач сигналу фоточутливого елементу;
4. Датчик температури;
5. Аналогово-цифровий перетворювач;
6. Блок живлення;

Складемо структурну схему пристрою (рис. 2.1). Джерело інфрачервоного випромінювання генерує світло, довжина випромінювання якого лежить у спектрі поглинання вологи. Фоточутливий елемент фіксує інтенсивність променю, відбитого від конденсаційної поверхні. Підсилювач сигналу фоточутливого елементу підсилює сигнал останнього для подальшої обробки. Датчик температури необхідний для вимірювання поточної температури конденсаційної поверхні. Аналогово-цифровий перетворювач

									Анк
									29
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

зчитує аналогові сигнали з усіх датчиків і передає цифровий сигнал до системи керування. Блок живлення забезпечує стабільне живлення всіх компонентів модуля датчика. У якості системи керування і по сумісництву джерела живлення модуля виступає мікроконтролер.

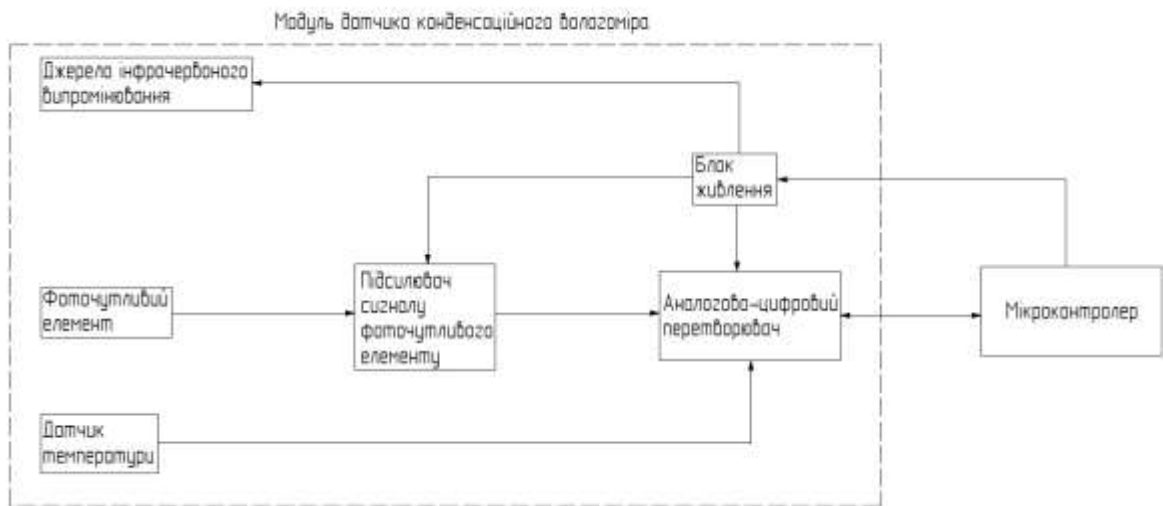


Рис. 2.1. Структурна схема модуля датчика конденсаційного вологоміра

2.3. Розробка функціональної схеми

На основі структурної схеми складемо функціональну схему, яка буде вичерпно демонструвати взаємозв'язки між усіма компонентами пристрою (рис. 2.2):

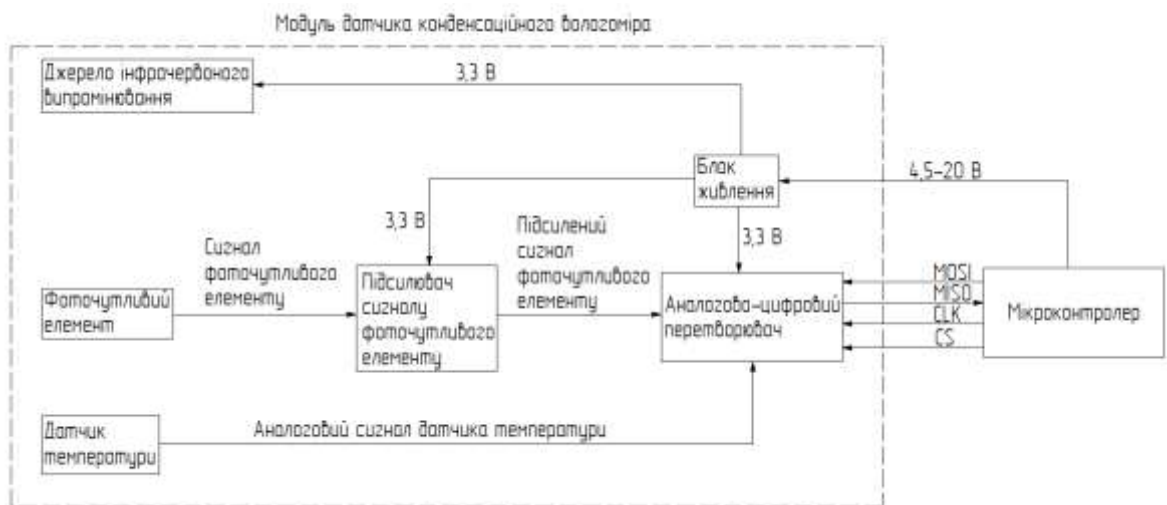


Рис. 2.2. Функціональна схема модуля датчика конденсаційного вологоміра

2.4. Підбір компонентної бази

У якості джерела інфрачервоного випромінювання застосуємо світлодіод АЛ336А (рис. 2.3). Попри те, що АЛ336А позиціонується як звичайний червоний світлодіод, на практиці було визначено, що доволі значна частина його випромінювання лежить у інфрачервоному діапазоні.



Рис. 2.3. Зовнішній вигляд світлодіоду АЛ336А

Для роботи у парі зі світлодіодом АЛ336А у якості фоточутливого елемента застосуємо інфрачервоний фотодіод ФД263-01 з областю спектральної чутливості 0,4–1,1 мкм (рис. 2.4) [12].



Рис. 2.4. Зовнішній вигляд фотодіоду ФД263-01

Підсилювач сигналу фотодіоду реалізуємо на основі операційного підсилювача МСР601-І/Р (рис. 2.5). Для зручності виготовлення перших прототипів друкованих плат застосуємо дану мікросхему в корпусі DIP-8.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>31</i>

Даний операційний підсилювач живиться напругою від 2,7 до 5,5 В, має високу швидкодію (максимальна швидкість зростання вихідної напруги складає 2,3 В/мкс), широкий діапазон допустимих температур навколишнього середовища (від -40 до +85°C) та низький рівень власних шумів (29 нВ/Гц на частоті 1 кГц) [13].



Рис. 2.5. Зовнішній вигляд мікросхеми MCP601-I/P у корпусі DIP-8

У якості датчика температури застосуємо платиновий термістор РТ1000 (опір 1000 Ом за температури 0 °С) у варіанті SMD-виконання 0805 з температурним коефіцієнтом 3850 ppm/K (рис. 2.6). За допомогою даного термістора можна стабільно і точно вимірювати температури від -50 до +150 °С з точністю до 1,05 °С [14].

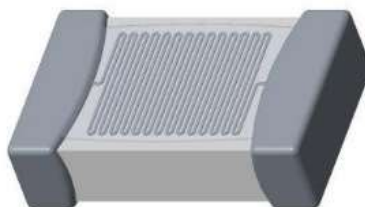


Рис. 2.6. Схематичне зображення зовнішнього вигляду термістора РТ1000 у корпусі SMD 0805

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		32

У якості аналогово-цифрового перетворювача застосуємо мікросхему AD7793BRUZ (рис. 2.7). Даний АЦП виконаний на архітектурі Сігма-Дельта і має 3 канали, 2 вбудованих джерела струму, що програмуються, розрядність 24 біта, низький рівень власних шумів та інтерфейс SPI для обміну даними з мікроконтролером [15].



Рис. 2.7. Зовнішній вигляд мікросхеми AD7793BRUZ у корпусі TSOP-16

Щоб забезпечити стабільне живлення всіх компонентів модуля використаємо лінійний стабілізатор LM1117IMPX-3.3 (рис. 2.8) з фіксованою вихідною напругою 3,3 В та широким діапазоном вхідних напруг від 4,5 до 20 В, виконаний у корпусі SOT223 [16].



Рис. 2.8. Зовнішній вигляд мікросхеми LM1117IMPX-3.3 у корпусі SOT223

Для того щоб мати змогу точно визначити струм, що протікає через термістор додамо у схему референсний резистор (рис. 2.9). Для цього буде

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		33

використано металоплівковий SMD-резистор у типорозмірі 1206 з похибкою номіналу 0,1% та низьким температурним коефіцієнтом 25 ppm/°C [17].



Рис. 2.9. Схематичне зображення зовнішнього вигляду SMD-резистора у типорозмірі 1206

Для гасіння шумів у схемі будемо використовувати RC-ланцюги на входах АЦП та ємності паралельно входам живлення більшості компонентів. Задля зручності подальшої розробки друкованої плати і її виготовлення будемо використовувати вивідні керамічні конденсатори та вивідні резистори.

Для регулювання яскравості світлодіоду використаємо змінний резистор, виконаний у корпусі 3296W (рис. 2.10).



Рис. 2.10. Зовнішній вигляд змінного резистора у корпусі 3296W

Для підключення пристрою до мікроконтролера, а також для винесення світлодіоду, фотодіоду і термістора з плати використаємо штирьові роз'єми WH-06, WH-04, WH-02 на 6, 4 і 2 контакти відповідно (рис. 2.11).

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		34

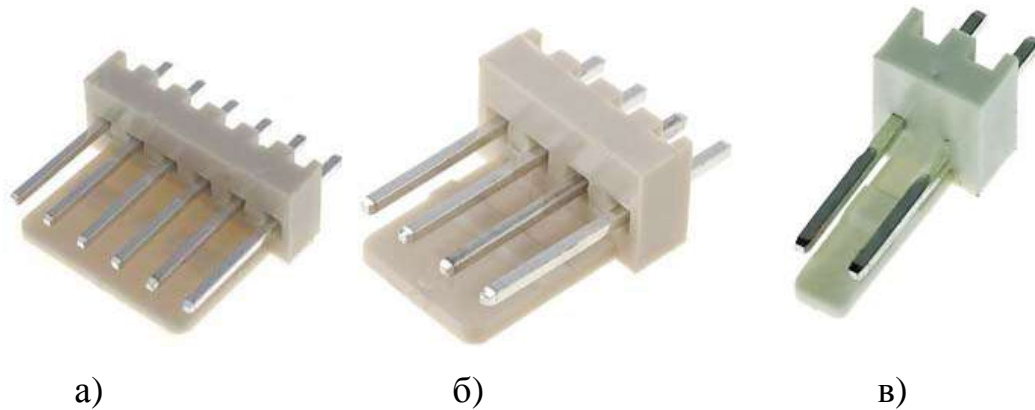


Рис. 2.11. Зовнішній вигляд роз'ємів: а) WH-06, б) WH-04, в) WH-02

Для світлодіоду, фотодіоду і термістора також необхідні HU-02 та HU-04 (рис. 2.12).

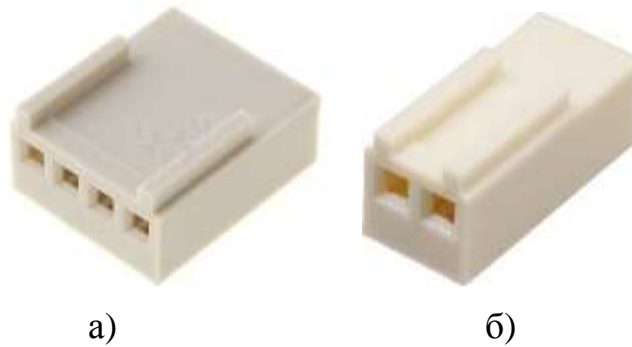


Рис. 2.12. Зовнішній вигляд роз'ємів: а) HU-04, б) HU-02

Для винесення фотодіоду і світлодіоду буде застосовуватися екранований двожильний аудіокабель з перерізом жил $0,22 \text{ мм}^2$. Термістор буде виноситися на дротах МГТФ перерізом $0,14 \text{ мм}^2$.

Для перевірки роботоздатності пристрою будемо використовувати модуль мікроконтролера STM32F446RET6 (рис. 2.13):



Рис. 2.13. Зовнішній вигляд модуля STM32F446RET6

2.5. Розробка та розрахунок принципової схеми

Розмістимо всі підібрані компоненти на схемі (рис. 2.14):

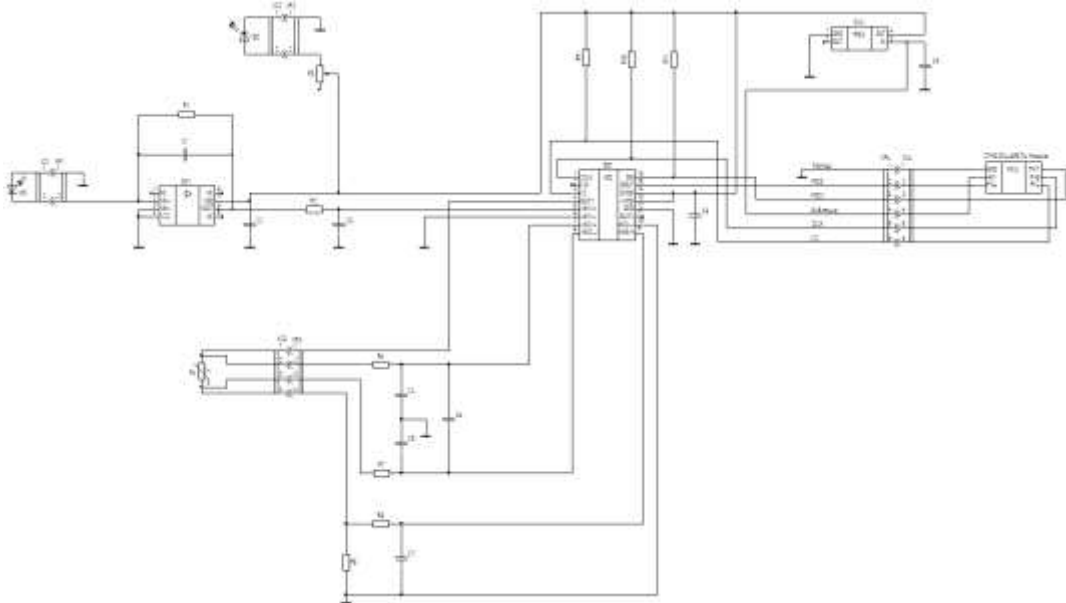


Рис. 2.14. Схема електрична принципова модуля датчика конденсаційного вологоміра

Окремої уваги заслуговує вузол датчика температури. Термістор підключений за 4-провідною схемою. Це необхідно для мінімізації впливу активного опора дротів, за допомогою яких термістор винесений з плати, на результати вимірювання напруги на ньому [19]. Для гасіння шумів у схемі передбачені RC-ланцюги на входах АЦП та підтяжки ліній логіки до лінії живлення резисторами.

									Анк
									36
Змн.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

Розрахуємо номінали пасивних компонентів схеми.

Номінал резистора R_1 визначає напругу на виході трансїмпедансного підсилювача, який виконаний на мікросхемі DA_1 . Емпіричним шляхом було встановлено, що фотодіод ФД263-01 генерує струм до 10 мкА при роботі в парі зі світлодіодом АЛ336А, який працює на повній яскравості. Внутрішня опорна напруга АЦП AD7793BRUZ складає 1,17 В, тобто напруга на виході мікросхеми DA_1 має бути трохи меншою. Обмежимо її величиною у 1 В. Для цього розрахуємо номінал резистора R_1 таким чином, щоб за максимального струму фотодіоду на виході підсилювача була напруга 1 В:

$$U_{out_{max}} = R_1 \cdot I_{VD1_{max}} \quad (2.1)$$

Відповідно до (2.1):

$$R_1 = \frac{U_{out_{max}}}{I_{VD1_{max}}} = \frac{1,0}{10,0 \cdot 10^{-6}} = 1,0 \cdot 10^5 (\text{Ом}) = 100(\text{КОм}).$$

100 КОм є стандартним значенням.

Розрахуємо номінал конденсатора C_1 . Він необхідний для гасіння шумів, обмеження смуги пропускання і стійкості підсилювача [18]. Для початку розрахуємо частоту зрізу трансїмпедансного підсилювача:

$$f_{-3дБОм} = \sqrt{\frac{F_{GBW}}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_{in}}}, \quad (2.2)$$

де F_{GBW} – ширина смуги пропускання по одиничному підсиленню операційного підсилювача (2,8 МГц для МСР601-І/Р [13]);

R_1 – розрахований раніше номінал резистора зворотного зв'язку, Ом;

C_{in} – паразитні ємності на вході операційного підсилювача та власна ємність фотодіоду (зазвичай приймається рівною 10 пФ у подібних розрахунках [18]).

Відповідно до (2.2):

$$f_{-3дБОм} = \sqrt{\frac{F_{GBW}}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_{in}}} = \sqrt{\frac{2,8 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-12}}} \approx 667,558 \cdot 10^3 (\text{Гц}) = 667,558(\text{КГц}).$$

Нарешті розрахуємо номінал конденсатора C_1 :

									Анк
									37
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,707 \cdot R_1 \cdot f_{-3\text{дБОм}}} \quad (2.3)$$

Відповідно до (2.3):

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,707 \cdot R_1 \cdot f_{-3\text{дБОм}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,707 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 667,558 \cdot 10^3} \approx \\ \approx 3,372 \cdot 10^{-12} (\text{Ф}) = 3,372 (\text{пФ}).$$

Округлимо отримане значення до найближчого стандартного – прийmemo C_1 рівним 3,3 пФ.

Коефіцієнт підсилення трансімпедансного підсилювача вимірюють у децибелах Ом (дБОм), обчислимо його:

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{\text{out}_{\text{max}}}}{I_{\text{VD1}_{\text{max}}}} \right) \quad (2.4)$$

Відповідно до (2.4):

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{\text{out}_{\text{max}}}}{I_{\text{VD1}_{\text{max}}}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1,0}{10,0 \cdot 10^{-6}} \right) = 100 (\text{дБОм}).$$

Визначимо номінали елементів RC-ланцюгів. У специфікації до мікросхеми AD7793BRUZ вказані варіанти номіналів елементів для гасіння шумів на входах АЦП [15]. Для всіх RC-ланцюгів прийmemo $R = 1,5 \text{ КОм}$, $C = 500 \text{ пФ}$. Округлимо значення ємності до найближчого стандартного – 510 пФ. Отже: $R_2 = R_6 = R_7 = R_8 = 1,5 \text{ КОм}$, $C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = C_7 = 510 \text{ пФ}$.

Розрахуємо номінал змінного резистора R_3 . Він застосовується для обмеження струму у контурі світлодіоду VD_2 і регулювання яскравості останнього. Світлодіод АЛ336А живиться напругою 2 В і при цьому споживає струм 20 мА [11].

$$R_3 = \frac{U_{\text{жив}} - U_{\text{VD2}}}{I_{\text{VD2}}}, \quad (2.5)$$

де $U_{\text{жив}} = 3,3 \text{ В}$ – напруга на виході стабілізатора;

$U_{\text{VD2}} = 2 \text{ В}$ – максимальне пряме падіння напруги на світлодіоді;

$I_{\text{VD2}} = 20 \text{ мА}$ – максимальний прямий струм світлодіоду.

									Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				38

2.6 Розробка друкованої плати

Друковану плату будемо розробляти засобами програмного середовища EasyEDA. Для початку перенесемо принципову схему (рис. 2.14) у проєкт в програмі (рис. 2.15) та використаємо елементи, які було підібрано у пунктах 2.4 та 2.5.

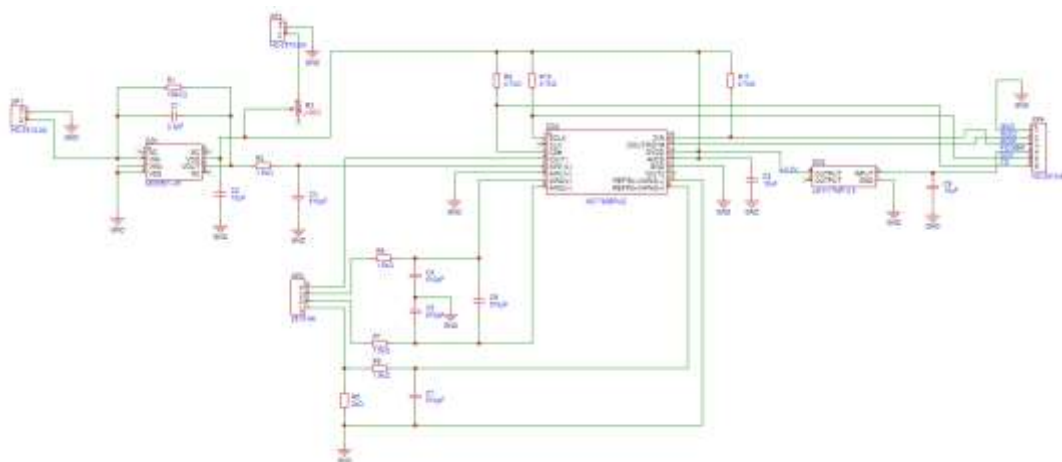


Рис. 2.15. Схема електрична принципова у програмі EasyEDA

Для зручності виготовлення і розпайки першого прототипу розробимо друковану плату шириною 90 мм та висотою 50 мм. Провідники на платі будемо робити шириною 0,762 мм (30 mil). У вузьких місцях приймемо ширину провідників рівною 0,381 мм (15 mil). Мінімальну відстань між провідниками приймемо рівну також 0,381 мм (15 mil). Плата буде одношаровою, вивідні компоненти розмістимо лицьовій стороні де немає провідників, а всі SMD-елементи розмістимо на тильній стороні. Щоб з'єднати всі необхідні виводи компонентів до загального вузла (вузол GND на схемі на рис. 4.15) було прийнято рішення використати інструмент «Copper region», тобто все вільне місце на платі використати для спільного вузла. Такий підхід дасть змогу під час виробництва видаляти з плати доволі малу частину міді, завдяки чому на виготовлення буде витрачатися значно менший час. Для закріплення приладу у корпусі передбачимо 4 отвори діаметром 3 мм, які розмістимо по кутах плати.

Розмістимо всі елементи на платі і виконаємо трасування провідників (рис. 2.16, рис. 2.17):

									Анк
									40
Змн.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				

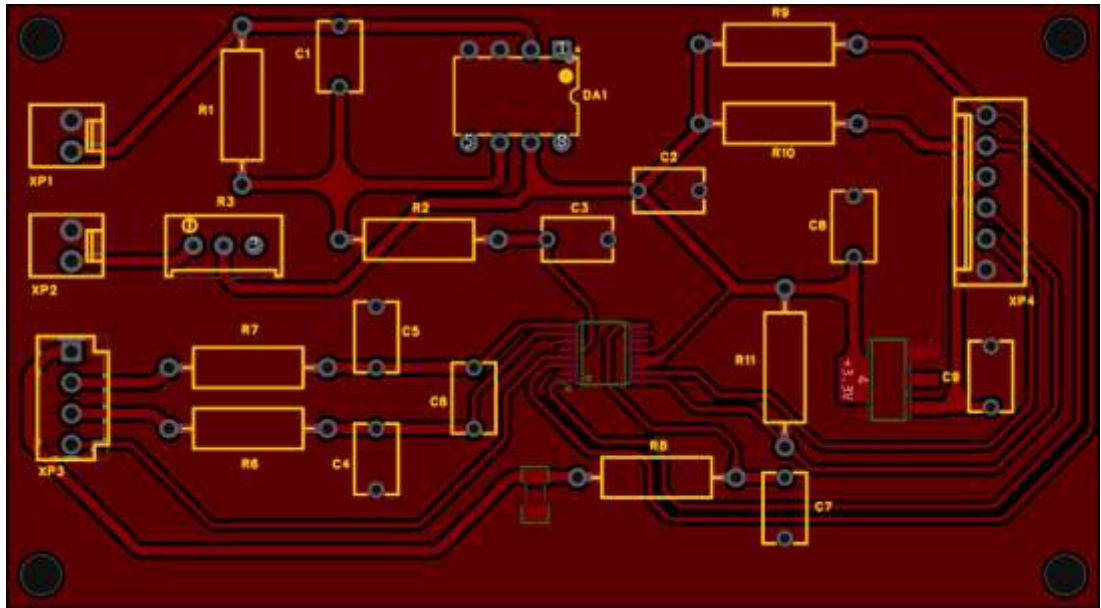


Рис. 2.16. Розміщення вивідних елементів на лицьовій стороні друкованої плати

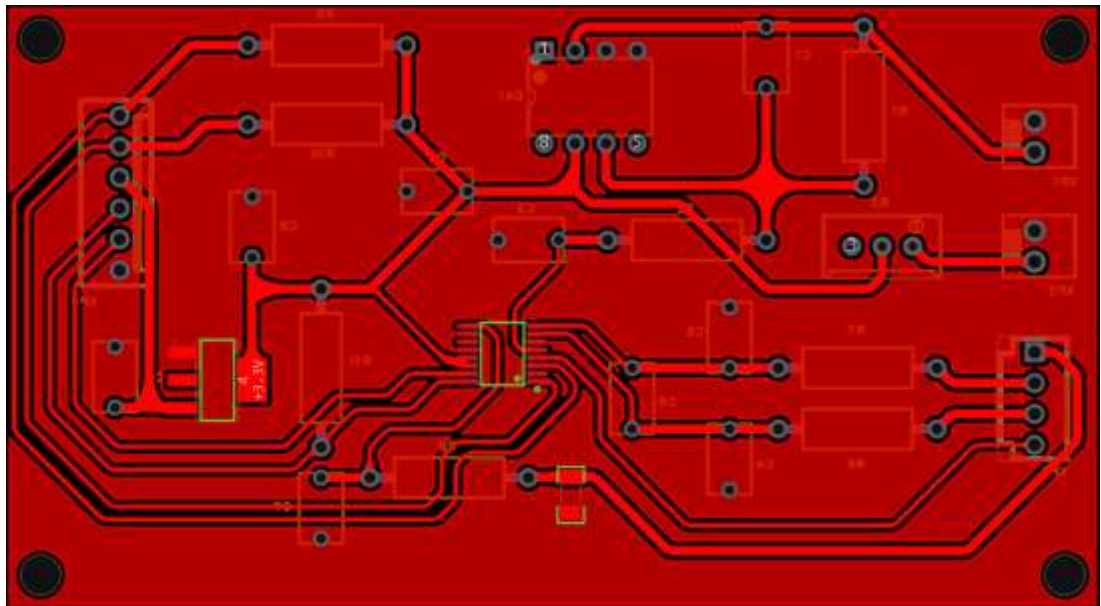


Рис. 2.17. Розміщення SMD-елементів на тильній стороні друкованої плати, трасування провідників

На рисунках 2.18 та 2.19 зображена об'ємна модель готової друкованої плати, вид з лицьової і тильної сторони відповідно:

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		41

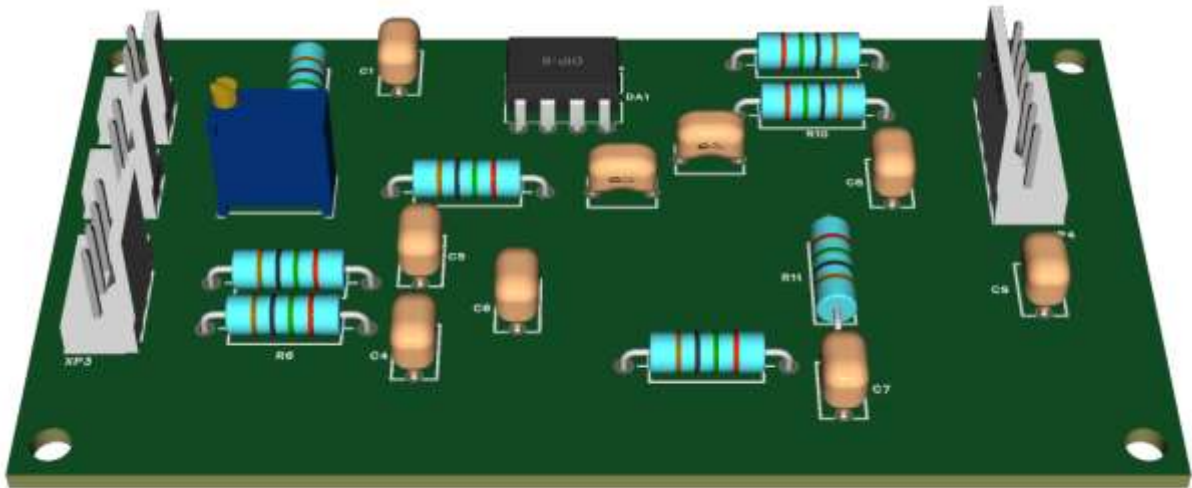


Рис. 2.18. Об'ємна модель готової друкованої плати, лицьова сторона

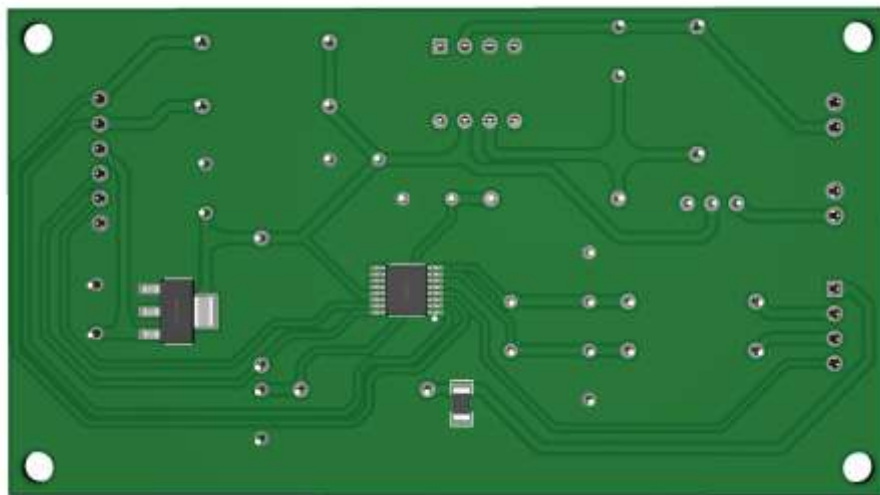


Рис. 2.19. Об'ємна модель готової друкованої плати, тильна сторона

Висновки до другого розділу

Другий розділ було присвячено розробці модуля датчика для конденсаційного вологоміра, який містить у собі підсилювач сигналу фотодіоду і датчик температури. Було поставлено технічне завдання, висунуто основні вимоги до розробки і обґрунтовано вибір схемотехнічних та конструкторських рішень. Було розроблену структурну і функціональну схему пристрою та підібрано компонентну базу, на основі якої було розроблено принципову схему.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		42

Було розраховано номінали компонентів принципової схеми і наостанок спроектовано друковану плату модуля у програмному середовищі EasyEDA.

Розроблений пристрій задовольняє умови, які висувалися до нього у технічному завданні. Легка інтеграція у системи забезпечена широким діапазоном напруг живлення від 4,5 до 20 В та використанням інтерфейсу SPI для обміну даними з системою керування. Універсальність та доступність компонентної бази досягнуто за рахунок використання електронних компонентів, які мають широкий асортимент аналогів від багатьох провідних виробників. Легкість у виробництві та ремонтпридатність забезпечені простими і ефективними схемотехнічними та конструкторськими рішеннями.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		43

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Моделювання блоку підсилювача сигналу фотодіоду

Проведемо моделювання блоку підсилювача фотодіоду для того щоб впевнитися, що система стійка, працює стабільно, справно і відповідає розрахованим раніше характеристикам. Зберемо відповідний фрагмент схеми у програмному середовищі LTspice (рис. 3.1). Spice-модель для операційного підсилювача MCP601-I/P візьмемо з офіційного сайту компанії-виробника Microchip [20].

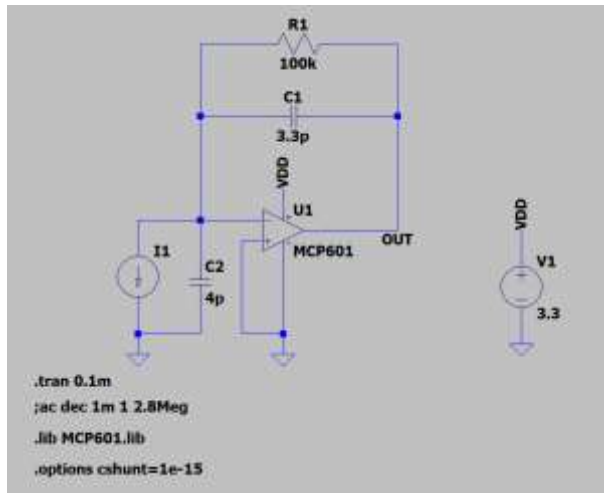


Рис. 3.1. Схема трансімпедансного підсилювача у програмі LTspice

Джерело I_1 з піковим значенням струму у 10 мкА буде імітувати струм, який генерується фотодіодом у реальній схемі. Ємність C_2 імітує власну ємність фотодіоду. Spice-модель MCP-601 має паразитну ємність 6 пФ. У розрахунках сума власної ємності фотодіоду і паразитної ємності ОП була прийнята рівною 10 пФ, отже встановимо ємність C_2 рівною 4 пФ.

Визначимо реакцію підсилювача на прямокутний сигнал. Для цього подамо на вхід прямокутні імпульси струму амплітудою 10 мкА, шириною 10 мкс та періодом 20 мкс. Залежність напруги на виході підсилювача від струму на його вході зображена на рис. 3.2:

									ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата						44

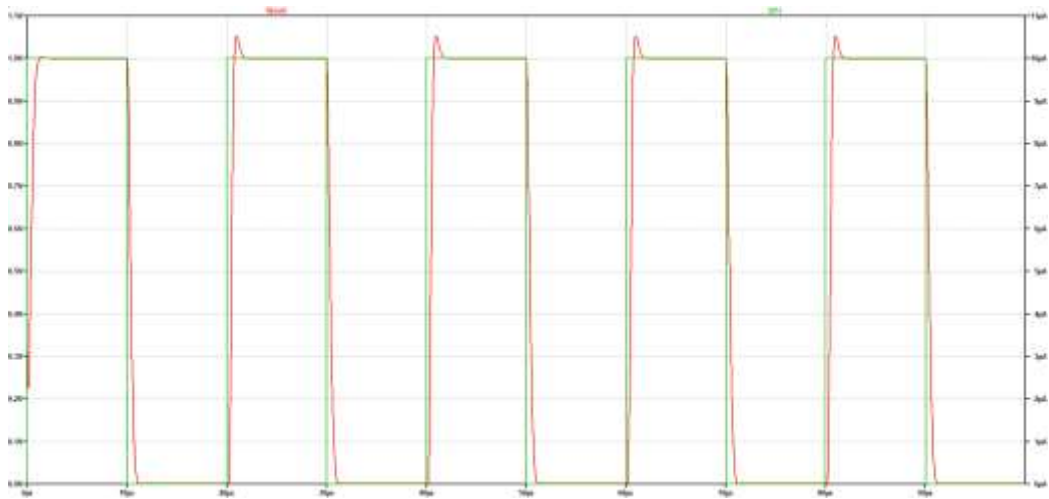


Рис. 3.2. Реакція підсилювача на прямокутні імпульси на вході (червона крива – напруга на виході підсилювача, зелена крива – струм на вході)

Амплітуда сигналу на виході підсилювача в усталеному режимі складає 999,717 мВ, що відрізняється від розрахованого значення (1 В) на 0,028%. Перехідний процес при наростанні сигналу триває приблизно 3 мкс, при цьому напруга досягає значення 1,054 В. Перехідний процес при спаданні триває приблизно 1,5 мкс, що є доволі хорошим результатом.

Дослідимо частотні характеристики підсилювача. Для цього знімемо АЧХ та ФЧХ досліджуваної схеми у смузі частот від 1 Гц до 2,8 МГц (рис. 3.3):

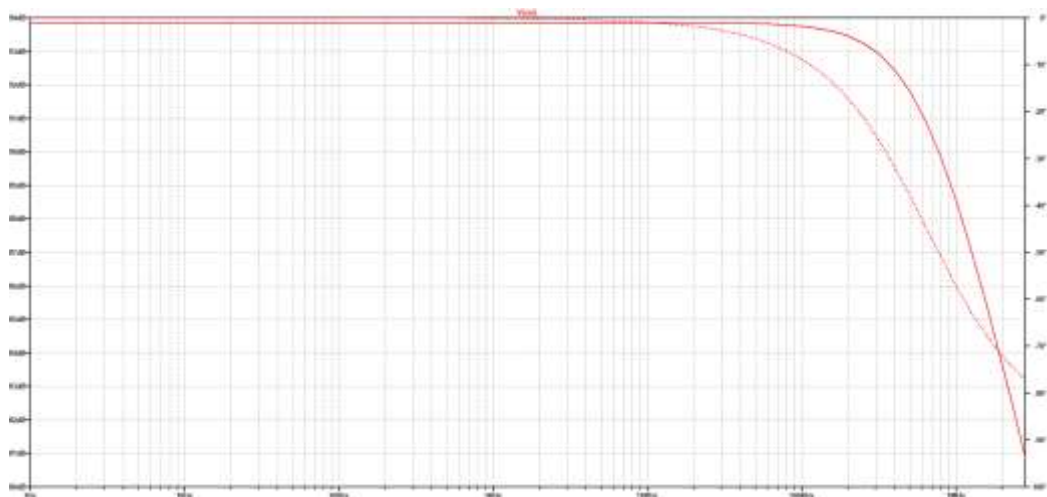


Рис. 3.3. АЧХ та ФЧХ підсилювача фотодіоду (суцільна крива – АЧХ, пунктирна – ФЧХ)

Згідно з рисунком 3.3 в області низьких частот підсилення складає 93,858 дБом, що відрізняється від розрахованого значення (100 дБом) на 6,142%.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		45

3.2. Розробка прошивки мікроконтролера для перевірки роботоздатності приладу

Для того щоб перевірити роботоздатність готового приладу достатньо впевнитися у тому, що АЦП правильно зчитує температуру термістора і напругу на виході підсилювача фотодіоду.

Система рівнянь Каллендара-Ван Дюзена описує залежність опору термістора від температури [22]:

$$R(T) = \begin{cases} R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100) \cdot T^3], & -200^\circ\text{C} \leq T < 0^\circ\text{C}, \\ R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T], & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 661^\circ\text{C}; \end{cases} \quad (3.1)$$

де R_0 – опір термістора за температури 0°C ;

A, B, C – константи, які визначаються матеріалом, з якого виготовлений термістор (для платини: $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}$, $B = -5,77510^{-7}$, $C = -4,18310^{-12}$ [23]);

T – поточна температура, $^\circ\text{C}$.

Температури вище за 0°C обчислюють через опір термістора за виразом [23]:

$$T(R) = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \cdot \left(1 - \frac{R}{R_0}\right)}}{2B}. \quad (3.2)$$

Температури нижче за 0°C обчислюють за допомогою апроксимованого полінома, який представлений у рівнянні [23]:

$$T(R) = -242,02 + 2,2228R + 2,5859 \cdot 10^{-3} \cdot R^2 - \\ -4,8260 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 - 2,8183 \cdot 10^{-8} \cdot R^4 - \\ -1,5243 \cdot 10^{-10} \cdot R^5. \quad (3.3)$$

В загальному випадку прошивка мікроконтролера поділяється на 2 частини: код, який виконується одноразово при ініціалізації мікроконтролера і периферії, та код, який виконується у нескінченному циклі. У даному випадку в нескінченному циклі будуть проводитися вимірювання на входах АЦП. У разі виникнення помилки у термінал послідовного порту буде виводитися

									Анк
Змн.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				47

відповідне повідомлення і виконання програми буде зупинятися. Розробимо алгоритм роботи прошивки мікроконтролера і представимо його у вигляді блок-схеми (рис. 3.6).

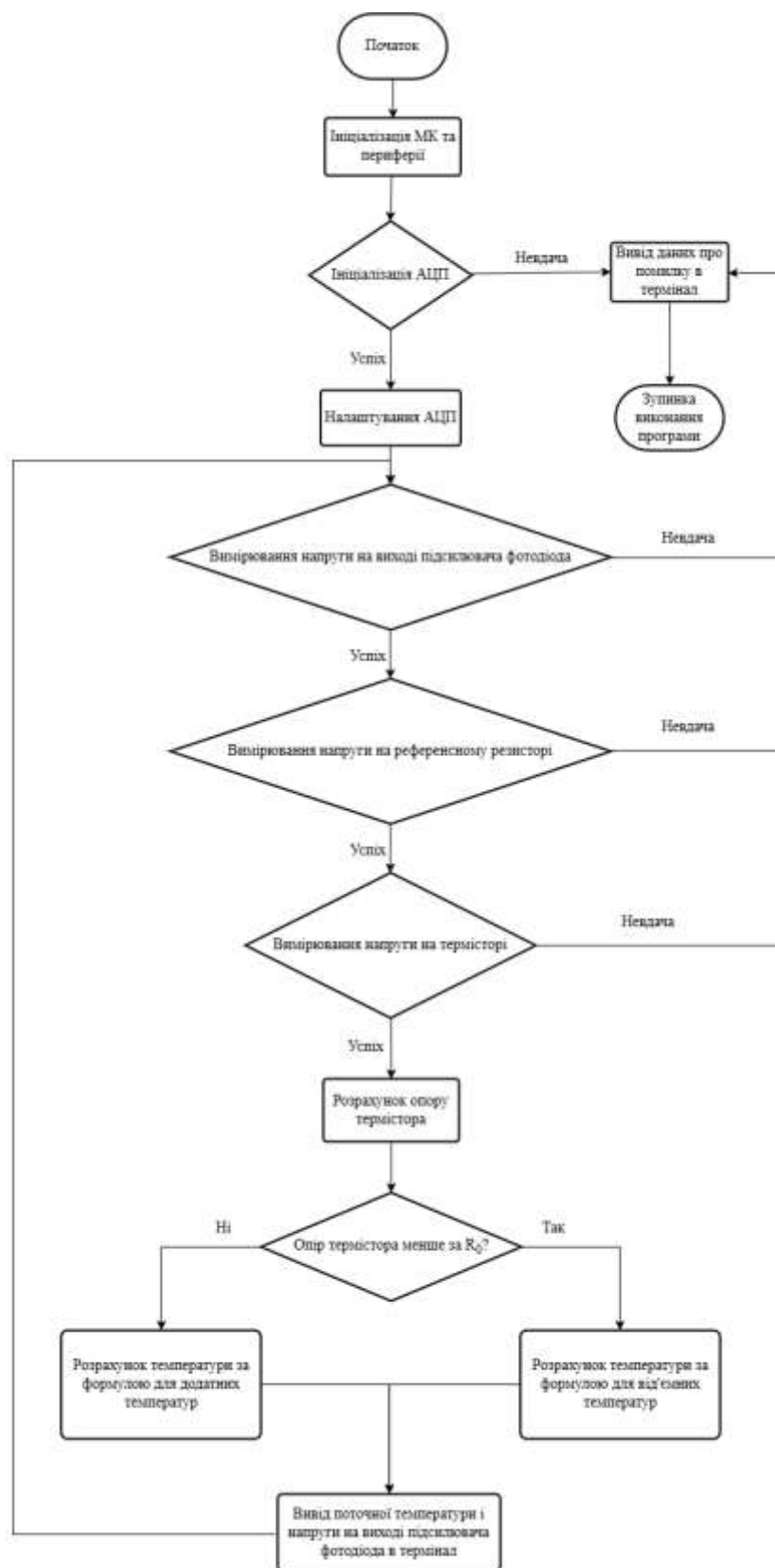


Рис. 3.6. Блок схема алгоритму роботи прошивки мікроконтролера

Змн.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата

Розробку прошивки для мікроконтролера STM32F446RET6 було проведено програмними засобами CubeMX та Cube IDE. Ці програмні засоби пропонують широкий набір інструментів для розробки та відлагодження програмного забезпечення для мікроконтролерів STM32.

Для підключення мікроконтролера до ПК будемо використовуватися програматор STLink v2.1 (рис. 3.7):



Рис. 3.7. Зовнішній вигляд програматора STLink v2.1

Створено проєкт під плату STM32F446RET6 у програмі CubeMX. У якості джерела тактування використано кварцовий резонатор на 8 МГц, який розміщений на платі МК (рис. 3.8):

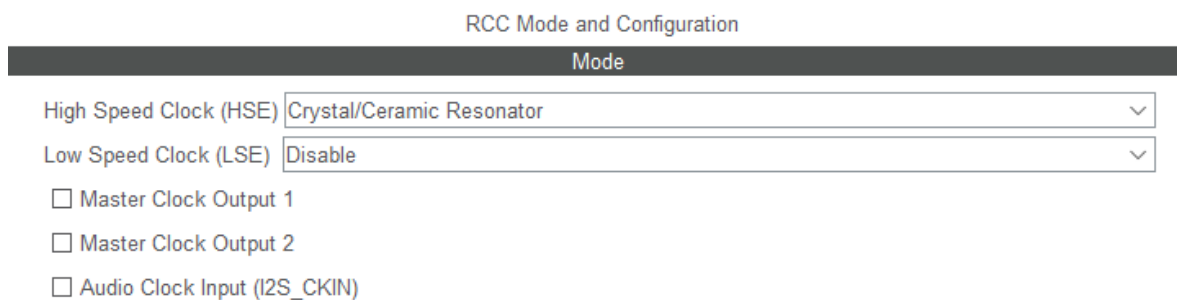


Рис. 3.8. Вибір джерела тактування мікроконтролера

Налаштовано конфігурацію ядра МК (рис. 3.9):

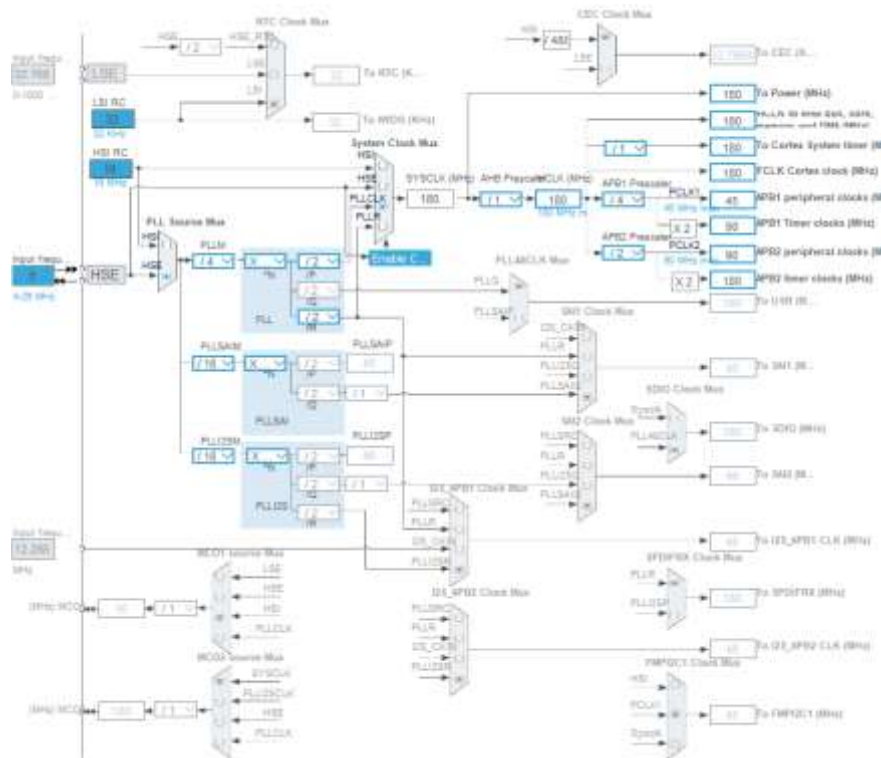


Рис. 3.9. Конфігурація ядра мікроконтролера

У вкладці «Connectivity» підключено протокол SPI для обміну даними із зовнішнім АЦП (рис. 3.10) та UART (рис. 3.11) для передачі даних у термінал на ПК через послідовний порт:

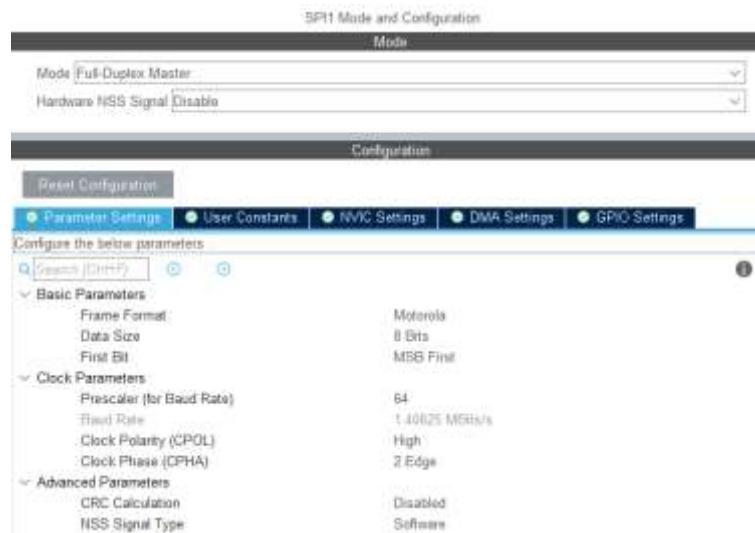


Рис. 3.10. Конфігурація протоколу SPI у мікроконтролера


```

96  /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
97  HAL_Init();
98
99  /* USER CODE BEGIN Init */
100
101  /* USER CODE END Init */
102
103  /* Configure the system clock */
104  SystemClock_Config();
105
106  /* USER CODE BEGIN SysInit */
107
108  /* USER CODE END SysInit */
109
110  /* Initialize all configured peripherals */
111  MX_GPIO_Init();
112  MX_SPI1_Init();
113  MX_USART1_UART_Init();
114  /* USER CODE BEGIN 2 */

```

Рис. 3.16. Ініціалізація МК та периферії

Логіка ініціалізації та налаштування АЦП наведена на рис. 3.17. Встановлено частоту дискретизації 16,7 Гц та автоматичне гасіння шумів по частотам 50 і 60 Гц. АЦП буде працювати без підсилення в однополярному режимі і тактуватися від власного внутрішнього джерела. Джерела струму запрограмовано на 210 мкА.

```

116
117  AD7793_Reset(&ad7793);
118
119  if (AD7793_Init(&ad7793) != HAL_OK) {
120
121      printf("AD7793_Init ERROR\r\n\r\n");
122      Error_Handler();
123  }
124
125  AD7793_SetRate(&ad7793, AD7793_RATE_16_7_50_60);
126  AD7793_SetGain(&ad7793, AD7793_GAIN_1);
127  AD7793_SetPolarity(&ad7793, AD7793_UNIPOLAR);
128  AD7793_SetClockSource(&ad7793, AD7793_CLK_INT);
129  AD7793_SetBiasVoltage(&ad7793, AD7793_VBIAS_GEN_DISABL);
130  AD7793_SetExcitDirection(&ad7793, AD7793_DIR_IEXC1_IOUT1_IEXC2_IOUT2);
131  AD7793_SetExcitCurrent(&ad7793, AD7793_EN_IXCEN_210uA);
132

```

Рис. 3.17. Ініціалізація та налаштування АЦП

Реалізовано функцію для обчислення температури термістора через його опір згідно з (3.1), (3.2), (3.3) на рис. 3.18:

					ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ доквм.	Підпис	Дата		53


```

140 //Вимірювання напруги на виході підсилювача фотодіода
141 AD7793_SetChannel(&ad7793, AD7793_CH_AIN1P_AIN1M);
142 AD7793_SetGain(&ad7793, AD7793_GAIN_1);
143 AD7793_SetReference(&ad7793, AD7793_REFSEL_INT);
144 if (AD7793_SingleConversion(&ad7793) != HAL_OK) {
145     printf("Vph conversion ERROR\r\n\r\n");
146     Error_Handler();
147 }
148 Vph = ad7793.voltConversion;
149
150
151 //Вимірювання напруги на термісторі
152 AD7793_SetChannel(&ad7793, AD7793_CH_AIN2P_AIN2M);
153 AD7793_SetGain(&ad7793, AD7793_GAIN_1);
154 AD7793_SetMode(&ad7793, AD7793_MODE_CAL_INT_ZERO);
155 AD7793_SetMode(&ad7793, AD7793_MODE_CAL_INT_FULL);
156 AD7793_SetReference(&ad7793, AD7793_REFSEL_INT);
157 if (AD7793_SingleConversion(&ad7793) != HAL_OK) {
158     printf("UrtD conversion ERROR\r\n\r\n");
159     Error_Handler();
160 }
161 UrtD = ad7793.voltConversion;
162
163 //Вимірювання напруги на референсному резисторі
164 AD7793_SetChannel(&ad7793, AD7793_CH_AIN3P_AIN3M);
165 AD7793_SetGain(&ad7793, AD7793_GAIN_1);
166 AD7793_SetReference(&ad7793, AD7793_REFSEL_INT);
167 if (AD7793_SingleConversion(&ad7793) != HAL_OK) {
168     printf("Uref conversion ERROR\r\n\r\n");
169     Error_Handler();
170 }
171 Uref = ad7793.voltConversion;

```

Рис. 3.20. Вимірювання напруги на каналах АЦП

Логіка виклику функцій для розрахунку опору термістора, обчислення температури і виводу у термінал поточної температури та напруги на виході підсилювача фотодіода наведена на рис. 3.21. Додатково виводиться час у мілісекундах від початку роботи мікроконтролера у якості часової мітки вимірювання за допомогою виклику функції HAL_GetTick().

```

173 //Розрахунок опору термістора
174 RrtD = UrtD * Rref / Uref;
175 //Розрахунок поточної температури, вивід результатів у термінал
176 printf("[%lu]\tT = %.1f °C\t Vph = %.3f mV\r\n",
177     HAL_GetTick(), get_Temperature(RrtD, R0), Vph);
178 /* USER CODE END WHILE */

```

Рис. 3.21. Розрахунок опору термістора, фіксація часової мітки, обчислення температури, вивід результатів у термінал

На даному етапі розробку прошивки мікроконтролера завершена. Результат компіляції програмного коду наведений на рис. 3.22:

						ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ	Анк
Змн.	Адк.	№ докum.	Підпис	Дата			55

```
Finished building: default.size.stdout
Finished building: f446_AD7793_pt1000.list
14:26:46 Build Finished. 0 errors, 0 warnings. (took 2s.123ms)
```

Рис. 3.22. Результат компіляції прошивки

Компіляція завершилася успішно, без помилок і попереджень. Таким чином прошивка готова до завантаження у мікроконтролер.

3.3. Виготовлення і випробування тестового зразка

Виготовлено тестовий зразок пристрою, який було спроектовано у розділі 2 (рис. 3.23, 3.24):



Рис. 3.23. Виготовлена друкована плата зі встановленими елементами, лицьова сторона



Рис. 3.24. Виготовлена друкована плата зі встановленими елементами, тильна сторона

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адж.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

Для випробувань виготовленого модуля в умовах, наближених до реальних умов експлуатації було використано вимірювальну камеру гігрометра Торос 3-2В. Світлодіод і фотодіод були зафіксовані на своїх посадкових місцях на кришці вимірювальної камери гігрометра за допомогою чорного світлонепроникного герметика (рис. 3.25):

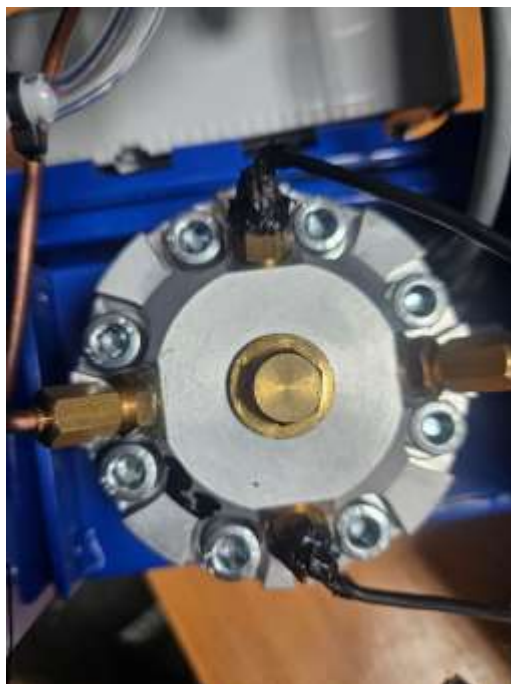


Рис. 3.25. Світлодіод та фотодіод, встановлені на кришку вимірювальної камери гігрометра

Термістор було встановлено на посадкове місце на конденсаційній поверхні всередині вимірювальної камери (рис. 3.26):



Рис. 3.26. Термістор, встановлений на конденсаційну поверхню всередині вимірювальної гігрометра

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адж.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

Також для випробувань було використано генератор вологого газу ГВГ-2М (рис. 3.27):



Рис. 3.27. Зовнішній вигляд генератор вологого газу ГВГ-2М

Він призначений для приготування парогазових сумішей із наперед заданою вологістю. Генератор застосовується як зразковий засіб для градування, випробування та перевірки вологомірів проточного та занурювального типів. Даний пристрій дозволяє генерувати парогазові суміші із наперед заданою ТТР від -41 до $+20^{\circ}\text{C}$. Принцип роботи полягає у насиченні газу вологою за підвищеного тиску та сталої температури з подальшим зниженням тиску на виході системи [25].

На плату STM32F446RET6 завантажено розроблену прошивку, мікроконтролер з'єднано з розроблений модулем датчика конденсаційного вологоміра, з'єднано світлодіод, фотодіод і термістор з останнім згідно із принциповою схемою (рис. 2.14). За температури у приміщені (24°C) конденсаційна поверхня вважається чистою. За допомогою змінного резистора на платі модуля датчика було встановлено таку яскравість світлодіоду, щоб при чистому дзеркалі напруга на виході підсилювача фотодіоду становила приблизно 1000 мВ (рис. 3.28):

						<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			58

```

COM3 X
[366] T = 23.4 °C Vph = 1000.142 mV
[735] T = 23.4 °C Vph = 1000.142 mV
[1103] T = 23.5 °C Vph = 1000.142 mV
[1472] T = 23.5 °C Vph = 1000.142 mV
[1841] T = 23.5 °C Vph = 1000.142 mV
[2210] T = 23.5 °C Vph = 1000.142 mV
[2578] T = 23.5 °C Vph = 1000.142 mV
[2947] T = 23.5 °C Vph = 1000.124 mV
[3316] T = 23.5 °C Vph = 1000.124 mV

```

Рис. 3.28. Вивід МК у термінал послідовного порту після налаштування яскравості світлодіоду

Вимірювальну камеру гігрометра було під'єднаємо до генератора вологого газу, і знято графіки залежності напруги на виході підсилювача фотодіоду від температури під час охолодження конденсаційної поверхні для трьох температур точки роси: 0, +10 та -20 °C, заданих за допомогою ГВГ-2М (рис. 3.29, 3.30, 3.31).

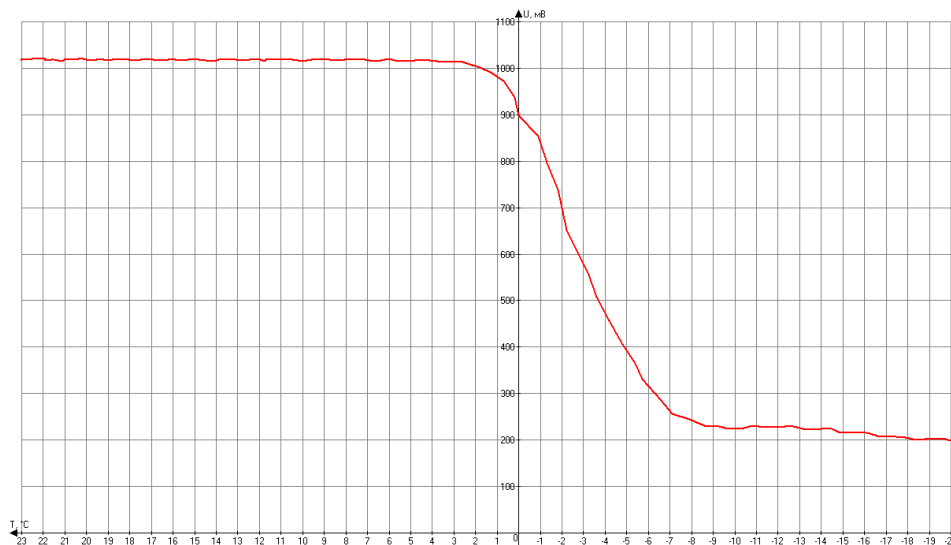


Рис. 3.29. Конденсаційна крива за ТТР 0 °C

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

У третьому розділі було проведено моделювання блоку трансїмпедансного підсилювача модуля, зокрема було досліджено реакцію на прямокутні імпульси та знято АЧХ та ФЧХ у смузі частот 1 Гц – 2,8 МГц. Результати моделювання збіглися з очікуваннями з певною точністю. Після аналізу результатів моделювання було встановлено, що підсилювач сигналу фотодіоду відповідає розрахованій характеристикам, оскільки відхилення результатів моделювання від розрахунків, які були проведені у пункті 2.5 не перевищило 7%, що є доволі гарним результатом. Було встановлено, що розроблений підсилювач є стійким і працює стабільно.

Наступним етапом було проведено розробку прошивки мікроконтролера STM32F446RET6 для перевірки роботоздатності розробленого модуля. Було виготовлено сам модуль датчика конденсаційного вологоміра та проведено його випробування в умовах, наближених до реальних умов експлуатації. Випробування полягало у зйомці конденсаційних кривих під час охолодження конденсаційної поверхні. Для цього було застосовано вимірювальну камеру гігрометра Торос 3-2В та генератор вологого газу ГВГ-2М. Вимірювання проводилися для трьох наперед заданих температур точки роси: 0, +10 та -20 °С. Характер кривих збігся з очікуваннями, що свідчить про те, що розроблений модуль датчика конденсаційного вологоміра повністю справний, вірно, стабільно і точно фіксує температуру конденсаційної поверхні, а також дає змогу своєчасно виявити плівку конденсату, яка утворюється на дзеркалі вологоміра в процесі вимірювання.

										Анк
										61
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ					

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У ході виконання дипломного проєкту було розроблено модуль датчика конденсаційного вологоміра. Після виготовлення і випробування тестового зразка в умовах, наближених до реальних умов експлуатації було встановлено, що розроблений пристрій в повному обсязі задовольняє вимоги, які було висунуто у технічному завданні.

Модуль легко інтегрується у системи завдяки протоколу SPI для обміну даними з мікроконтролером та широкому діапазону напруг живлення (4,5–20 В). Протокол SPI є широко розповсюдженим у сучасних мікроконтролерах ATmega, STM32, NXP LPC та багатьох інших. На одну шину SPI мікроконтролера можна під'єднати декілька пристроїв, отже використання декількох розроблених модулів дасть змогу проводити синхронні/асинхронні вимірювання температури точки роси по волозі відразу у декількох точках відбору проби газу.

Доступність та універсальність компонентної бази досягнуто за рахунок використання компонентів, які мають широкий асортимент аналогів серед багатьох світових виробників. Таким чином аналогово-цифровий перетворювач AD7793 за потреби можна замінити на молодшу модель AD7792, який має меншу розрядність перетворення (16 біт замість 24). Замість операційного підсилювача MCP601-I/P виробника Microchip можна використовувати будь-який інший операційний підсилювач від іншого виробника з аналогічними характеристиками, наприклад OPA344PA виробництва Texas Instruments. Термістор PT1000 можна без проблем замінити на PT100, врахувавши це у прошивці мікроконтролера.

Легкість у виготовленні та висока ремонтпридатність пристрою на даному етапі забезпечені застосуванням переважної кількості вивідних електронних компонентів та завдяки простим та ефективним схемотехнічним і конструкторським рішенням. Монтаж та демонтаж елементів з друкованої плати не потребує складних та довгих технологічних процесів. Виготовлення і

									Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ				62

ремонт пристрою займають мінімальний час. Тим не менше, у разі запуску масового виробництва розробленого модуля є сенс переходу повністю на компоненту базу SMD на користь компактності виробу і застосування автоматизованих систем монтажу електронних компонентів на друковану плату.

Розробка може бути використана у складі комплексів конденсаційних вологомірів для природних та технологічних газів з напівпровідниковим оптичним детектором точки роси.

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Анк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		63

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Moisture Measurement in Natural Gas: Ensuring Quality and Safety [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ametekpi.com/pressreleases/blog/2023/august/moisture-measurement-in-natural-gas/> (дата звернення: 04.06.2025);

2. Moisture Measurement Technologies for Natural Gas [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://studylib.net/doc/18625477/moisture-measurement-technologies-for-natural-gas/> (дата звернення: 04.06.2025);

3. Moisture analysis explained [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://everything.explained.today/Moisture_analysis/ (дата звернення: 04.06.2025);

4. TDLAS analyzers for natural gas processing [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://bdi-h-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EDFBE9283D14E711895/IN01233CEN_0325.pdf/ (дата звернення: 04.06.2025);

5. Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, Д. В. Новицький. Аналіз методів та засобів визначення температури точки роси за вологою та вуглеводнями. – Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2018, № 4, с. 110-118.

6. Moisture measurement technologies for natural gas [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://dam.bakerhughes.com/m/68df55d0a2cc7811/original/moisture_measurement_technologies_for_natural_gas_white_paper-pdf.pdf/ (дата звернення: 04.06.2025);

7. What is the Effect of Methanol and Glycol on Measurements of Moisture in Natural Gas? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.processsensing.com/en-us/blog/effects-of-methanol-and-glycol-measurements-in-natural-gas.htm/> (дата звернення: 04.06.2025);

8. Й. Й. Білинський, В. В. Красносельський. НВЧ методи та засоби вимірювання вологості природного газу. – Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2022, № 3, с. 87-98.

									ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата						64

9. Вимірювання точки роси по вологі та вуглеводням [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://tekknow.com.ua/uk-ua/blog/vimiryuvannya-tochki-rosi-z-volog-i-ta-vuglevodniiv/> (дата звернення: 04.06.2025);

10. Dew Point Calibration System Using a Quartz Crystal Sensor with a Differential Frequency Method [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/11/1944/> (дата звернення: 04.06.2025);

11. Специфікація до АЛ336А [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://asenergi.com/catalog/svetodiody-dip/al-3l.html/> (дата звернення: 04.06.2025);

12. Специфікація до ФД263-01 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://car-led.org/ua/p40274180-fd263-fotodiod-strukturi.html/> (дата звернення: 04.06.2025);

13. MCP601-I/P datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://imrad.com.ua/userdata/modules/productFiles/2OdC8zAT_MCP601-04.pdf/ (дата звернення: 04.06.2025);

14. PT1000 datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ist-ag.com/en/products/smd-pt1000-0805-2st-class-f03/> (дата звернення: 04.06.2025);

15. AD7793BRUZ datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/521608/AD/AD7793BRU.html/> (дата звернення: 04.06.2025);

16. LM1117IMPX-3.3 datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/170614/NSC/LM1117IMPX-3.3.html> (дата звернення: 04.06.2025);

17. Thin Film Precision Chip Resistor (AR Series) [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://imrad.com.ua/userdata/modules/productFiles/0BD94RiJ_VIKING-AR.pdf/ (дата звернення: 04.06.2025);

					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		65

18. What You Need to Know about Transimpedance Amplifiers – Part 1 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZTBC4/> (дата звернення: 04.06.2025);

19. What Are the Differences Between 2-Wire, 3-Wire, and 4-Wire RTDs? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/rtd-2-3-4-wire-connections/> (дата звернення: 04.06.2025);

20. SPICE Model for MCP601/2/3/4 Devices [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/BoardDesignFiles/MCP601_MM_E.zip (дата звернення: 04.06.2025);

21. Easily improve the performance of analog circuits with decompensated amplifiers [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/an/slyt767a/slyt767a.pdf?ts=1749016794176> (дата звернення: 04.06.2025);

22. Callendar-Van Dusen Equation and RTD Temperature Sensors [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h97/h74/9163083317278/TN-RTD-1-Callendar-Van-Dusen-Equation-and-RTD-Temperature-Sensors.pdf (дата звернення: 04.06.2025);

23. Designing a calibration-free RTD temperature measurement system [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.embedded.com/designing-a-calibration-free-rtd-temperature-measurement-system/> (дата звернення: 04.06.2025);

24. A library for stm32 controllers to use ad7793 ADC with rtd measurement [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://github.com/Pozh23/stm32_ad7793_lib (дата звернення: 04.06.2025);

25. Технічні характеристики генератора вологого газу ГВГ-2М [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://toros.kiev.ua/> (дата звернення: 04.06.2025);

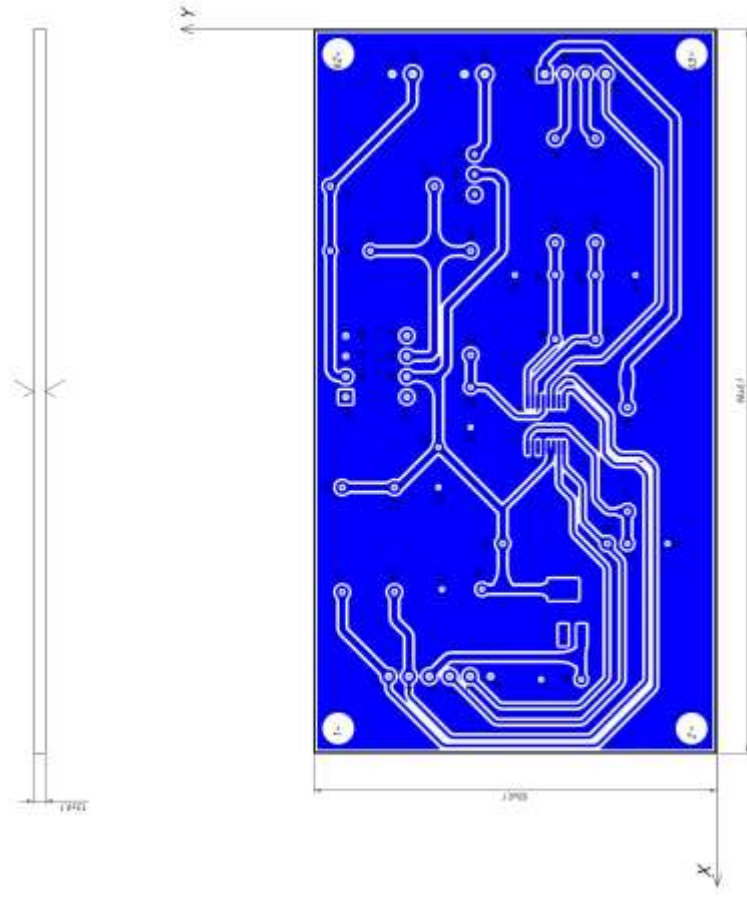
					<i>ДП.ДЕ11.04. 000 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адж.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>66</i>

<i>Зм.</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

Умовне позначення отвору	Діаметр отвору, мм	Найдієвша металізація отвору	Кількість отворів
□	0,7620	Так	3
○	1,0500	Так	4
▽	1,1000	Так	4
☆	3,2000	Ні	4
⊠	1	Так	6
⊕	0,9000	Так	8
⊗	0,9140	Так	16
◇	0,8000	Так	18

Координати отворів

№ отвору	X		Y		№ отвору	X	Y
	87	47	33	47			
1	87	47	33	47	40,6320	4,0	30,5000
2	87	3	34	3	38,0920	46,0630	44,0630
3	80,5180	40,7290	35	35	38,0920	38,4430	38,4430
4	80,5180	38,0890	36	36	38,5000	38,5000	20
5	80,5180	35,6490	37	37	38,5000	38,5000	35
6	80,5180	33,0990	38	38	30,5000	30,5000	25
7	80,5180	30,5690	39	39	30,5000	30,5000	20
8	80,5180	28,0290	40	40	30,5000	30,5000	15
9	80,8910	21,7660	41	41	30,5000	30,5000	30
10	80,8910	16,7660	42	42	27,5000	27,5000	48
11	70	46,5000	43	43	27,5000	27,5000	43
12	70	40	44	44	27,5000	27,5000	30,5000
13	69,6470	34,0720	45	45	26,5000	26,5000	20
16	69,6470	29,0720	46	46	26,5000	26,5000	15
15	64	26,5000	47	47	20,5000	20,5000	30
16	64	13,5000	48	48	19,5000	19,5000	48
17	64	11	49	49	19,5000	19,5000	35
18	64	6	50	50	18	18	30
19	60	11	51	51	15,5000	15,5000	30
20	57	46,5000	52	52	13,5000	13,5000	20
21	57	40	53	53	13,5000	13,5000	15
22	56,9750	34,5060	54	54	5,5000	5,5000	40,2700
23	51,9750	34,5060	55	55	5,5000	5,5000	37,7300
24	49,5000	30,5000	56	56	5,5000	5,5000	31,2700
25	47	11	57	57	5,5000	5,5000	28,7300
26	45,7120	46,0630	58	58	5,5000	5,5000	21,7100
27	45,7120	38,4430	59	59	18,7700	18,7700	18,7700
28	44,5000	30,5000	60	60	5,5000	5,5000	16,2300
29	43,1720	46,0630	61	61	5,5000	5,5000	13,6900
30	43,1720	38,4430	62	62	3	3	47
31	40,6320	46,0630	63	63	3	3	3
32	40,6320	38,4430					



1. Розміри в міліметрах
2. Діаметр профільної труби 20x2,007 мм, з фланцем товщиною 0,20x4,07 мм.
3. Розміщення встановлених діодів

ДІП ДЕТ 04.000			
№	Позначення	Кількість	Примітки
31	Модуль блоку керування блоком	31	
Складовості СФ-1			
Всього: 31			

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

Прошивка мікроконтролера для перевірки роботоздатності модуля датчика конденсаційного вологоміра

```
/* USER CODE BEGIN Header */
/**
 * *****
 * @file           : main.c
 * @brief          : Main program body
 * *****
 * @attention
 *
 * Copyright (c) 2025 STMicroelectronics.
 * All rights reserved.
 *
 * This software is licensed under terms that can be found in the LICENSE file
 * in the root directory of this software component.
 * If no LICENSE file comes with this software, it is provided AS-IS.
 *
 * *****
 */
/* USER CODE END Header */
/* Includes -----*/
#include "main.h"
#include "spi.h"
#include "usart.h"
#include "gpio.h"

/* Private includes -----*/
/* USER CODE BEGIN Includes */
#include "ad7793.h"
#include "stdio.h"
#include <math.h>
/* USER CODE END Includes */

/* Private typedef -----*/
/* USER CODE BEGIN PTD */

/* USER CODE END PTD */

/* Private define -----*/
/* USER CODE BEGIN PD */
```

```

/* USER CODE END PD */

/* Private macro -----*/
/* USER CODE BEGIN PM */

/* USER CODE END PM */

/* Private variables -----*/

/* USER CODE BEGIN PV */
float Rref = 2000.0;
float Rrtd = 0.0;
float R0 = 1000.0;

float Urtd = 0.0;
float Uref = 0.0;

//Константи для платинового термістора PT1000 для рівняння Календара-Ван Дюсена
float A = 3.9083e-3;
float B = -5.775e-7;
float C = -4.183e-12;

float T = 0.0;
float Vph = 0.0;
/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes -----*/
void SystemClock_Config(void);
double get_Temperature(double R_rtd, double R0);
/* USER CODE BEGIN PFP */

/* USER CODE END PFP */

/* Private user code -----*/
/* USER CODE BEGIN 0 */

/* USER CODE END 0 */

/**
 * @brief The application entry point.
 * @retval int
 */
int main(void)
{

/* USER CODE BEGIN 1 */
    //Створення екземпляру структури ad7793
    AD7793 ad7793;

```

```

    ad7793.adcspi = &hspi1;
    ad7793.CSPort = SPI1_CS_GPIO_Port;
    ad7793.CSPin = SPI1_CS_Pin;
    ad7793.vref = 1170;
/* USER CODE END 1 */

/* MCU Configuration-----*/

/* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick.
*/
HAL_Init();

/* USER CODE BEGIN Init */

/* USER CODE END Init */

/* Configure the system clock */
SystemClock_Config();

/* USER CODE BEGIN SysInit */

/* USER CODE END SysInit */

/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_SPI1_Init();
MX_USART1_UART_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */

AD7793_Reset(&ad7793);

if (AD7793_Init(&ad7793) != HAL_OK) {

    printf("AD7793_Init ERROR\r\n\r\n");
    Error_Handler();
}

AD7793_SetRate(&ad7793, AD7793_RATE_16_7_50_60);
AD7793_SetGain(&ad7793, AD7793_GAIN_1);
AD7793_SetPolarity(&ad7793, AD7793_UNIPOLAR);
AD7793_SetClockSource(&ad7793, AD7793_CLK_INT);
AD7793_SetBiasVoltage(&ad7793, AD7793_VBIAS_GEN_DISABL);
AD7793_SetExcitDirection(&ad7793, AD7793_DIR_IEXC1_IOUT1_IEXC2_IOUT2);
AD7793_SetExcitCurrent(&ad7793, AD7793_EN_IXCEN_210uA);
/* USER CODE END 2 */

/* Infinite loop */

```

```

/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    //Вимірювання напруги на виході підсилювача фотодіоду
    AD7793_SetChannel(&ad7793, AD7793_CH_AIN1P_AIN1M);
    AD7793_SetGain(&ad7793, AD7793_GAIN_1);
    AD7793_SetReference(&ad7793, AD7793_REFSEL_INT);
    if (AD7793_SingleConversion(&ad7793) != HAL_OK) {
        printf("Vph conversion ERROR\r\n\r\n");
        Error_Handler();
    }
    Vph = ad7793.voltConversion;

    //Вимірювання напруги на термісторі
    AD7793_SetChannel(&ad7793, AD7793_CH_AIN2P_AIN2M);
    AD7793_SetGain(&ad7793, AD7793_GAIN_1);
    AD7793_SetMode(&ad7793, AD7793_MODE_CAL_INT_ZERO);
    AD7793_SetMode(&ad7793, AD7793_MODE_CAL_INT_FULL);
    AD7793_SetReference(&ad7793, AD7793_REFSEL_INT);
    if (AD7793_SingleConversion(&ad7793) != HAL_OK) {
        printf("Urtcd conversion ERROR\r\n\r\n");
        Error_Handler();
    }
    Urtcd = ad7793.voltConversion;

    //Вимірювання напруги на референсному резисторі
    AD7793_SetChannel(&ad7793, AD7793_CH_AIN3P_AIN3M);
    AD7793_SetGain(&ad7793, AD7793_GAIN_1);
    AD7793_SetReference(&ad7793, AD7793_REFSEL_INT);
    if (AD7793_SingleConversion(&ad7793) != HAL_OK) {
        printf("Uref conversion ERROR\r\n\r\n");
        Error_Handler();
    }
    Uref = ad7793.voltConversion;

    //Розрахунок опоры термістора
    Rrtcd = Urtcd * Rref / Uref;

    //Розрахунок поточної температури, вивід результатів у термінал
    printf("[%lu]\tT = %.1f °C\t Vph = %.3f mV\r\n",
           HAL_GetTick(), get_Temperature(Rrtcd, R0), Vph);
/* USER CODE END WHILE */

/* USER CODE BEGIN 3 */
}
/* USER CODE END 3 */
}

```

```

/**
 * @brief System Clock Configuration
 * @retval None
 */
void SystemClock_Config(void)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};

    /** Configure the main internal regulator output voltage
    */
    __HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();
    __HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE1);

    /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
    * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
    */
    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = 4;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 180;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV2;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 2;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR = 2;
    if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    /** Activate the Over-Drive mode
    */
    if (HAL_PWREx_EnableOverDrive() != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    /** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
    */
    RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
        |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
    RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
    RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
    RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV4;
    RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;

```

```

if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_5) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
}

double get_Temperature(double R_rtd, double R0){
    if(R_rtd == R0){
        return 0.0;
    }
    if(R_rtd > R0){
        return (-A+sqrt(A*A-4*B*(1-R_rtd/R0)))/(2*B);
    }
    return -242.02
    + 2.2228 * R_rtd
    + 2.5859e-3 * pow(R_rtd, 2)
    - 4.8260e-6 * pow(R_rtd, 3)
    - 2.8183e-8 * pow(R_rtd, 4)
    + 1.5243e-10 * pow(R_rtd, 5);
}
/* USER CODE BEGIN 4 */

/* USER CODE END 4 */

/**
 * @brief Period elapsed callback in non blocking mode
 * @note This function is called when TIM1 interrupt took place, inside
 * HAL_TIM_IRQHandler(). It makes a direct call to HAL_IncTick() to increment
 * a global variable "uwTick" used as application time base.
 * @param htim : TIM handle
 * @retval None
 */
void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
{
    /* USER CODE BEGIN Callback 0 */

    /* USER CODE END Callback 0 */
    if (htim->Instance == TIM1)
    {
        HAL_IncTick();
    }
    /* USER CODE BEGIN Callback 1 */

    /* USER CODE END Callback 1 */
}

/**

```

```

    * @brief This function is executed in case of error occurrence.
    * @retval None
    */
void Error_Handler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
    /* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
    __disable_irq();
    printf("Error occured\r\n");
    while (1)
    {
    }
    /* USER CODE END Error_Handler_Debug */
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
/**
 * @brief Reports the name of the source file and the source line number
 *         where the assert_param error has occurred.
 * @param file: pointer to the source file name
 * @param line: assert_param error line source number
 * @retval None
 */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
    /* USER CODE BEGIN 6 */
    /* User can add his own implementation to report the file name and line
number,
ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
    /* USER CODE END 6 */
}
#endif /* USE_FULL_ASSERT */

```

S U M M A R Y

Condensation hygrometer sensor module

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization electronic appliances and devices. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE - 11. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025. - 57 p., Ill. 63.

Despite numerous attempts by mankind to switch to alternative energy sources, natural gas remains one of the key energy resources for most areas of industrial and domestic human activity to this day. One of the features of natural gas is that it requires careful control of quality parameters at all stages: during extraction, transportation, processing and directly during the use.

The quality of natural gas is primarily assessed by its moisture content, secondarily by the content of hydrocarbons. This work is mainly devoted to the problem of controlling moisture content. High humidity of gas not only reduces its energy value, but also has a negative impact on equipment and pipelines, as it can lead to the formation of gas hydrates and contribute to corrosion processes in systems. Against the background of the reasons described above, there was a need for careful control of natural gas humidity.

Among all modern methods for measuring the humidity of compressed natural gases, condensation methods have become the most widely used. Condensation moisture meters mainly contain a semiconductor optical sensor, with the help of which the control system records the formation of condensate during the measurement process. The disadvantages of such modern sensors include their non-universality, built-in design and highly specialized component base, which

significantly complicates the repair and maintenance of the corresponding devices as a whole.

The task of the diploma project is to develop a sensor module for a condensation moisture meter. It will include a semiconductor optical sensor and a sensor for measuring the temperature of the condensation surface. The following requirements are imposed on the module: easy integration into systems, affordable and universal component base, good maintainability.

The object of the study is the sensor module of a condensation moisture meter for natural gas (semiconductor optical dew point detector).

The subject of the study is determining the temperature of the condensation surface of the moisture meter during the measurement process, as well as detecting a condensate film.

The module development process is reduced to studying the principle of operation of a semiconductor optical sensor of a condensation moisture meter, developing the structural and functional diagrams of the module, selecting the component base, developing the schematic diagram of the device and designing the printed circuit board. Also, as part of the work, the microcontroller firmware will be developed to check the module's operability, a test sample of the device will be manufactured and its testing will be carried out.

The first section covered the main provisions relating to moisture meters for natural gas and the features of their operation. The features by which hygrometers are classified and the main requirements for devices of this class were considered. Information was provided on the most common types of hygrometer sensors for natural gas, their principles of operation, main advantages and disadvantages, namely: ceramic sensor, quartz microbalance, laser absorption spectroscope and semiconductor optical dew point detector. Methods for measuring natural gas humidity were considered. Particular attention in the section was paid to the principle of operation of a semiconductor optical sensor, since this type of sensor directly relates to the object of study.

The second section was devoted to the development of a sensor module for a condensation hygrometer, which includes a photodiode signal amplifier and a temperature sensor. The technical task was set, the main requirements for the development were put forward and the choice of circuit and design solutions was justified. The structural and functional diagram of the device was developed and the component base was selected, on the basis of which the schematic diagram was developed. The nominal values of the components of the schematic diagram were calculated and finally the printed circuit board of the module was designed in the EasyEDA software environment. For the convenience of manufacturing and soldering the first prototype, a printed circuit board with a width of 90 mm and a height of 50 mm was developed. The conductors on the board are made 0.762 mm (30 mil) wide. In narrow places, the conductor is 0.381 mm (15 mil) wide. The minimum distance between the conductors is 0.381 mm (15 mil). The board is single-layer, the output components are placed on the front side where there are no conductors, and all SMD elements are placed on the back side. In order to connect all the necessary component outputs to a common node (GND), it was decided to use the “Copper region” tool, that is, to use all the free space on the board for a common node. This approach will allow removing a fairly small part of the copper from the board during production, which will take much less time for manufacturing. To secure the device in the case, 4 holes with a diameter of 3 mm are placed at the corners of the board.

In the third section, the module transimpedance amplifier block was simulated, in particular, the response to rectangular pulses was investigated and the frequency response and phase response were measured in the frequency band 1 Hz - 2.8 MHz. The simulation results coincided with expectations with a certain accuracy. After analyzing the simulation results, it was found that the photodiode signal amplifier was designed correctly, since the deviation of the simulation results from the calculations made in paragraph 2.5 did not exceed 7%, which is a fairly good result. It was determined that the developed amplifier is stable and operates stably. The next stage was the development of the STM32F446RET6

microcontroller firmware to check the module's operability. The condensation moisture meter sensor module itself was manufactured and tested in conditions close to real operating conditions. The test consisted of recording condensation curves during cooling of the condensation surface. For this purpose, the measuring chamber of the hygrometer Toros 3-2V and the moisture gas generator GVG-2M were used. Measurements were carried out for three preset dew point temperatures: 0, +10 and -20 °C. The nature of the curves coincided with expectations, which indicates that the developed device works properly and stably. The developed sensor module of the condensation hygrometer is fully functional, correctly, stably and accurately detects the temperature of the condensation surface, and also provides timely detection of the condensate film that forms on the hygrometer mirror during the measurement process.

During the implementation of the diploma project, a condensation hygrometer sensor module was developed. After manufacturing and testing the test sample in conditions close to real operating conditions, it was found that the developed device fully satisfies the requirements that were put forward in the technical task.

The module is easily integrated into systems thanks to the SPI protocol for data exchange with the microcontroller and a wide range of supply voltages (4.5–20 V). The SPI protocol is widely used in modern microcontrollers ATmega, STM32, NXP LPC and many others. Several devices can be connected to one SPI bus of the microcontroller, therefore, the use of several developed modules will allow for synchronous/asynchronous measurements of the dew point temperature by moisture at several gas sampling points at once.

The availability and versatility of the component base was achieved through the use of components that have a wide range of analogues among many world manufacturers. Thus, the AD7793 analog-to-digital converter can be replaced, if necessary, with the younger model AD7792, which has a smaller conversion bit size (16 bits instead of 24). Instead of the MCP601-I/P operational amplifier from

Microchip, you can use any other operational amplifier from another manufacturer with similar characteristics, for example, the OPA344PA from Texas Instruments.

Ease of manufacture and high maintainability of the device at this stage are ensured by the use of a large number of through-hole electronic components and thanks to simple and effective circuit and design solutions. Mounting and dismantling of elements from the printed circuit board does not require complex and long technological processes. Manufacturing and repairing the device takes minimal time. Nevertheless, in the case of launching mass production of the developed module, it makes sense to switch completely to the SMD component base in favor of the compactness of the product and the use of automated systems for mounting electronic components on the printed circuit board.

The result of the study can be used as part of condensation moisture meter complexes for natural and process gases with a semiconductor optical dew point detector.

Keywords: electronics, hygrometer, dew point, natural gas.

Summary of the project: 5 pages