

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра радіотехніки
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
**«МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ З
ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи
МНТ-20М

спеціальності 153 – Мікро- та
наносистемна техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кравчук М.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. РТ

Осадчук В.С.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Опонент: к.т.н., професор каф. ТКСТБ

Бортник Г.Г.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри РТ

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Вінницький національний технічний університет
 Факультет Інфокомунікації, радіотехніки та наносистем
 Кафедра Радіотехніки
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
 Галузь знань – 15 Автоматизація та приладобування
 Спеціальність – 153 – «Мікро- та наносистемна техніка»
 Освітньо-професійна програма – Мікро- та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
радіотехніки
 д.т.н., професор О.В. Осадчук

_____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Кравчуку Максиму Сергійовичу _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом».
 Керівник роботи Осадчук Володимир Степанович, д.т.н., професор
 затверджені наказом вищого навчального закладу від “__” _____ 2021 року № _____
2. Строк подання студентом роботи _____ 2021 року
3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення до 9 В, струм споживання не більше 40 мА, діапазон вимірювання вологості від 0 % до 20 %, амплітуда вихідного сигналу не менше 1 В, діапазон робочих частот 400 кГц – 700 кГц.
3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз сучасного стану розвитку вимірювальних засобів вологості; розробка радіовимірювального перетворювача для вимірювання вологості нафтопродуктів ; економічна частина, безпека життєдіяльності; висновки; перелік посилань; додатки.
4. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): схема структурна; функціональна схема; схема електрична принципова пристрою;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Осадчук В.С.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Професор кафедри БЖДПБ доцент, д.п.н., Дембійська С.В.		
Економічна частина	доцент. каф. ЕПВМ к.е.н., Кавецький В.В.		

7. Дата видачі завдання _____ 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	03.09.2021-14.09.2021	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2021-21.09.2021	
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	21.09.2021-25.09.2021	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09.2021-09.10.2021	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2021-03.11.2021	
6.	Розділ моделювання	04.11.2021-12.11.2021	
7.	Розробка графічної частини МКР	13.11.2021-18.11.2021	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	19.11.2021-24.11.2021	
9.	Охорона праці (ОП)	25.11.2021-30.11.2021	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.12.2021-08.12.2021	
11.	Нормоконтроль	09.12.2021-12.12.2021	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	13.12.2021-19.12.2021	
13.	Захист МКР ЕК	21.12.2021-23.12.2021	

Студент

Кравчук М.С._____
(підпис)

Керівник роботи

Осадчук В.С._____
(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Кравчук М.С. Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2021. –143 с. На українській мові. Бібліогр.: 42. назв; Рис. 28.

У магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз засобів та методів визначення вологості газів, розглянуто Фізичні методи визначення вмісту вологи.

Розглянуто хімічні методи визначення вмісту вологи. Проведено теоретичне обґрунтування методу ідентифікації конденсованих компонентів природного газу на основі методу перепаду тисків.

Проведено аналіз способів визначення температур точки роси вологи та гідратуутворення в середовищі природного газу.

Також у роботі розроблено розділи економічної частини, охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: Мікроелектронні сенсори, LC-фільтри, точка роси, електричні фільтри, RC-фільтри, п'єзоелектричний резонатор, температурні датчики.

ABSTRACT

Kravchuk MS Microelectronic humidity sensors with frequency output. Master's qualification work. - Vinnytsia: VNTU, 2021. -134 p. In Ukrainian language. Bibliogr.: 42. titles; Fig. 28.

In the master's qualification work the analysis of means and methods of definition of humidity of gases was carried out, Physical methods of definition of moisture content are considered.

Chemical methods for determining the moisture content are considered. Theoretical substantiation of the method of identification of condensed components of natural gas on the basis of the method of pressure drop is carried out.

The sections of the economic part, labor protection and safety in emergency situations are also developed in the work.

An analysis of methods for determining the dew point temperature of moisture and hydration in the environment of natural gas.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ГАЗІВ	8
1.1 Аналіз засобів та методів визначення вологості газів.....	8
1.2 Фізичні методи визначення вмісту вологи.....	11
1.3 Хімічні методи визначення вмісту вологи.....	12
1.4 Фізико-хімічні методи визначення вмісту вологи.....	12
1.5 Випарювально-психрометричні методи визначення вологості.....	15
1.6 Конденсаційні методи визначення температури точки роси.....	16
1.7 Аналіз способів визначення температур точки роси вологи та гідратуутворення в середовищі природного газу.....	20
1.8 Теоретичне обґрунтування методу ідентифікації конденсованих компонентів природного газу на основі методу перепаду тисків.....	32
1.9 Висновки до розділу.....	47
2 РОЗРОБКА МІКРОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ	48
2.1 Розробка структурної схеми.....	48
2.2 Математична модель мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом.....	49
2.3 Вибір елементної бази.....	52
2.4 Розробка електрично принципової схеми мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом.....	60
2.5 Розробка алгоритму роботи мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом.....	61
2.6 Моделювання роботи схеми мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом.....	63
2.7 Висновки до другого розділу.....	64
3 РОЗРОБКА ПЛАТИ ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ	65
3.1 Вибір типу та матеріалу друкованої плати.....	65
3.2 Вибір класу точності та методу проектування друкованої плати.....	66
3.3 Розрахунок ширини провідників.....	67
3.4 Моделювання проекту в ARES PCB LAYOUT.....	68

3.5 Висновки до третього розділу.....	71
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	72
4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки.....	72
4.2 Визначення рівня конкурентоспроможності розробки.....	76
4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	78
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором.....	90
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	95
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	95
5.1.1 Безпека щодо організації робочих місць.....	95
5.2 Гігієна праці та виробнича санітарія.....	97
5.2.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат.....	97
5.2.2 Виробничий шум.....	99
5.2.3 Виробничі випромінювання.....	99
5.2.4 Психофізіологічні фактори.....	100
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	102
ВИСНОВКИ.....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання	112
Додаток Б (обов'язковий) Структурна схема.....	118
Додаток В (обов'язковий) Електрична принципова схема.....	120
Додаток Г (обов'язковий) Алгоритм роботи мікроелектронного сенсора...	122
Додаток Д (обов'язковий) Автотрасування та розміщення елементів схеми в середовищі ARES Proteus. а)вид зверху б)вид знизу.....	124
Додаток Е (обов'язковий) Зовнішній вигляд розробленої друкованої плати з встановленими компонентами.....	126
Додаток Ж (обов'язковий) Зовнішній вигляд розробленої друкованої плати без компонентів.....	128
Додаток К (обов'язковий) Програма моделювання мікроелектронного сенсора вологості.....	130

ВСТУП

Вологість природного газу є важливим параметром, з яким доводиться рахуватися при транспортуванні та обліку природного газу. Природний газ, що видобувається з підземних джерел, насичений рідкою водою і важкими вуглеводнями. З метою зменшення вологості газу і доведення її до необхідних норм на головних спорудах газових промислів проводиться осушення газу. Присутність вологи в газі небажана, оскільки при транспортуванні газу можуть спостерігатися випадки корозії трубопроводів і арматури, а також утворення гідратів (продуктів приєднання води до різних речовин) та конденсату. Вологість газу значно впливає на швидкість корозії устаткування і повинна враховуватися при виборі того чи іншого інгібітору. Експериментально доведено, що при відсутності в газі води або при його осушення до відносної вологості 20 - 30% корозія практично не отримує розвитку незалежно від змісту в газі агресивних компонентів. Вона починає помітно проявлятися при вологості газу 60% і більше. Максимальна швидкість корозії спостерігається при 100%-вої вологості природного газу. Крім того, вміст вологи знижує питому теплоту згорання газу. Для того, щоб задовольнити вимоги, які висуваються до чистого, сухого й абсолютно газоподібного палива, придатного для передачі по трубопроводах і постачання кінцевим користувачам для спалювання, газ повинен пройти декілька стадій переробки, включаючи видалення рідин, захоплених газом, з подальшим висушуванням для зниження вмісту водяної пари. Значення відносної вологості за стандартних умов повинно бути меншим за 0,1% (згідно з технічними вимогами Правил РД 50-213-80, що відповідає точці роси - 58,21°C при нормальних умовах). Вологість газів вимірюється різними методами, прийнятність кожного з яких визначається конкретним місцем застосування на основі його точності та чутливості. Основними методами вимірювання вологості природного газу є психрометричний, сорбційний та метод точки роси (конденсаційний). Одним з найбільш високоточних із застосованих до природного газу методів є конденсаційний на основі вимірювання температури точки роси. Найважливішими перевагами вологомірів СВЧ є: можливість безконтактних вимірювань (в вільному просторі), висока чутливість, необмежена верхня межа вимірювань, малий вплив на результати вимірювань хімічного складу і деяких інших чинників. Класична схема вимірювача вологості на основі методу точки роси містить конденсаційну поверхню, яку ще називають дзеркалом, НВЧ

схему, охолоджувач та сенсор температури. Перевагою вимірювань по відображенню є одностороннє розташування приймально-передавальної системи НВЧ щодо об'єкта вимірювання. При нормальному падінні хвилі модуль коефіцієнта відбиття по потужності дорівнює відношенню відбитої потужності до падаючої. У методі відбиття можна використовувати похиле або нормальне падіння хвилі. Перевагу зазвичай віддають нормальному падінню, при якому використовується одна прийомно-передаюча антена, в той час як для похилого падіння застосовуються вимірювальні пристрої, засновані на оцінці параметрів стоячій хвилі, що виникає в результаті суперпозиції падаючої і відбитої хвиль. Для прийому відбитої хвилі однієї суміщеної антеною можна використовувати в хвилеводному тракці спрямований відгалужувач або подвійний трійник, що дозволяють отримати більш високий рівень сигналу і кращу розв'язку генератора НВЧ від тракту [1-4]. Оскільки існуючі засоби вимірювання вологості природного газу внаслідок низького рівня достовірності результатів втрачає свою доцільність, невисока швидкість вимірювання та неможливість інтеграції цих засобів в загальну систему. На підприємствах газової промисловості України на сьогодні є актуальним питання засобів вимірювання, здатних визначати одночасно декілька показників якості, а саме: температура точки роси, компонентів газу та температура початку утворення кристалогідратів, криги.

Розвиток галузі газу значно пов'язаний із забезпеченням якості газу, що видобувається та транспортується до споживачів. Природний газ містить велику кількість елементів та домішок, основним компонентом є ряд вуглеводнів. Усе інше – домішки, і тому для забезпечення необхідного рівня якості вміст повинен бути мінімізованим. Найважливішим показником якості природного газу є кількість вмісту в ньому вологи. Дотримання потрібного значення вмісту вологи в газі є неможливим без автоматичного та постійного контролю на всіх пунктах його транспортування. Водночас вимірювання вологості природного газу є занадто складним процесом через наявність у складі важких вуглеводневих фракцій, технологічних та механічних домішок. У промисловості показником вологості використовують значення температури точки роси – температури, при якій розпочинається процес конденсації пари вологи, яка є в складі газу при сталому тиску. У більшості нормативних документах саме значення температури точки роси вологи є інформативним показником якості. У більшості випадків, використання засобів визначення вологості природного газу втрачає сутність внаслідок недостовірності або низького рівня якості отриманих

результатів, низької швидкодії і неможливості інтегрування засобів в загальну систему керування технологічного обладнання. Сьогодні актуальною проблемою є відсутність на підприємствах газової промисловості засобів вимірювання з можливістю визначення декількох показників якості одночасно, а саме температура початку конденсації компонентів газу та температура початку утворення сполук з кристалічною структурою.

Отже, необхідність та важливість нових методів та засобів для точного та швидкого визначення вологості природного газу зумовили вибір теми дослідження. Створення нової сучасної системи вимірювання показників якості природного газу, забезпечення точного, швидкого та достовірного визначення вологості з урахуванням домішок в його складі. Тому тема дослідження є актуальною.

Мета роботи

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є підвищення точності вимірювання вологості газів.

Задачі дослідження

- проаналізувати існуючі методи вимірювання вологості газів;
- змодельовати структурну та електричну принципову схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом, провести схемотехнічне моделювання;

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес перетворення концентрації водяної пари в газі в електричний інформаційний сигнал.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є параметри та характеристики мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом.

Методи дослідження

- Аналіз джерел інформації.
- Програмне та схемотехнічне моделювання розробленої схеми за допомогою ISIS Proteus.
- Моделювання в середовищі Proteus 8.0 Layout для розробки топології електричної схеми;

Наукова новизна магістерської кваліфікаційної роботи: Проведено аналіз публікацій, присвячених сучасному стану розвитку методів визначення вологості газів. Запропоновано математичну модель мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом. Розроблено структурну схему пристрою. Розроблено електрично принципову схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом, наведено принцип її роботи.

Промодельовано розроблену електричну схему в різних режимах роботи, що підтверджує можливість застосування даної схеми на практиці.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що розроблено мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом, яка дозволить проводити вимірювання природного газу, оцінювання його якості, а саме за показником вологості. Розроблений пристрій є переносним та побудований на сучасній елементній базі, з використанням мікроконтролера та дистанційного зв'язку, що робить цей пристрій зручним у користуванні і дає можливість наглядно побачити результат вимірювання.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно в науковій школі д.т.н., проф. Осадчука О.В.

Структура і обсяг роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків та переліку посилань.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ГАЗІВ

Для вимірювання і контролю вологості в газових середовищах застосовуються гігрометри, в основі яких лежать різні методи вимірювання вологості. Залежно від поставленої вимірювальної задачі, визначається вибіртого чи іншого методу у кожному конкретному випадку.

1.1 Аналіз засобів та методів визначення вологості газів

Основною задачею при транспортуванні природного газу є оцінювання його якості, а саме за показником вологості. Термін «якість природного газу» розуміють, як його склад та основну характеристику, а саме вміст вологи, теплотворна здатність та наявність корозійно-активних компонентів (вуглекислий газ, сірководень і т. і.). Показник якості природного газу – вміст у ньому вологи [1], тому що даний показник безпосередньо пов'язаним з можливістю його транспортування від місця видобування до кінцевого споживача [2]. Кількість вологи в природному газі безпосередньо пов'язана з режимами експлуатації нафтогазових родовищ і походженням газу. У процесі створення груп вуглеводнів переміщення бульбашок газу в надрах Землі відбувається у рідкому середовищі, у наслідку чого газ стає насиченим водою в залежності від температури і тиску на різних глибинах. У процесі видобування газу з родовищ знижується тиск у покладах – це призводить до проникнення пластових вод в них, які можуть насичувати природний газ вологою [3;4]. Так, природні гази, що видобуваються з нафтогазових родовищ, зазвичай, насичені водяною парою. Під поняттям «вологість газу» мають на увазі кількість в ньому парів води. Однак цей термін є загальним і недостатньо конкретним, тому що для кількісної характеристики вологи точки роси використовують більш конкретний термін - абсолютну вологість (відносну вологість). У газовій промисловості найважливішою ключовою характеристикою газу, що характеризує вологість і демонструє можливість ефективного транспортування, а конкретніше, без конденсації та утворення гідратів у газошляху та газових приладах, є температура точки роси вологи [5]. Волога, яка є у складі природного газу, перешкоджає його транспортуванню

газошляхами [6]. Перед транспортуванням природного газу його очищують від конденсату важких вуглеводневих фракцій, вологи та механічних домішок. Навіть незначне відхилення від потрібного рівня вологості може призвести до зниження пропускної спроможності газошляхів, що є наслідком втрати газопостачання. Транспортування не потребує повного виключення вологи з газу, але потребує підтримки температури точки роси вологи, що не перетворює газ, за умови зниження його температури, з ненасиченого до насиченого стану, за якого можливе випадання роси (утворення вологи). Для уникнення таких процесів потрібно достовірно визначати та прогнозувати гідравлічні та теплові режими газошляхів, оптимальну вологість природного газу, що транспортується.

Параметром, що характеризує вміст вологості в природному газі, стала температура точки роси вологи. Вимірювання вологості набули широкого масштабу. Це пояснюється так, точка роси є найбільш інформативним показником конденсаційності газу за параметром якого можна без додаткових розрахунків оцінити ступінь транспортної кондиційності тільки порівнюючи його з температурами газу та газового обладнання. Теоретичні дослідження та лабораторні роботи зі створення методик визначення та розрахункових методів масово розпочато на початку 50-х років ХХ століття.

Кількість вологи у природному чи будь-якому іншому газі, характеризує концентрацію вологи парової фази у системі «газ-вода». У більшості випадків, вологовміст газів описують у ваговій кількості пари вологи, що випадає на одиницю ваги сухого газу, або кількість молей пари вологи на моль сухого газу. Вологовміст газів є кількісною характеристикою і показує кількість вологи (вимірної в грамах), яку розчинено в 1 м^3 вологого газу за нормальних атмосферних умов ($+20 \text{ }^\circ\text{C}$, 760 мм. рт. ст.). З курсу термодинаміки знаємо, що в 1 м^3 газу може бути розтворено остаточно кількість вологи за таких умов. Зі зміною характеристик газової системи (температура, тиск), змінюється, послідовно, і найбільший об'єм вологи, що може бути розтвореним. Під розчиненням в газі вологи розуміють її наявність у вигляді пари, виключаючи наявність у вигляді крапель. За нормальних умов в 1 м^3 природного газу густиною $0,6 \text{ кг/м}^3$ може бути розтворено $9,2 \text{ г}$ вологи, а за температури $30 \text{ }^\circ\text{C}$ уже $16,6 \text{ г}$. Маємо, з підвищенням температури розчинність вологи в газі збільшується (та навпаки). Зазвичай абсолютний вміст вологи позначається W , г/м^3 чи кг/1000 м^3 . Окрім цього, параметри вологовмісту визначають об'ємною та (чи) масовою часткою. Часткою вологи є кількісна характеристика, що

виражають в об'ємних або масових частках вологи у відношенні до об'єму чи маси газу, в якому її розтворено відповідно [4].

Вологість газу – це якісна характеристика, яка відображає пропорцію кількості вологи, що розчинено в газі до найбільшої можливої кількості за таких умов (тиск, температура), тобто рівень насиченості газу водяною парою, визначається відсотками (%).

Температура точки роси вимірюється градусами Цельсія ($^{\circ}\text{C}$) та її значення дорівнює температурі, за якої газ досягає майбільшого насичення розчиною в ньому вологою при такому тиску. Серед зазначених одиниць вимірювання існує досить відомий зв'язок. Тобто, якщо термодинамічні параметри системи відомі, то інші можуть бути розрахованими. Для прикладу, температура точки роси та значення тиску газу відомі, можна розрахувати вміст вологи, вологість та масову чи об'ємну частку вологи для даного газу [7]. Діючий на сьогодні ГОСТ 20060-83 регулює наявність нижчезказаних методів визначення вмісту вологи у природному газі:

– електролітичний метод, полягає у вбиранні водяної пари з потоку досліджуваного газу частково гідратованим п'ятиокисом фосфору, водночас електролітичному розкладанні поглинутої рідини й вимірюванні величини струму електролізу. Метод застосовують для визначення вмісту водяної пари, де об'ємна частка вологи не перевищує 0,2 % і парціальна частка метанолу в парі води менша 11 %;

– методи абсорбції, що базуються на вбиранні водяної пари метанолом або діетиленгліколем і в подальшому визначенні кількості води, зв'язаної метанолом або діетиленгліколем, методом газової хроматографії або титруванням розчином Карла Фішера. Метод абсорбції застосовують для визначення водяної пари, де вміст не перевищує 100 мг/м³. Під час титрування розчином Карла Фішера кількість сірчистих сполук не має перевищувати 30 мг/м³;

– метод визначення точки роси шляхом конденсації, заснований на принципі вимірювання температури, при якій на охолоджуваній поверхні відбувається конденсація вологи, яка є наявною у газі. Газ, що досліджується переміщують над конденсаційною поверхнею. Після досягнення пари води, що є в газі, температури насичення, з газу «випадає» волога і на поверхні з'являється роса. Враховуючи тиск та температуру у вимірювальній камері, при яких з'явилась роса, можна розрахувати кількість вологи в газі.

1.2 Фізичні методи визначення вмісту вологи

Визначення вологовмісту фізичними методами можна поділити на дві групи – загальнофізичні та хвильові. Хвильові – основані на поглинанні радіоактивних та електромагнітних випромінювань водяною паром [7]. Ці методи мають

підвищену чутливість, яка збільшується при зменшенні вологості, та відносно малу (0,5-3%) вимірювальну похибку.

Таблиця 1.1 – Основні методи визначення вологості газів

Основні методи визначення вологості газів				
Метод визначення вмісту та часточок вологи	Метод визначення відносної вологості		Метод визначення температури точки роси	
	Фізичні	Хімічні	Фізико-хімічні	Психрометричний
Інфрочервоний	Ваговий	Ваговий	Конденсійно-психрометричний	Тепловий
Оптико-акустичний	Абсорційний	Деформаційний	Компенсаційно-психрометричний	Компресійний
Ультрафіолетовий	Колірний	Частотний	Випарювально-ваговий	Гравіметричний
Радіоактивний	Турбодиметричний	Діелектрометричний		Конденсійно-згущувальний
Радіоспектрометричний	Газометричний	Колориметричний		Вихровий
Пневматичний		Тепловий		Конденсійно-термометричний
Акустичний		Інтерферометричний		
Дифузійний		Хромотографічний		
Тепловий		Резистивний		
Мос-спектрометричний		Об'ємний		
Діелектричний		Електролітичний		
		Термоелектролітичний		
		Кулонометричний		

Складність апаратури вимірювання та використання методу тільки в чистих газах – головний недолік хвильових методів. Хвильові методи [7]:

- інфрачервоний;
- ультрафіолетовий;
- оптико-акустичний;
- радіоспектрометричний;
- радіоактивний.

Методи, що застосовують загальнофізичні принципи визначення параметрів вологості газів [8]:

- акустичний;
- тепловий;
- дифузійний;
- пневматичний;
- діелектричний;
- мас-спектрометричний.

1.3 Хімічні методи визначення вмісту вологи

Визначення вологовмісту хімічними методами в газовому середовищі мають особливості, а саме процес визначення супроводжується хімічною реакцією. Ваговий метод, який заснований на можливості більшості хімічних речовин вступати в хімічну реакцію з парами води та змінювати масу продуктів реакції, яка пропорційна масі вологи, що поглинута. Речовини, що активно реагують з парами води: окиси натрію, літію, кальцію, калію та ін. Реакція з водою - створюють гідрати окислів. Плюси такого методу заключаються в тому що є можливість пропускання газу, через поглинач із вищою швидкістю, і цим прискорювати процес вимірювання вологовмісту, що забезпечує швидке вбирання вологи хімічним поглиначем. Мінус методу – відсутність можливості регенерації хімічних поглиначів. Похибка цього методу вираховується похибкою вимірювання об'єму газу, його тиску та температури. Похибка досягає 1%. Ще одна можлива похибка виникає за наявності у газі кислотних компонентів, що можуть вступати в реакцію з поглиначем [7].

1.4 Фізико-хімічні методи визначення вмісту вологи

Найпоширенішими методами визначення вологовмісту у газах є фізико-хімічні методи. Вони є дуже різноманітними за принципом дії [8; 9], а вимірювальна база, що їх виконує, має велику кількість різновидів. Основним принципом первинної дії є поглинання рідкою (абсорбція), або твердою (адсорбція) речовиною пароподібної вологи з газу є спільним для усіх методів. Тому частіше ці методи позиціонують як сорбційні. Волога, що може накопичуватись у масі активної речовини, змінює її властивості, змінення яких є пропорційним вмісту вологи в газах. Широкого застосування у промисловості здобули вимірювачі, що застосовують електролітичний метод, який заснований на зміні електричного опору плівки ненасиченого водного розчину сорбенту, який є в гідродинамічній рівновазі з газом, що було досліджено. Гігрометри, вперше почали використовувати в 1938 р. Переваги зазначеного методу полягають у простоті виконання чутливого елементу гігrometerів і низьких витрат на них. Метод має невелику інерційність та можливість виконання вимірювань при від'ємних значеннях температури, проте не нижче температури кристалізації електроліту. Певні зразки чутливих елементів, які застосовують електролітичний метод, можуть забезпечити вимірювання вологовмісту з похибкою до $\pm 1,5\%$. Чутливий елемент може бути розташованим в потоці середовища. Недоліками цього методу є низька стабільність за період часу, залежність результату від температури, збільшення похибки приладу в разі довготривалого перебування чутливого елементу в середовищі з відносною вологістю 100%. Теж до «мінусів» слід віднести обмеження нижньої межі вимірювання вологовмісту, наприклад, в залежності від температури нижня межа визначення вологовмісту дорівнює $10\div 15\%$. Окрім цього, використання набули такі методи:

- деформаційний або дилатометричний метод, заснований на властивості змінювати геометричні розміри деяких матеріалів при поглинанні ними вологи; ваговий метод, заснований на визначенні збільшення маси сорбенту після взаємодії з газом, що аналізується;

- ваговий метод, сторено на визначенні збільшення маси сорбенту після контактування з газом, що аналізується;

- деформаційний або дилатометричний метод, заснований на властивості змінювати геометричні розміри деяких матеріалів при поглинанні ними вологи;

- частотний або п'єзокварцевий метод, заснований на явищі зміни частоти коливань кварцової пластини при зміні вологості газу, що аналізується;
- сорбційно-ємнісний або діелькометричний, метод вимірювання вмісту вологи в газах, що заснований на зміні ємності електричного конденсатора з діелектриком;
- тепловий або калориметричний метод, заснований на якості деяких гігроскопічних речовин (силікагель, оксид алюмінію, цеоліти) збільшувати температуру за умови насиченні вологи парою;
- хроматографічний метод вимірювання вологовмісту, заснований на розподілі суміші газу, на окремі частки способом їх переміщення капіляром, де сорбуюча речовина вкриває поверхню тонким шаром, під час постійного процесу переміщення компонентів газу до сорбенту і назад;
- інтерферометричний метод, створено по принципу зміни товщини тонких плівок гігроскопічних матеріалів під час поглинання вологи ними;
- об'ємний метод, створений на зміні об'єму аналізованого газу, після його проходження через поглинач вологи;
- резистивний метод, базується на властивостях певних речовин (селен, вугільний пил та ін.) змінювати електричний опір залежно від кількості вологи газу;
- кулонометричний метод, базується на вбиранні водяної пари плівкою гігроскопічної речовини та одночасному електролізі увібраної вологи.

Гігрометри, що базуються на сорбційних методах, є більш простими конструктивно в порівнянні з розглянутими, але при використанні їх в роботі природного газу є деякі недоліки. Перший і основний недолік – це недостатня селективність поглинаючої спроможності активної речовини первинного перетворювача по відношенню до вологи. Хоч і активна речовина первинного перетворювача вбирає більшість пари води, проте присутні технологічні домішки або складові природного газу в певній мірі можуть проникнути у склад активної речовини та призвести до похибки значення вихідного сигналу. Ця похибка важко систематизується та її майже неможливо врахувати [9]. Наступним недоліком є те, що поверхня чутливого елемента під час роботи контактує з вимірювальним середовищем, яке, зазвичай, містить у своєму складі аерозольні та механічні домішки. Якщо домішки потрапляють на робочу поверхню, то вони мають змогу накопичуватися і з часом починають перешкоджати масообміну вологи між активної речовиною та газом. У такому випадку з часом знижується чутливість первинного перетворювача. Також,

складно врахувати та компенсувати похибку, що виникає при цьому [12]. Виключити виникнення подібних недоліків можна проведенням ретельного очищення досліджуваного газу, від механічних, активних компонентів та технологічних домішок, проте в такому випадку є можливість зміни складу газу. Також, до «мінусів» використання цього методу визначення вологовмісту можна віднести і той факт, що в газовій промисловості, в більшості випадків вимірювання вмісту вологи необхідно проводити за умов надлишкового тиску газу, а показники тиску у робочій камері приладів, які відтворюють метод, не може бути більше ніж 1 кг/см^2 . Для створення робочих умов вимірювань потрібно провести зниження робочого тиску досліджуваного газу до дозволених значень для цих вимірювачів. Однак, при зниженні тиску є ризик отримати таке ж зміння складу газу та невідповідність відібраної проби досліджуваного газу. Найбільша небезпека полягає у можливості проникнення до активної речовини складових газу, що утворились при зміні термодинамічних параметрів газу через редукування, в крапельному чи аерозольному вигляді. У наслідок, вимірювач може вийти з ладу.

1.5 Випарувально-психрометричні методи визначення вологості

Психрометричні методи базуються на принципі існуванні залежності швидкості випаровування з поверхні межі розподілу «вода-газ» від відносної вологості газу [10]. Так як при випаровуванні межа розподілу охолоджується, то мірою інтенсивності випарювання, відповідно і вологості газу, може бути відмінність температур газу і поверхні розподілу межі середовищ. Перевагою методів є невелика похибка вимірювання (до 3 %) при плюсових температурах, невисока інерційність, відсутня необхідність калібрування засобів з використанням газових сумішей за вмістом вологи. Недоліками методів є неможливість проведення вимірювань при мінусовій температурі газу та існуванні залежності показів від швидкості протікання досліджуваного газу і його тиску. На результат психрометра впливає чистота води, яка зволожує «мокрый» термометр. Наявність залишків солі в дистильованій воді, що накопичуються на поверхні матеріалу «мокрого» термометру, має здатність значно спотворювати результати вимірювань. Перевагою методів є можливість застосування в агресивних середовищах. При таких умовах покриття «мокрого» термометра виготовляється з пористого скла. У газовій промисловості випарувально-психрометричні методи не використовуються внаслідок

наявності нестабільних та високих значень тисків газу, а також необхідності проведення вимірювання за від'ємних значень температури газу [11]. Різновидами випарувально-психометричних методів є:

- конденсаційно-психометричний метод, заснований на зміні температури термометра, що вкритий шаром розчину гігроскопічної речовини в залежності від відносної вологості середовища;

- компенсаційно-психометричний метод – різновид випарувально-психометричного методу та він заснований за тим же принципом. Однак у цьому методі розробникам вдалося уникнути деяких джерел виникнення похибки, що підвищило точність вимірювань. У випарувальних психометрах, які обдуваються для підвищення чутливості і прицезійності досліджуванним газом, на «мокрій» термометр має вплив зниження температури через випаровування рідини на межі «газ- вода», з іншого боку намагання підвищити температуру такого термометру за допомогою потоку газу, який має вищу температуру. У результаті температура «мокрого» термометру значно залежна від його швидкості обдування газом, а це є головним джерелом похибки психометрів. До того ж, між оточуючими предметами та «мокрим» термометром взаємодіє радіаційний теплообмін, що також може підвищувати його температуру до температури вимірювального газу. Вміст вологи в природному газі у більшості випадків потрібно вимірювати за умов надлишкового тиску досліджуваного газу, отже, надлишковий тиск призводить до неможливості застосувань базових методів, що застосовуються для вимірювання вологості повітря.

1.6 Конденсаційні методи визначення температури точки роси

Всі конденсаційні методи базуються на визначенні температури точки роси вологи з газу, саме тому вони й мають відповідну назву, а різниця в них полягає у способі визначення початку моменту конденсації. Існують такі методи:

- ваговий метод, базується на залежності маси сконденсованої води з встановленого об'єму газу від його кількості вологи;

- тепловий метод, створено за принципом моменту початку конденсації вологи на конденсаційній поверхні зі зміною температури у результаті виділення вологи парою;

- адіабатичний метод, базується на вимірюванні тиску газу, під час початку конденсації пари вологи при адіабатичному розширенні;

– компресійний метод, базується на розрахунку найменшого надлишкового тиску газу, за якого на попередньо охолодженій конденсаційній поверхні, утворюється конденсація та підтримується рівень вологи;

– вихровий метод, створений на ефекті Ранка. Даний ефект заснований на потраплянні до циліндричного отвору стисненого газу, де відбувається перерозподіл температур газу протягом перетину за допомогою відцентрових сил. За наявності в газі пару вологи за умови охолодження волога конденсується та переходить до твердого або рідкого стану. За таких умов ефективність роботи вихрової труби знижується, а температура «холодного» газу збільшується;

– конденсаційно-термометричний метод заснований за принципом вимірювання температури конденсації і випаровування вологи на поверхні тіла, що охолоджується при утворенні рівноваги робочого тиску і тисків насиченої водяної пари газу. За температурою точки роси досягається гідродинамічний баланс між шаром конденсату вологи на поверхні охолодженого тіла та водяною парою вологого газу. Основна перевага приладів – незалежність температури, що вимірюється, від температури досліджуваного газу. За таких умов стає можливим встановлення вимірювачів на значній дистанції від основної магістралі з газом. Оскільки визначення точки роси зводиться до вимірювання температури, вимірювачі, що релізують цей метод мають високу точність, а для їх градування достатньо градування перетворювача температури або термометру. Область вимірювання гігрометрами від -90 до $+40$ °C. Період проведення вимірювання від 1 до 10 хвилин, похибка – від 0,2 до 2 °C. Прилади, які використовують такий метод, мають просте конструктивне виконання та можуть бути застосовані для вимірювання великих значень тиску газу (до 250 кг/см^2). Контроль якості природного газу вмісту в його складі вологи почало розвиватися одночасно із зародженням газової промисловості в Україні, яка на той час була в складі Радянського союзу. Через відсутність вологомірів кількість вологи проводилась методом, що передбачала кілька етапів вимірювання: в хіміко-аналітичній лабораторії і на газовому об'єкті. Очевидно, що оперативність цієї методики була незадовільною. Це стримувало налагоджування постійного контролю якості у всіх необхідних випадках, а сам контроль мав здебільш технологічний характер. Іншими словами, якість газу за таким показником як вологість, була зорієнтована для виконання технологічних потреб підприємства, а потреби споживачів враховувалися за умови співпадання

з інтересами підприємства. Проблему оперативного і достовірного контролю якісних показників газу, а саме вологості, вирішити без інструментального забезпечення було неможливо, тому з другої половини ХХ століття було розпочато період розробки бази приладної вологометрії. Закупки іноземних вологомірів не були успішними через їх ненадійну роботу, зумовлену недостатнім рівнем підготовки газу на підприємствах, вмісту в ньому діетиленгліколю та метанолу в паровому і крапельному вигляді. Не досягли успіху і спроби застосування у газовій промисловості існуючих вітчизняних вологомірів, що використовувалися в інших галузях народного господарства. Через це в першій половині 70-х років Мінгазпром прийняло рішення щодо розробки для газової промисловості приладів, що могли б відповідати жорстким умовам використання на підприємствах, силами галузевих організацій. Початок проектування вологомірів почали у УкрНДІгазі та ВНДІГази, в яких на той період було накопичено достатньо досвіду в цій галузі. З часом до роботи приєдналися науковці з інших відомств та міністерств. Перші вимірювачі вологовмісту, які були застосовані на виробництві, стали ТТР-8, «Роса-1» та «Харьков-1», створені у УкрНДІгазі. Пристрої вимірювання волого інших розробників виявились малоефективними для масового застосування в системі газової промисловості через ті ж причини, що і їх зарубіжні аналоги. На початку 80-х років ХХ століття на зміну технічно застарілим приладам в УкрНДІгазі було розроблено новий вологомір «Харьков-2», який зберігав усі переваги своїх попередників та вигідно відрізнявся від них своїми конструктивними та ергономічними характеристиками. Цей прилад вимірювальної техніки на той час набув максимальної розповсюдженості порівняно з іншими. У кінці ХХ століття на об'єктах газової промисловості почали створюватися нові розробки приладів вимірювання температури точки роси, які дуже відрізнялися від своїх попередників і мали здатність автоматично виконувати вимірювання та приєднуватися до автоматизованих систем керування (АСК). Основними приладами, що проходили випробування, були такі прилади як модель 241 фірми «Бовар Вестерн Рисорч», прилад фірми «Гігролог», «Дьюскоп», прилади «Chandler», «Серег Шлюмберже», «ТОРОС». Проте велика кількість використовувала конденсаційний метод у звичному варіанті, тому і мала характерні для цієї реалізації недоліки. Першими відійшли від звичної реалізації конденсаційного методу конструктори УкрНДІгазу під час створення вологоміру типу «Харьков», у яких конденсаційний метод було реалізовано у статичному режимі, що дало можливість застосовувати дані

прилади у складних промислових умовах і призвело до широкого розповсюдження цієї серії приладів. Зараз з цим на об'єктах газової промисловості експлуатується достатньо широкий спектр вологомірів, однак як і раніше не всі з них можуть забезпечити проведення вимірювань з достатньою надійністю та точністю.

Протягом експлуатації приладів, що базуються на різних методах, було зібрано достатньо даних для проведення аналізу працездатності різних приладів і створення висновків про потребу використання кожного з методів визначення вмісту вологи в природному газі на різних об'єктах газової промисловості України. Також випробовувалися та використовувалися на виробництвах прилади, де первинним принципом виділення сигналу або інформації є фізичний процес вибіркового поглинання складових, що входять в склад природних газів твердою або рідкою речовиною чутливого елементу первинного перетворювача. Прикладом таких вологомірів є «Аметек-5000». Він використовувався на УМГ «Львівтрансгаз», ПСГ «Ходовичі» та КС «Ковель». У результаті було відзначено, що цей прилад стабільно занижував значення вимірної температури точки роси на 8°C та реагував на зміну вологовмісту синхронно з контрольним засобом вимірювання. Основною складовою сорбційних приладів є чутливі елементи, у яких використовуються принцип сорбції. У залежності від кількості вологи в досліджуваному газі, який пропускають через робочу камеру приладу, були помічені зміни характеристики чутливого елементу. У результаті аналізу дії таких вологомірів було визначено наступні недоліки:

- прилади вимірюють об'ємну або масову кількість вологи в газах, однак для визначення умов існування однофазної системи цікавить не кількість вологи у газі, а температура точки роси вологи, що визначає певні температурні границі, за якими здійснюється однофазний рух газу газотранспортною системою при певному тиску;

- зазвичай, дані прилади вимірювання вологи експлуатуються за умов невеликих значень надлишкового тиску газу, що досліджується (до $0,5\text{ кг/см}^2$), а це зумовлює необхідність його редукування, тобто пониження тиску газу, який досліджується перед його безпосередньою подачею до вимірної камери приладу;

- сорбційні прилади, зазвичай, вимірюють вміст тільки одного компонента в досліджуваному газі (вуглеводні, вологість, спирти тощо);

– при роботі в середовищі природного газу чутливий елемент датчика може у певних випадках з часом вкриватися плівкою технологічних домішок (ДЕГи, важкі вуглеводні, метанол), які у більшості випадків є наявними в природному газі. Протягом роботи чутливість первинного датчика приладу може бути змінена на невизначене значення. На разі масового використання набули вологоміри, що використовують конденсаційний метод вимірювання. Використання приладів, з конденсаційним методом, було зумовлено їх більшою здатністю визначати параметри вологості природного газу в умовах промисловості. Саме ці прилади надають змогу визначати температуру точки роси вологи, а конкретно такий параметр насамперед необхідний для визначення транспортної конденсаційності природного газу. Вологоміри конденсаційного методу, крім експлуатаційних та конструктивних переваг мають основну перевагу – дають можливість виконати пряме вимірювання параметру вологості газу, який можна застосовувати без додаткових розрахунків, таким чином позбавлятися методичної складової загальної похибки отриманих результатів. Також застосування конденсаційного методу суттєво дозволяє визначати температуру точки роси кількох компонентів природного газу (важких вуглеводнів, вологи) одночасно і визначати температуру початку утворення газових гідратів [86]. Вологоміри, що базуються на конденсаційному методі, є найвдалішими для його використання в умовах промислу, за потреби визначення параметрів вологості природного газу.

1.7 Аналіз способів визначення температур точки роси вологи та гідратуутворення в середовищі природного газу

Принцип роботи гігрометрів, які реалізують конденсаційний метод вимірювання. Але з моменту набуття чинності цим нормативним документом і дотепер кількість відомих методів визначення вмісту вологи в природному газі та їх модифікацій значно збільшилась. Так, конденсаційний метод, наведений в документі, представлений у динамічному режимі його реалізації. Згодом були розроблені прилади, які реалізували цей метод і в статичному режимі. Подібна реалізація конденсаційного методу здалася вельми вдалою, що підтвердилося в результаті багаторічної експлуатації таких приладів в промислових умовах. Як видно з назви режимів різниця в їх реалізації полягає у способі змінення температури конденсаційної поверхні або створення її відповідного температурного режиму. При реалізації конденсаційного методу в динамічному

режимі температура конденсаційної поверхні змінюється в часі і процес вимірювання можна зобразити відповідною діаграмою (рис. 1. 2).

Процес вимірювання починається з очищення конденсаційної поверхні (етап I) від можливої наявності компонентів досліджуваного газу, що сконденсувалися. Очищення конденсаційної поверхні здійснюється шляхом її нагрівання до температури 30-60 °С (точка 1).

Прогрів триває 1÷3 хвилини, після чого автоматично фіксується поточний рівень фотосигналу (точка 1) і приймається за умовно нульовий. Після цього розпочинається процес охолодження конденсаційної поверхні (етап II). Охолодження здійснюється з певною швидкістю, яка для різних режимів проведення вимірювань може становити 1÷50 °С/хв. При досягненні температури конденсаційної поверхні значення, яке відповідає температурі в точці 2, розпочинається процес конденсації вологи присутньої в газі, що досліджується.

Поява на конденсаційній поверхні вільної вологи (вологи в крапельному вигляді) зменшує відбиттеву спроможність, що призводить до зменшення рівня фотосигналу відбитого від конденсаційної поверхні. При зниженні відбиттевої спроможності зменшується електричний сигнал на виході приймача випромінювання. Таким чином, якщо аналізувати динаміку та рівень змінення рівня електричного сигналу на виході приймача випромінювання [14], є можливість з високою долею ймовірності визначати момент початку конденсації вологи. При досягненні значення рівня сигналу, яке відповідає значенню в точці 2, фіксують температуру конденсаційної поверхні, що відповідає температурі початку конденсації.

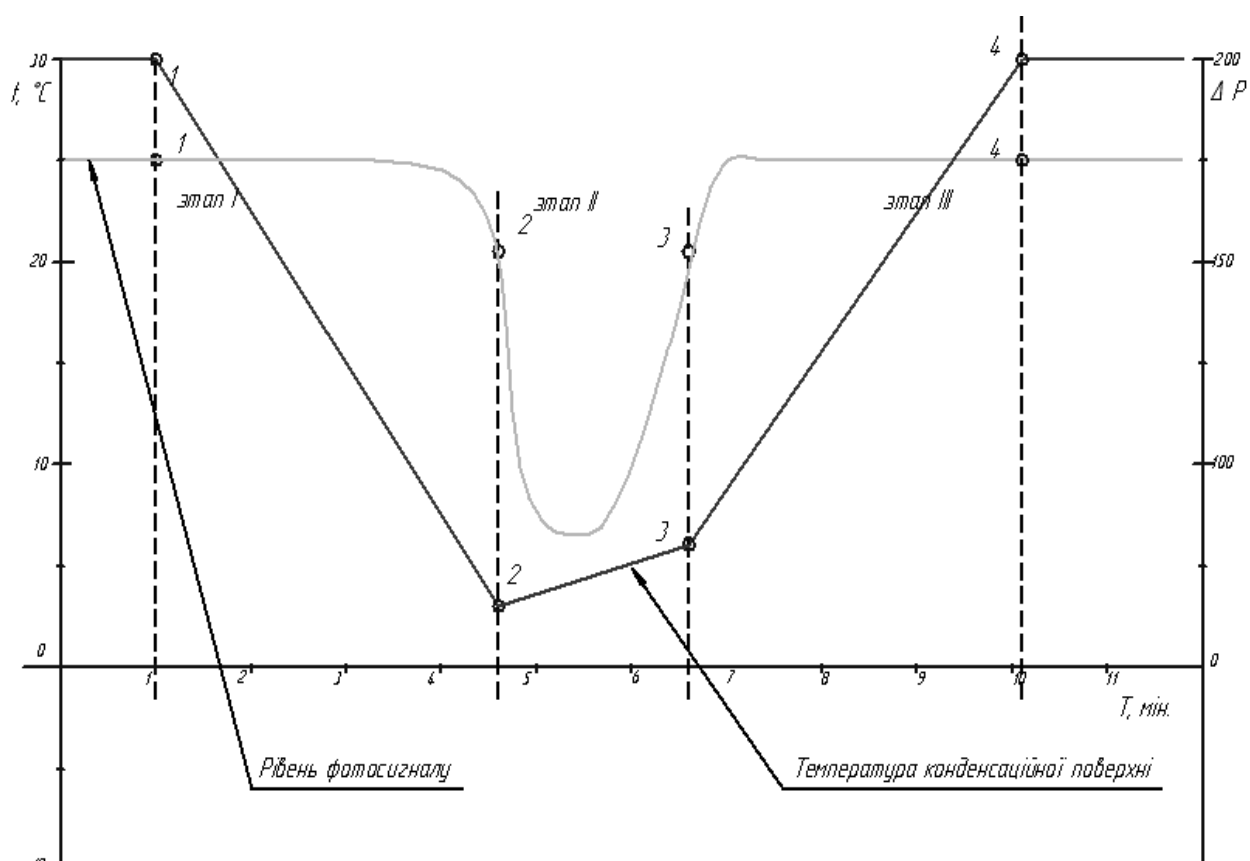


Рис. 1.2– Загальна діаграма реалізації конденсаційного методу в динамічному режимі

Після того, як присутня в газі волога була сконденсована та визначена відповідна температура, розпочинається процес нагрівання конденсаційної поверхні з метою визначення температури випаровування. Температура конденсаційної поверхні починає збільшуватись, при цьому починає випаровуватись волога, про що свідчить збільшення рівня електричного сигналу на виході приймача випромінювання (точка 3). При випаровуванні сконденсованої вологи також фіксують відповідну температуру конденсаційної поверхні (точка 3). Після того, як випаровування закінчилося, процес вимірювання завершується та розраховують відповідне значення температури точки роси, як середнє значення температур початку конденсації та випаровування.

Крім того конденсаційний метод може бути реалізованим у статичному режимі, який відрізняється від наведеного тим, що при проведенні вимірювання в цьому режимі створений на конденсаційній поверхні температурний режим є

постійним в часі і має розподілене значення температури по її довжині (градієнт температур). Процес проведення вимірювання при використанні конденсаційного методу в статичному режимі можна проілюструвати діаграмою (рис. 1.3).

Методика проведення вимірювання полягає в пропусканні газу, що досліджується, вздовж конденсаційної поверхні в напрямку зниження її температури. При контакті з конденсаційною поверхнею в процесі руху поверхневий шар газу поступово охолоджується і набуває температури конденсаційної поверхні. При перетині межі конденсаційної поверхні з температурою, яка дорівнює або нижча за температуру рівноважного стану пари вологи присутньої в газі, розпочинається процес її конденсації. При подальшому русі газу вздовж конденсаційної поверхні в бік більш низьких температур процес конденсації вологи продовжується.

Таким чином, з часом на конденсаційній поверхні утворюються дві зони – “чиста” конденсаційна поверхня та поверхня, яка містить на своїй поверхні сконденсовану вологу. Межа між цими зонами відповідає межі рівноважного стану пари вологи. Завдяки тому, що розподілення температури вздовж конденсаційної поверхні є постійним у часі, положення межі конденсації також залишається постійним. З огляду на те, що температура кожної точки конденсаційної поверхні може бути визначена, існує можливість визначити температуру межі конденсації, яка і є температурою точки роси. При цьому, на відміну від попереднього прикладу реалізації конденсаційного методу, визначають одну температуру, яка і є температурою одночасної конденсації та випаровування.

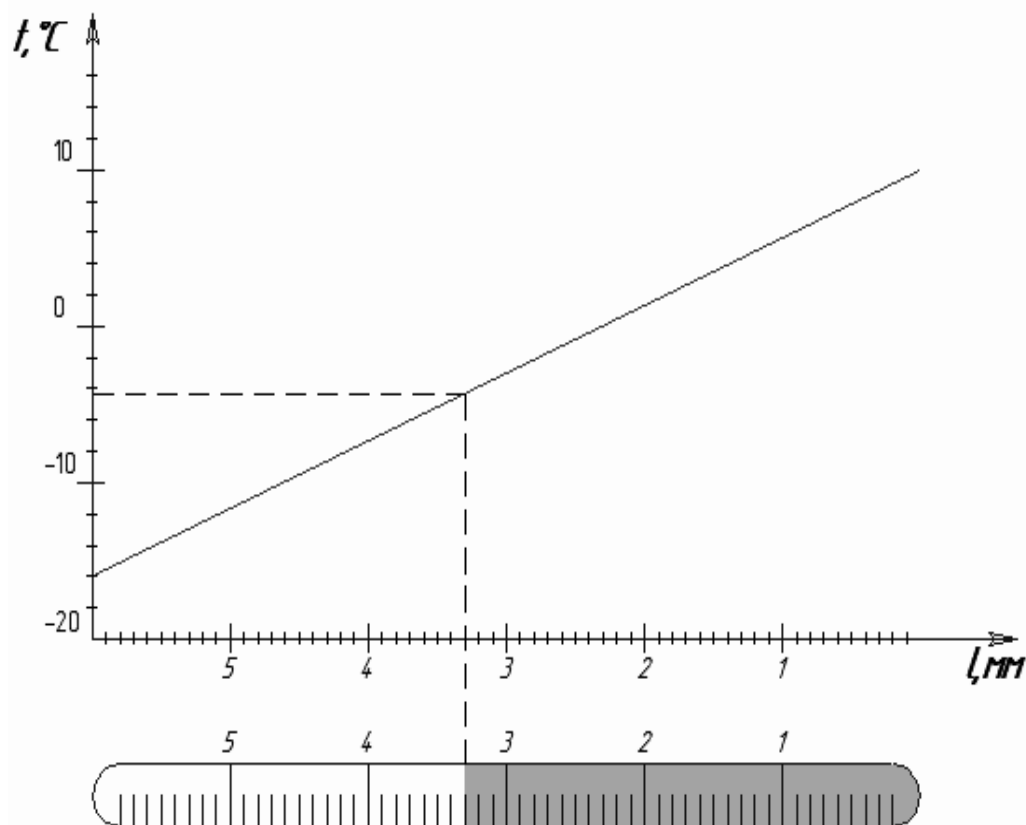


Рисунок 1.3 – Діаграма реалізації конденсаційного методу в статичному режимі

Переваги даної реалізації конденсаційного методу полягають в тому, що він надає можливість проведення вимірювань температури точки роси газу, що має значну кількість компонентів з різними температурами конденсації, і визначення в процесі одного циклу вимірювання одночасно температури точок роси декількох компонентів газу. В цьому разі на конденсаційній поверхні спостерігають декілька зон і відповідно меж конденсації для різних компонентів.

Основним недоліком реалізації конденсаційного методу в статичному режимі є майже неможливість автоматизації процесу вимірювання. На відміну від реалізації конденсаційного методу в статичному режимі його реалізація в динамічному режимі надає значні переваги та можливості автоматизації процесу вимірювання, а відповідно і можливість інтегрування засобів вимірювання до більш складних систем вимірювання та автоматичних систем керування технологічними процесами, а також дозволяє проводити вимірювання у безперервному (потоківому) режимі.

Однак вимірювачі, що реалізують конденсаційний метод у динамічному режимі, які були створені дотепер і проходили випробування та експлуатацію в промислових умовах, мають кілька суттєвих недоліків. Так при їх експлуатації виникають труднощі при роботі з використанням як досліджуваного газу природного газу з достатньо великим вмістом у його складі домішок різної природи та необхідність визначення температур точок роси декількох компонентів природного газу та їх агрегатного стану.

Незначна кількість зразків вимірювачів, що реалізують конденсаційний метод вимірювання, дотримує методики проведення вимірювань, викладених в ГОСТ 20060-83, що призводить до виникнення додаткових складових похибки вимірювань. Але при дотриманні стандартної методики реалізація конденсаційного методу в динамічному режимі залишається однією з найбільш придатних на практиці.

Не дивлячись на те, що конденсаційний метод є найбільш придатним для вимірювання температури точки роси компонентів природного газу, існують деякі труднощі при проведенні визначення параметрів вмісту вологи природного газу в промислових умовах. Як вже було зазначено, велика кількість об'єктів газової галузі обумовлює достатню різноманітність специфічних термодинамічних умов та компонентного складу природного газу, який, крім того, може містити різної природи домішки в значній кількості, що обумовлює різноманітність вимог до гігрометрів на основі конденсаційного методу.

За принципом дії розрізняють гігрометри безперервної (поточні) та періодичної дії. Якщо порівняти роботу гігрометрів безперервної та періодичної дії, можна відмітити, що безперервний спосіб вимірювання параметрів вологості природного газу забезпечує більш високу точність вимірювання, меншу інерційність, але має меншу перешкодозахищеність за рахунок більшого терміну контактування елементів його конденсаційного вузлу з газом, що досліджується. При тривалому контакті з природним газом на конденсаційній поверхні можуть з'являтися перешкоди у вигляді механічних домішок або компонентів природного газу, температура випаровування яких вища за максимальну температуру конденсаційної поверхні. Таким чином, чутливість оптичної системи з часом може знижуватись і тим самим вносити додаткову похибку до результату вимірювання. Прогнозувати момент часу, коли накопичення сторонніх речовин на конденсаційній поверхні досягне рівня, при якому виникне додаткова похибка, майже неможливо. З огляду на це, прилади

безперервної дії з використанням оптичних методів фіксації є недосконалими і такими, що потребують періодичного обслуговування (чищення поверхні).

Гігрометри періодичної дії при роботі із “забрудненими” газами мають ту перевагу, що в кожному циклі можна оцінити якість підготовки конденсаційної поверхні до процесу вимірювання, та при необхідності провести її механічне очищення.

Конденсаційно-термометричний метод вимірювання є одним з основних, що використовують на виробництві для контролю параметрів вологості природного газу (або інших газів), в тому числі в умовах високих тисків та від’ємних значень температури.

У гігрометрах, дія яких заснована на конденсаційно-термометричному методі, при проведенні вимірювання визначається температура, до якої необхідно охолодити природний газ, що контактує з конденсаційною поверхнею, для того щоб довести його до стану насичення вологою при незмінному тиску у вимірювальній камері. Незалежно від конструктивної реалізації гігрометрів, що використовують конденсаційно-термометричний метод вимірювання, до їх складу входять три основних системи, які використовуються для:

- охолодження газу, що аналізується;
- вимірювання температури газу;
- та ідентифікації процесу конденсації.

В більшості випадків охолодження газу здійснюється через контактування його з охолоджуваним тілом. Як правило, потік газу, що аналізується, спрямовують вздовж охолоджуваного тіла, таким чином забезпечуючи охолодження шару газу, який безпосередньо контактує з його поверхнею, що має достатньо великий коефіцієнт теплопровідності та розвинуту площу. При досягненні газом рівноважної температури волога, яка міститься в ньому, конденсується на поверхні охолоджуваного тіла, тому цю поверхню називають конденсаційною. В основному для охолодження конденсаційної поверхні можуть використовуватись ефект розширення газу за дроселем (ефект Джоуля-Томсона), випаровування рідких речовин з низькою температурою кипіння (ефіри, зріджені газы), вихровий ефект (трубка Ранка) та зворотній термоелектричний ефект (ефект Пельтьє).

Залежно від способу використання та необхідності досягнення визначених температур та їх розподілення на конденсаційній поверхні використовують окремі методи охолодження. Кожен з використаних методів охолодження має

свої недоліки та переваги, для визначення яких розглянемо кожен з них докладніше.

Використання ефекту Джоуля-Томсона [8] забезпечує зниження температури конденсаційної поверхні на значення $0,3 \div 0,4$ °С при зниженні тиску газу на кожний 1 кг/см^2 . Цей ефект набув використання в приладах, які використовують для визначення температури точки роси газів при високих тисках, наприклад до 200 кг/см^2 (Харьков-5). Недоліки використання зазначеного методу охолодження полягають у досить складній автоматизації процесу охолодження, значній витраті стисненого газу та складності керування процесом охолодження в ручному режимі. Переваги полягають у відсутності необхідності використання додаткового обладнання та енергії для проведення вимірювань.

Зниження температури конденсаційної поверхні через випаровування рідких речовин з низькою температурою кипіння може забезпечити охолодження конденсаційної поверхні до температур, які майже відповідають температурі кипіння обраної речовини. Так, наприклад, при використанні зрідженої суміші пропану та бутану можна досягти температури конденсаційної поверхні до мінус 35°C , а при використанні зрідженої вуглекислоти – до мінус 55°C . Такий спосіб охолодження використовується при проведенні вимірювань приладами типу “Chandler” та “Харьков-2Д”. Як і в попередньому прикладі основним недоліком використання цього методу охолодження конденсаційної поверхні є складність автоматичної реалізації процесу охолодження і складність керування в ручному режимі, крім того, необхідність використання окремої системи зберігання та підведення до пристрою рідкої фази відповідної речовини. Переваги полягають у можливості досягнення досить низьких значень температури конденсаційної поверхні та, відповідно, проведення вимірювань у широкому температурному діапазоні, та непотрібності додаткового обладнання та джерел енергії для проведення вимірювань.

Застосування пристроїв, що використовують вихровий ефект, може забезпечити утворення температур конденсаційної поверхні в діапазоні від мінус 40 до 30 °С. Але від попереднього способу змінення температури конденсаційної поверхні цей спосіб відрізняється тим, що діапазон змінення температур залежить від вихідної температури та тиску газу, який використовується в якості робочого тіла. Перевагами його застосування є можливість змінення температури конденсаційної поверхні як в бік негативних, так і позитивних значень температури, фіксація на тривалий час температури

конденсаційної поверхні та створення на конденсаційній поверхні окремих ділянок з необхідними значеннями температури. Основні недоліки використання такого способу змінення температури конденсаційної поверхні полягають у практично неможливості автоматизації процесу змінення температур та занадто значних витратах газу, який використовується як робоче тіло.

Найбільш зручним методом змінення температури конденсаційної поверхні, який набув широкого використання останнім часом, є метод заснований на зворотному термоелектричному ефекті. При використанні пристроїв, робота яких заснована на зворотному термоелектричному ефекті, є можливість отримати перепад температур між його “гарячим” та “холодним” спаями до 110°C (без урахування теплового навантаження). Широкого поширення цей метод створення температур конденсаційної поверхні набув завдяки наявності значних переваг порівняно з раніше наведеними способами, а саме: можливість створення температур конденсаційної поверхні в широкому розкиді температур в негативному та позитивному діапазонах, а також можливість створення достатньо стабільних в часі значень температур конденсаційної поверхні, значення яких є пропорційними значенням електричного струму, що споживається пристроєм. Наявні переваги надають змогу повністю автоматизувати процес створення температур конденсаційної поверхні, що дає змогу інтегрувати вимірювальні пристрої з використанням цього методу змінення температур конденсаційної поверхні в автоматизовані системи керування та системи вимірювання різного рівня. Недоліком використання зазначених пристроїв є те, що нижнє значення температур конденсаційної поверхні обмежене максимально можливим перепадом температур між спаями, тобто воно обмежене та побічно залежить від температури середовища, що оточує “гарячий” спай.

Всі перелічені способи створення температур конденсаційної поверхні знайшли своє використання у складі вимірювачів конденсаційного типу і кожен з них має свої переваги та недоліки, які дають можливість їх використання у складі тієї чи іншої вимірювальної системи. Однак, не дивлячись на недоліки що існують, найбільш оптимальним наразі є використання пристроїв, які реалізують зворотний термоелектричний ефект.

При застосуванні засобів вимірювання, які реалізують конденсаційний метод вимірювання, газ, що аналізується, подають до вимірювальної камери вимірювача та спрямовують до конденсаційної поверхні. В результаті

безпосереднього контакту газу, що досліджується, з конденсаційною поверхнею найближчий до поверхні шар газу набуває її температури. Конструкції конденсаційних вузлів вимірювачів цього типу розробляються із розрахунку, що в процесі вимірювання температура газу, що досліджується, має збігатися з температурою конденсаційної поверхні з мінімальною різницею. Таким чином, отримують можливість визначення температури газу, що досліджується, при якій пара вологи, що міститься в газі, досягне стану насичення та почнеться її конденсація. Для визначення температури конденсаційної поверхні залежно від конструктивного виконання елементів конденсаційного вузлу використовують скляні термометри, термопари, терморезистори та інші малогабаритні перетворювачі температури, які іноді і самі використовують в ролі конденсаційної поверхні.

З огляду на те, що в будь-якому разі температура конденсаційної поверхні буде нижчою за температуру газу, конденсація (кристалізація) вологи буде відбуватися на конденсаційній поверхні. Недоліки створених на сьогодні вимірювачів полягають в існуванні значної різниці вимірної температури та температури газу, що аналізується, який контактує з конденсаційною поверхнею, а якщо взяти до уваги, що в деяких випадках змінення температури здійснюється зі значною швидкістю, ця різниця може становити достатньо великі значення, і в таких випадках значно підвищується похибка вимірювання.

В системах спостереження за станом конденсаційної поверхні та визначення моменту початку конденсації на ній компонентів газу, що досліджується, використовують доволі різноманітні методи, та як наслідок, конструктивне виконання їх різниться. Як правило, від методу фіксації моменту початку конденсації залежить конструктивне виконання конденсаційної поверхні. Фіксація моменту початку конденсації може здійснюватись такими способами: оптичним (візуально або за допомогою фотоелектричних пристроїв), дієлькометричним (вимірювання електричної ємності між електродами на ізоляційному покритті конденсаційної поверхні), кондуктометричним (вимірювання електричного опору між електродами на ізоляційному покритті конденсаційної поверхні), радіоактивним (фіксація моменту змінення характеру розсіювання пучка радіоактивних часток конденсаційною поверхнею при появі на ній вологи) та ін. З огляду на те, що існує принципова можливість сконденсувати будь-який компонент природного газу, головним завданням системи спостереження за станом конденсаційної поверхні є не лише визначення моменту початку конденсації, а й однозначна

ідентифікація компоненту, що конденсується. В переважній більшості випадків переважним є однозначна ідентифікація процесу конденсації виключно вологи. Фізичні властивості вологи (діелектрична проникливість, електричний опір, коефіцієнт заломлення, в'язкість, густина та інші) відрізняються від властивостей, які притаманні іншим компонентам природного газу. Якщо спиратись на наявність цих відмінностей, то доцільно створювати той чи інший метод ідентифікації процесу конденсації саме вологи. Існує значна кількість методів ідентифікації процесу конденсації вологи з огляду на кількість її фізичних властивостей, які різняться з фізичними властивостями інших компонентів природного газу, і відповідно створено багато типів приладів, що використовують ці методи. Одним з методів, який набув широкого використання на виробництві, є оптичний метод ідентифікації процесу конденсації вологи, який використовується при візуальному спостереженні і при використанні фотоелектричних пристроїв. Візуальна фіксація не розглядається внаслідок неможливості при цьому автоматизації процесу вимірювання.

Сучасні зразки вимірювачів, які експлуатуються в промисловості, в переважній більшості випадків використовують оптичний метод фіксації моменту початку конденсації з використанням фотоелектричних пристроїв та плоскої конденсаційної поверхні. Однак цей метод ідентифікації процесу конденсації має достатню кількість вад при роботі з використанням як досліджуваного природного газу. Якщо проаналізувати багаторічний досвід експлуатації подібних зразків вимірювальної техніки, можна узагальнити притаманні їм недоліки, до яких віднесено:

- вплив руху досліджуваного газу над конденсаційною поверхнею на змінення інтенсивності випромінювання оптичних пристроїв;
- накопичення домішок на плоскій конденсаційній поверхні та створення цим перешкод для процесу конденсації вологи або ідентифікації процесу її конденсації;
- нечітка реакція оптичних пристроїв на процес конденсації технологічних домішок або компонентів вуглеводневого ряду;
- наявність різниці температур між пристроєм її вимірювання та зоною контакту газу, що досліджується, з конденсаційною поверхнею (різна температура в шарах газу);
- залежність відповідності фіксації моменту конденсації вологи від фізичного стану конденсаційної поверхні.

За наведеними даними можна висунути вимоги для створення пристрою вимірювання температури точки роси природного газу з наявністю в його складі значної кількості домішок. Основним завданням є вибір тієї фізичної властивості вологи або сукупності властивостей, які б відрізнялись від фізичних властивостей інших компонентів, що можуть бути присутніми в складі природного газу, і дозволили б однозначно її ідентифікувати в достатньому діапазоні термодинамічних умов. Якщо прийняти за такі властивості в'язкість та густину вологи, то очевидно (рис. 1.4, 1.5), що їх комбінація для вологи значно відрізняється від аналогічних властивостей найбільш характерних сполук, що входять до складу природного газу.

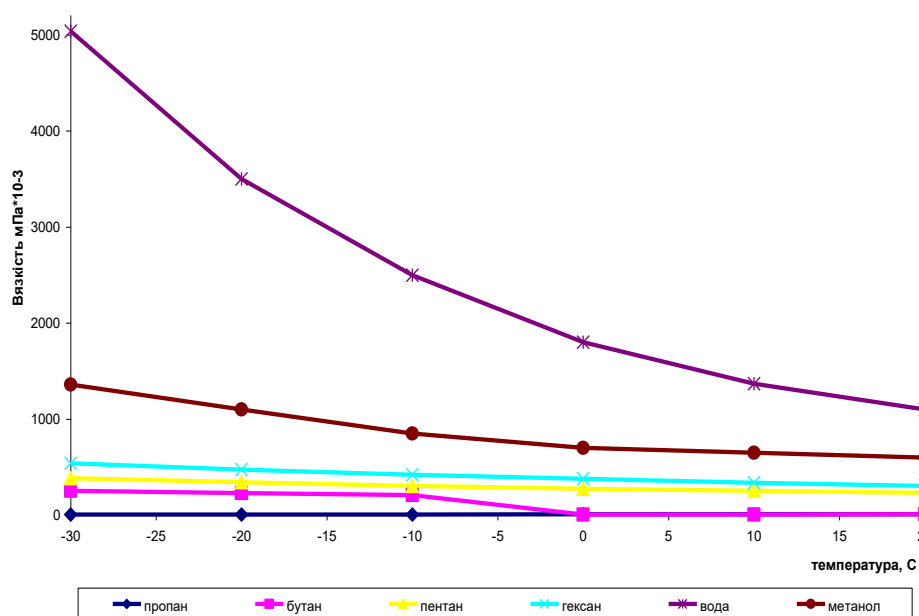


Рисунок 1.4 – Залежність в'язкості найбільш характерних компонентів природного газу від температури

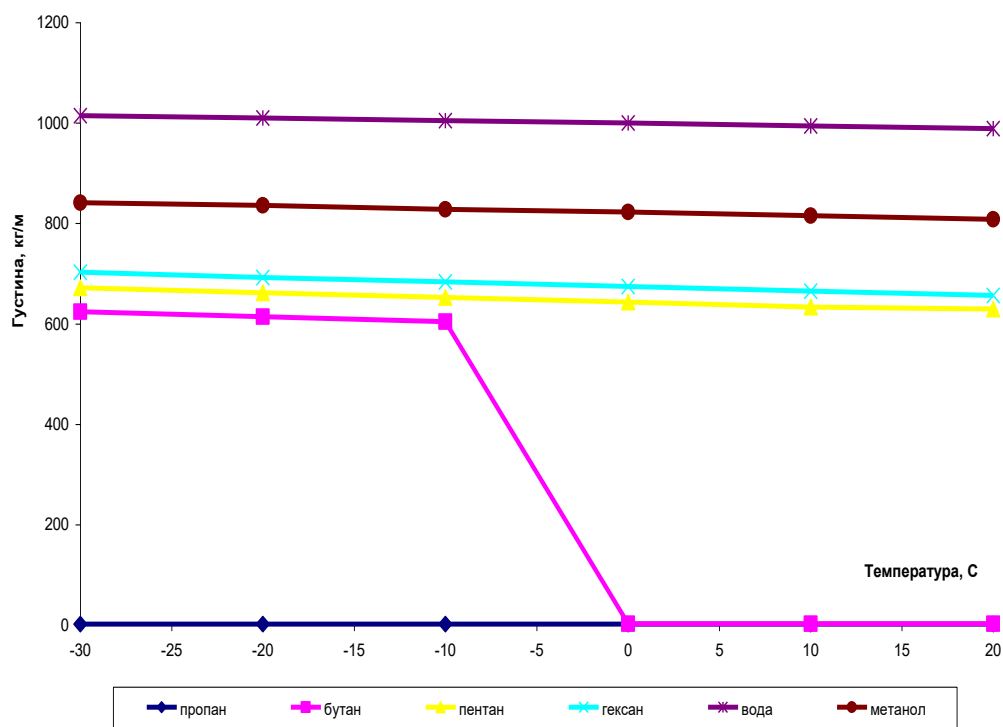


Рисунок 1.5– Залежність густини найбільш характерних компонентів природного газу від температури

Як видно з наведених залежностей, використання ідентифікації процесу конденсації вологи порівняно з вуглеводневими компонентами природного газу за комбінацією густина-в'язкість може виявитися досить вдалим з огляду на те, що значення обраних параметрів для вологи значно відрізняється від обраних властивостей для інших компонентів в великому діапазоні температурних умов.

НВЧ метод вимірювання вологості газу.

Перспективним є НВЧ метод, який полягає в вимірюванні вологості природного газу за методом визначення температури точки роси в умовах високого вмісту парів вищих вуглеводнів. НВЧ вологоміри використовують значну (в десятки разів) відмінність електричних властивостей води та сухого матеріалу. Концентрацію вологи вимірюють з ослаблення НВЧ-випромінювання, що проходить через шар аналізованого матеріалу. Передавальна антена з'єднана з НВЧ генератором, приймальня - з вимірювальним пристроєм. Чим більше вологість аналізованого матеріалу, тим менше сигнал, що потрапляє в вимірювальне обладнання. На плівку конденсату вищих вуглеводнів пристрій практично не реагує.

Даний спосіб дозволяє зменшити похибку визначення температури точки роси в природному газі в присутності парів вищих вуглеводнів в порівнянні з оптичними приладами, що використовуються для цієї мети, в кілька разів. Якщо в газі містяться пари пропану, бутану, пентану і інших вищих вуглеводнів, що мають високі температури конденсації (а в реальних природних газах, як правило, реалізується саме ця ситуація), то при охолодженні дзеркала спочатку будуть випадати конденсати вищих вуглеводнів. Особливо важка ситуація існує на станціях підземного зберігання газу, які засновані на колишніх газоконденсатних родовищах. Навіть новітні конденсаційні прилади працюють там вкрай нестабільно через високий вмісту парів високих вуглеводнів в досліджуваному газі[10].

1.8 Теоретичне обґрунтування методу ідентифікації конденсованих компонентів природного газу на основі методу перепаду тисків

Для забезпечення можливості визначення існування процесу конденсації компонентів природного газу та співставлення їх фізичних властивостей обрано метод перепаду тисків. Даний метод базується на законі Бернуллі, який є наслідком закону збереження енергії для стаціонарного потоку стисненого ідеального газу [133]

$$\frac{v^2}{2} + gh + \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \frac{p}{\rho} = const, \quad (1.1)$$

де $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ - адіабатична постійна газу;

C_p – теплоємність газу за умов постійного тиску;

C_v – теплоємність газу за умов постійного об'єму;

p – тиск газу в точці;

ρ – густина газу в точці;

v – швидкість течії газу;

g – прискорення вільного падіння;

h – висота відносного початку координат.

Константу в правій частині називають повним тиском, яка залежить в загальному вигляді від лінії току. Розмірність всіх доданків — одиниця енергії,

що доводиться на одиницю об'єму. Перший і другий доданок в інтегралі Бернуллі мають сенс кінетичної і потенційної енергії, що доводиться на одиницю об'єму. Слід звернути увагу на те, що третій доданок по своєму походженню є роботою сил тиску і не є запасом якого-небудь спеціального вигляду енергії [135]. Таким чином, можна припустити, що змінення швидкості потоку, яке викликано зміненням площі перерізу потоку, призведе до порушення рівняння та може бути скомпенсованим за допомогою відповідного змінення значення тиску. Крім того розбалансованість наведеного рівняння буде викликано при зміненні густини стисненого газу.

Як наслідок використання рівняння Бернуллі в загальному вигляді розглянуто його використання у вигляді трубки Вентурі, яка застосовується для визначення швидкості течії у трубах за допомогою вимірювання тиску у двох різних точках трубопроводу та, таким чином, допомагає запобігти наслідкам кавітації. Трубка Вентурі поступово звужує діаметр трубопроводу. Такий звужувальний отвір обмежує потік, що зумовлює різницю тисків у точках вимірювання (на початку звуження та у найвужчій частині). Базується дане вимірювання на ефекті Вентурі [12] та встановлює зв'язок змінення тисків та площі взаємодії речовини з поверхнею трубки, формулу для якого можна отримати із рівняння неперервності та закону Бернуллі

$$v_1 S_1 = v_2 S_2, \quad (1.2)$$

де v_1 і v_2 – швидкість руху речовини на початку та в кінці ділянки;
 S_1 і S_2 – площа взаємодії речовини з поверхнею трубки на початку та в кінці ділянки.

$$p_1 - p_2 = \rho \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}, \quad (1.3)$$

$$v_2 = S_1 \sqrt{\frac{2 p_1 - 2 p_2}{\rho S_1^2 - \rho S_2^2}}. \quad (1.4)$$

Таким чином є очевидним наявність зв'язку змінення тисків, на окремих ділянках труби, з площею взаємодії речовини та її густини.

Даний метод застосовують для визначення витрати газу, який проходить крізь звужувальний пристрій постійного діаметру [14], при цьому витрата є

пропорційною перепаду тисків на звужувальному пристрої, при даному застосуванні витрата крім того залежить від густини та в'язкості речовини, що рухається порожниною звужувального пристрою. В роботі вирішується зворотна задача, тобто забезпечується постійна витрата газу крізь звужувальний пристрій і ведеться спостереження за зміненою різницею тисків, яка є пропорційною зміненню діаметру внаслідок наявності у внутрішній порожнині конденсованих компонентів та комбінації їх властивостей густини та в'язкості.

Для попередньої оцінки можливого змінення різниці тисків між входом та виходом звужуючого пристрою використано розрахункову методику. Попередньо розрахуємо змінення різниці тисків внаслідок змінення діаметру вільного перетину звужуючого пристрою при різних значеннях тисків. Розрахунок проведено для таких вихідних даних: L – довжина ділянки газопроводу – 0,01 м; ρ – густина газу – 0,72 кг/м³; Q – об'ємна витрата газу – 0,06 м³/год; λ – коефіцієнт гідравлічного опору – 0,69.

Як видно з результатів попередніх розрахунків показаних на Рисунок 1.6 навіть при незначних змінах діаметру вільного перетину звужуючого пристрою, які можуть бути викликані наявністю сконденсованих компонентів в ньому, різниця тисків між його входом та виходом змінюється в достатньому для інструментальної оцінки діапазоні.

При проведенні попередніх розрахунків для визначення можливості використання значення різниці тисків між входом та виходом звужуючого пристрою для ідентифікації процесу конденсації та кристалізації компонентів природного газу було використано спрощену методику розрахунку. Але наведений метод розрахунку перепаду тиску у вимірювальному газопроводі за умов утворення в його внутрішній порожнині компонентів природного газу з різними значеннями густини та в'язкості є придатним для підтвердження принципової можливості використання його для ідентифікації процесу конденсації або кристалізації компонентів природного газу.

Викладена розрахункова методику є справедливою для умов низьких тисків, що не завжди є достатнім при визначенні температури початку конденсації та кристалізації компонентів природного газу в промислових умовах. На практиці використання зазначеного методу вимірювання температур початку конденсації компонентів природного газу в переважній кількості випадків необхідно проводити за умов середніх та високих тисків. Для уточнення результатів розрахунків обрано подібну методику, яку використовують на практиці для умов середніх та високих тисків, відповідно до

якої, різниця квадратів тисків між входом та виходом звужуючого пристрою становить:

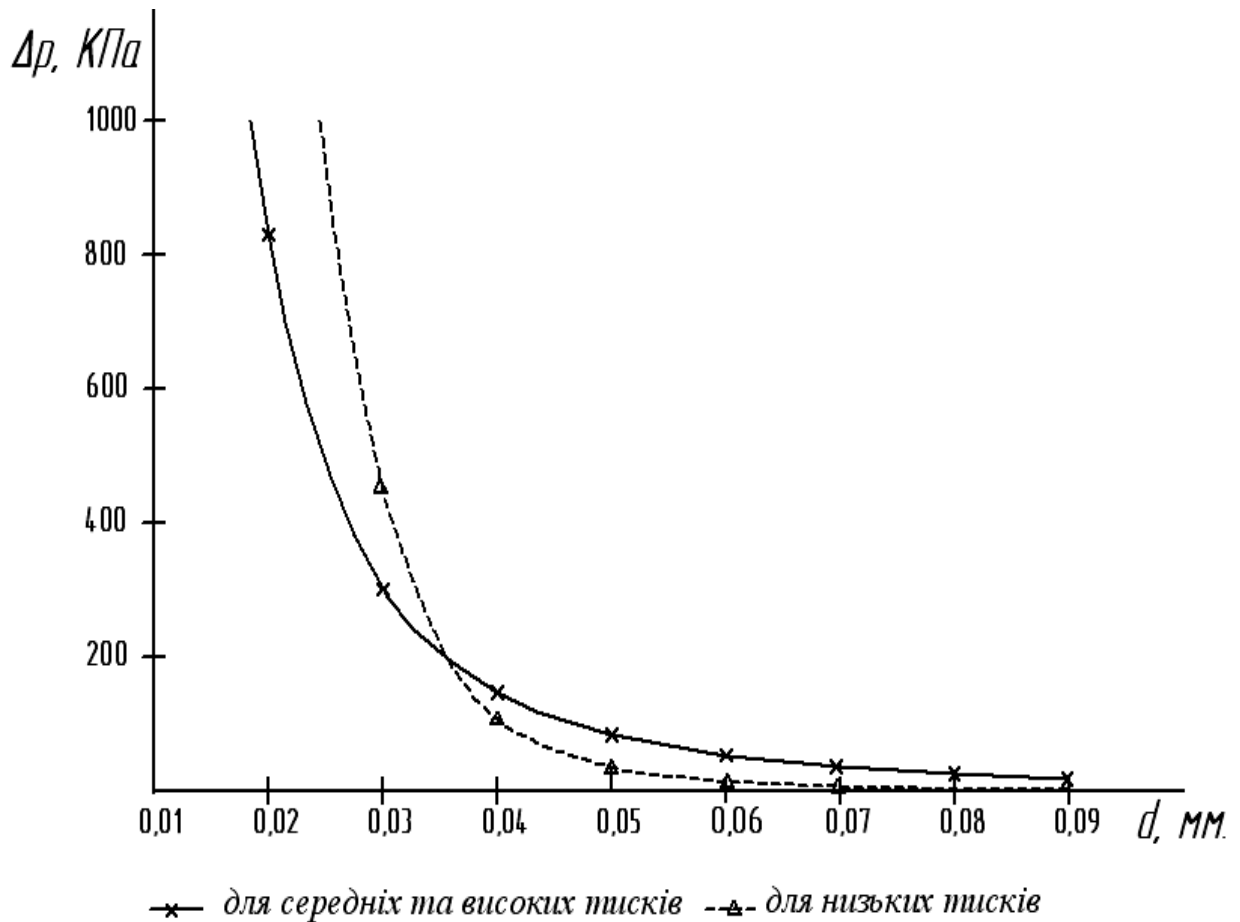


Рисунок 1.6 – Залежність перепаду тиску між входом та виходом звужуючого пристрою від його діаметру

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{P_0}{81 \cdot \pi^2} \cdot \lambda \cdot L \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{d^5} = 1,2687 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda \cdot L \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{d^5}, \quad (1.5)$$

де p_1 – абсолютне значення тиску на початку газопроводу, МПа;

p_2 – абсолютне значення тиску в кінці газопроводу, МПа;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору, який враховує втрати на тертя та залежить від числа Рейнольдса;

L – довжина газопроводу постійного діаметру, м;

d – внутрішній діаметр газопроводу, мм;

ρ – густина газу за нормальних умов, кг/м³;

Q – витрата газу за нормальних умов, м³/ч;

P_0 – тиск за нормальних умов (0,101325 МПа).

На першому етапі проводиться розрахунок числа Рейнольдса, від якого залежить коефіцієнт динамічного опору за формулою

$$Re = 0,0354 \cdot \frac{Q}{\nu \cdot d}, \quad (1.6)$$

де Q – витрата газу за нормальних умов, м³/год ;

d – внутрішній діаметр газопроводу, см;

ν – кінематична в'язкість за нормальних умов, м²/сек.

У цьому випадку розраховане число Рейнольдса для більш характерних компонентів природного газу знаходитиметься в діапазоні: 1200 ÷ 2000. Отримане значення свідчить про ламінарний рух ($Re < 2,3 \cdot 10^3$) природного газу внутрішньою порожниною звужуючого пристрою. Відповідно до [12] при ламінарному русі коефіцієнт гідравлічного опору не залежить від шорсткості поверхні газопроводу та дорівнює $\lambda = 64 / Re$. Вплив вихідної шорсткості внутрішньої поверхні газопроводу на виникнення різниці тисків між його входом та виходом у процесі проведення вимірювань буде або незначним, або взагалі відсутнім. Крім того враховуючи, що вимірювання проводитимуться за умов одного й того самого звужуючого пристрою, шорсткість його внутрішньої порожнини буде становити постійне значення, тому можна рахувати її відсутньою.

Якщо взяти до уваги той факт, що при проведенні визначення температури конденсації вологи, яка міститься в природному газі, за визначених умов може відбуватись конденсація і компонентів природного газу вуглеводневого ряду, то необхідні розрахунки було проведено для певної кількості найбільш характерних компонентів. Для проведення розрахунків обрано фізичні властивості наступних компонентів: метану (СН₄), етану (С₂Н₆), пропану (С₃Н₈), бутану (С₄Н₁₀), пентану (С₅Н₁₂), гексану (С₆Н₁₄) та вологи, як найбільш характерних компонентів, що можуть входити до складу природного газу. Якщо врахувати той факт, що деякі з компонентів вуглеводневого ряду можуть переходити в рідку фазу, для них було розраховано (знайдено) значення густини та в'язкості як для пароподібного так і для рідкого стану, а для вологи ще і твердого стану (крига). Однак слід зазначити і той факт, що при проведенні вимірювань температури початку конденсації вологи не має великого значення

ідентифікації конкретного компонента вуглеводневого ряду, що в промислових умовах, як показує практика, дуже важко зробити.

При проведенні розрахунків [13] були використані стандартні значення параметрів густини та в'язкості для складників вуглеводневого ряду і вологи[16]. Результати розрахунків представлені в таблиці 1.2. Надалі з використанням даних про густину та в'язкість найбільш характерних складників природного газу було розраховано число Рейнольдса та значення різниці тисків між входом та виходом звужуючого пристрою. Конденсаційний метод [15] передбачає необхідність проведення вимірювання у визначеному температурному діапазоні, який набуває досліджуваний газ. Тому розрахунок параметрів індивідуальних компонентів природного газу проводились для температурного діапазону від мінус 30 °С до 20 °С. В більшості випадків, обмеження температури в ньому обумовлено достатністю контролю параметрів конденсації компонентів природного газу в цьому діапазоні для промислових умов.

Для обрання оптимального значення діаметру звужуючого пристрою ці розрахунки були проведені для діапазону діаметрів від 0,1 до 0,4 мм. Цей діапазон було визначено оптимальним з огляду на лінійність залежності перепаду тисків між входом та виходом звужуючого пристрою та достатнього діапазону значень фізичних величин для змоги їх вимірювання [14]. При проведенні розрахунків можливих значень різниці тисків та побудові відповідних графіків було прийнято деякі умовності:

- розрахунки зроблено для умов нормального тиску з огляду на те, що теплофізичні параметри компонентів природного газу, які знаходяться в пароподібному стані, з підвищенням тиску змінюються майже однаково для компонентів вуглеводневого ряду та досить однаково різняться за значенням від тих параметрів компонентів природного газу, що знаходяться в рідкому або твердому стані;

- теплофізичні параметри компонентів природного газу, які знаходяться в рідкому стані, майже не змінюються при підвищенні тиску, крім того, їх змінення відбувається пропорційно;

- змінення термодинамічних умов, зокрема тиску, в обраному діапазоні температур може призводити до фазових переходів компонентів природного газу від газоподібного стану до рідкого, що призведе до змінення лише температур початку утворення рідкої фази відповідного компоненту але майже

не вплине на показники його густини та в'язкості, якщо він знаходиться в рідкому стані.

Таблиця 1.2 Характеристики фізичних властивостей компонентів природного газу

Температура, °C		Фізичні параметри основних компонентів, що входять до складу природного газу																		
		Метан CH ₄		Етан C ₂ H ₆		Пропан C ₃ H ₈		Бутан C ₄ H ₁₀		Пентан C ₅ H ₁₂		Гексан C ₆ H ₁₄		Вода H ₂ O						
		Пароподібний стан		Пароподібний стан		Пароподібний стан		Пароподібний стан		Пароподібний стан		Пароподібний стан		Рідкий стан		Рідкий стан		Твердий стан		
	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	ρ_v кг/м ³	
	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	v_v м ² /с 10 ⁻⁶	
-30	0,81	1,52	5,26	2,208	2,222	2,911	1,12	1,15	3,614	1,16	680	1,58	4,316	1,17	703	2,43	1006	44,9	921,3	207,8
-20	0,77	1,40	5,91	2,121	2,58	2,796	1,73	0,91	3,471	1,57	665	1,21	4,146	1,31	695	1,83	1004	34,2	919,9	148,3
-10	0,75	1,36	6,29	2,040	3,30	2,689	2,18	0,64	3,339	1,71	649	0,91	3,988	1,42	687	1,37	1002	26,2	918,4	50,68
0	0,72	1,34	6,62	1,966	3,77	2,591	2,63	0,48	3,217	1,90	639	0,63	3,842	1,55	676	0,91	1000	1,81	917,1	12,81
10	0,69	1,31	6,95	1,896	4,47	2,499	2,82	0,41	3,103	2,09	631	0,57	3,707	1,68	668	0,68	999,8	1,32		
20	0,67	1,26	7,48	1,832	5,62	2,414	3,04	0,37	2,997	2,41	626	0,48	3,580	1,88	654	0,62	999,7	1,01		

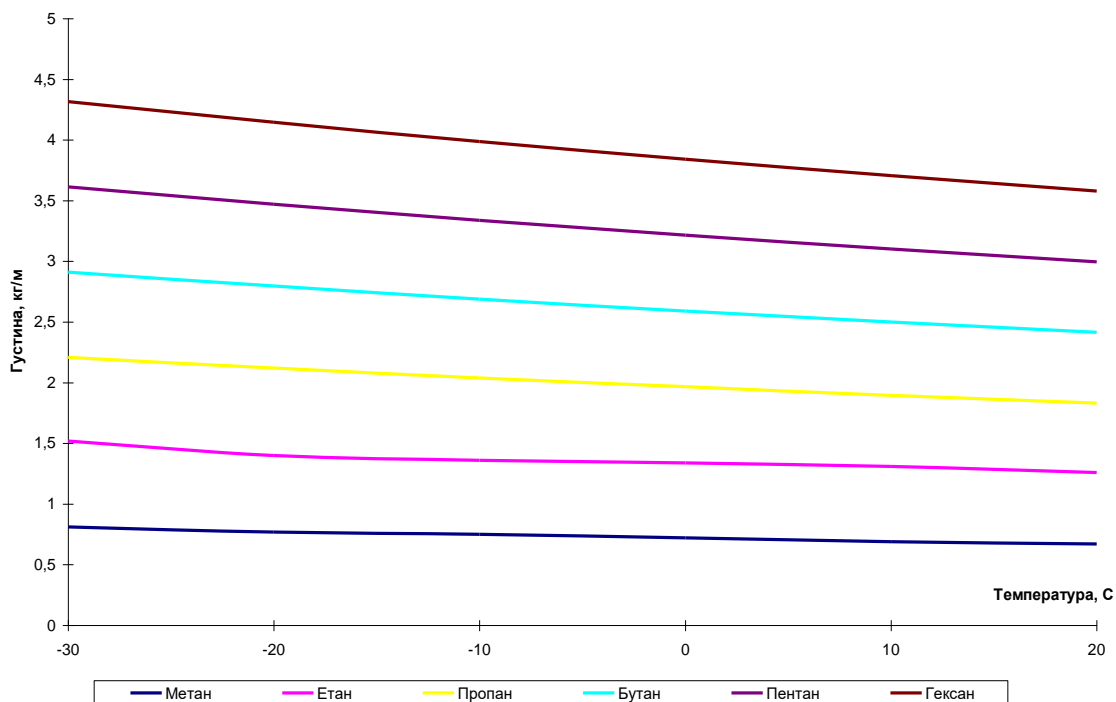


Рисунок 1.7– Графік залежності густини компонентів природного газу, які перебувають у пароподібному стані від температури

Розраховані значення параметрів густини та в'язкості наведено в таблиці Б.1 та відображено на графіках (рис. 1.7–1.10). Розрахунок було зроблено для компонентів, які перебувають у пароподібному стані, але, враховуючи можливість фазових перетворень в напрямку пар \rightarrow рідина, вони були зроблені і для компонентів, які можуть знаходитись в рідкому стані.

Використовуючи отримані дані фізичних параметрів окремих компонентів природного газу, були розраховані дані (табл. 1. 2) про перепад тисків між входом та виходом звужуючого пристрою (рис. 1.11–1.16).

Таблиця 1.2 – Розраховані значення різниці тисків

Температура, °C		Перепад тиску, МПа																				
		Метан CH ₄		Етан C ₂ H ₆		Пропан C ₃ H ₈		Бутан C ₄ H ₁₀		Пентан C ₅ H ₁₂		Гексан C ₆ H ₁₄		Вода H ₂ O								
		Пароподібний стан d, мм	Рідинний стан dP, МПа	Пароподібний стан d, мм	Рідинний стан dP, МПа	Пароподібний стан d, мм	Рідинний стан dP, МПа	Пароподібний стан d, мм	Рідинний стан dP, МПа	Пароподібний стан d, мм	Рідинний стан dP, МПа	Пароподібний стан d, мм	Рідинний стан dP, МПа	Пароподібний стан d, мм	Рідинний стан dP, МПа	Пароподібний стан d, мм	Рідинний стан dP, МПа					
-30	0,1	0,0191	0,1	0,0139	0,1	0,0090	0,1	0,0122	0,1	0,1326	0,1	0,0138	0,1	0,2215	0,1	0,0152	0,1	0,2795	0,1	1,4363	0,1	2,961
-20	0,1	0,0214	0,1	0,0144	0,1	0,0095	0,1	0,0148	0,1	0,1399	0,1	0,0158	0,1	0,1917	0,1	0,0158	0,1	0,410	0,1	1,523	0,1	2,543
-10	0,1	0,0217	0,1	0,0147	0,1	0,0106	0,1	0,0163	0,1	0,1329	0,1	0,0161	0,1	0,1642	0,1	0,0161	0,1	0,2073	0,1	1,0950	0,1	1,462
0	0,1	0,0219	0,1	0,0148	0,1	0,0111	0,1	0,0176	0,1	0,1148	0,1	0,0167	0,1	0,1356	0,1	0,0165	0,1	0,1876	0,1	0,375	0,1	0,735
10	0,1	0,0223	0,1	0,0148	0,1	0,0119	0,1	0,0179	0,1	0,1023	0,1	0,0172	0,1	0,1282	0,1	0,0169	0,1	0,1440	0,1	0,2455	0,1	
20	0,1	0,0225	0,1	0,0151	0,1	0,0131	0,1	0,0183	0,1	0,0983	0,1	0,0181	0,1	0,1171	0,1	0,0175	0,1	0,1361	0,1	0,2147	0,1	
-30	0,2	0,0034	0,2	0,0025	0,2	0,0016	0,2	0,0022	0,2	0,0523	0,2	0,0024	0,2	0,0392	0,2	0,0027	0,2	0,0494	0,2	0,2539	0,2	0,527
-20	0,2	0,0038	0,2	0,0025	0,2	0,0017	0,2	0,0026	0,2	0,0483	0,2	0,0028	0,2	0,0339	0,2	0,0028	0,2	0,0456	0,2	0,2314	0,2	0,441
-10	0,2	0,0038	0,2	0,0026	0,2	0,0019	0,2	0,0029	0,2	0,0235	0,2	0,0029	0,2	0,0290	0,2	0,0028	0,2	0,0367	0,2	0,1956	0,2	0,263
0	0,2	0,0039	0,2	0,0026	0,2	0,0020	0,2	0,0031	0,2	0,0203	0,2	0,0030	0,2	0,0239	0,2	0,0029	0,2	0,0296	0,2	0,0508	0,2	0,138
10	0,2	0,0039	0,2	0,0026	0,2	0,0020	0,2	0,0032	0,2	0,0186	0,2	0,0030	0,2	0,0227	0,2	0,0030	0,2	0,0235	0,2	0,0434	0,2	
20	0,2	0,0040	0,2	0,0027	0,2	0,0023	0,2	0,0032	0,2	0,0174	0,2	0,0032	0,2	0,0207	0,2	0,0031	0,2	0,0241	0,2	0,0379	0,2	
-30	0,3	0,0012	0,3	0,0009	0,3	0,0009	0,3	0,0008	0,3	0,0117	0,3	0,0009	0,3	0,0142	0,3	0,0010	0,3	0,0179	0,3	0,0921	0,3	0,195
-20	0,3	0,0014	0,3	0,0009	0,3	0,0009	0,3	0,0009	0,3	0,0103	0,3	0,0010	0,3	0,0123	0,3	0,0010	0,3	0,0155	0,3	0,0803	0,3	0,162
-10	0,3	0,0014	0,3	0,0009	0,3	0,0009	0,3	0,0010	0,3	0,0086	0,3	0,0010	0,3	0,0105	0,3	0,0010	0,3	0,0133	0,3	0,0702	0,3	0,094
0	0,3	0,0014	0,3	0,0009	0,3	0,0009	0,3	0,0011	0,3	0,0074	0,3	0,0011	0,3	0,0087	0,3	0,0011	0,3	0,0108	0,3	0,0184	0,3	0,047
10	0,3	0,0014	0,3	0,0009	0,3	0,0009	0,3	0,0012	0,3	0,0067	0,3	0,0011	0,3	0,0082	0,3	0,0011	0,3	0,0092	0,3	0,0157	0,3	
20	0,3	0,0014	0,3	0,0010	0,3	0,0010	0,3	0,0012	0,3	0,0063	0,3	0,0011	0,3	0,0075	0,3	0,0011	0,3	0,0087	0,3	0,0138	0,3	
-30	0,4	0,0006	0,4	0,0004	0,4	0,0004	0,4	0,0004	0,4	0,0057	0,4	0,0004	0,4	0,0069	0,4	0,0005	0,4	0,0087	0,4	0,0449	0,4	0,092
-20	0,4	0,0007	0,4	0,0005	0,4	0,0005	0,4	0,0005	0,4	0,0049	0,4	0,0005	0,4	0,0059	0,4	0,0005	0,4	0,0075	0,4	0,0391	0,4	0,078
-10	0,4	0,0007	0,4	0,0005	0,4	0,0005	0,4	0,0005	0,4	0,0042	0,4	0,0005	0,4	0,0051	0,4	0,0005	0,4	0,0065	0,4	0,0342	0,4	0,046
0	0,4	0,0007	0,4	0,0005	0,4	0,0005	0,4	0,0006	0,4	0,0036	0,4	0,0005	0,4	0,0042	0,4	0,0005	0,4	0,0052	0,4	0,0289	0,4	0,023
10	0,4	0,0007	0,4	0,0005	0,4	0,0005	0,4	0,0006	0,4	0,0033	0,4	0,0005	0,4	0,0040	0,4	0,0005	0,4	0,0045	0,4	0,0077	0,4	
20	0,4	0,0007	0,4	0,0005	0,4	0,0005	0,4	0,0006	0,4	0,0031	0,4	0,0006	0,4	0,0037	0,4	0,0006	0,4	0,0043	0,4	0,0067	0,4	

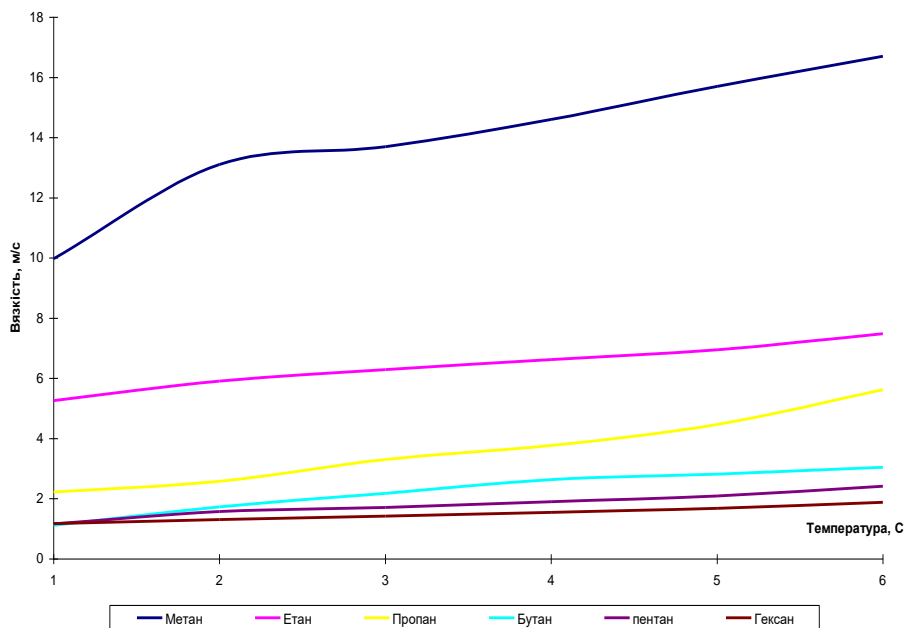


Рисунок 1.8 – Графік залежності кінематичної в'язкості компонентів природного газу, які перебувають у пароподібному стані від температури

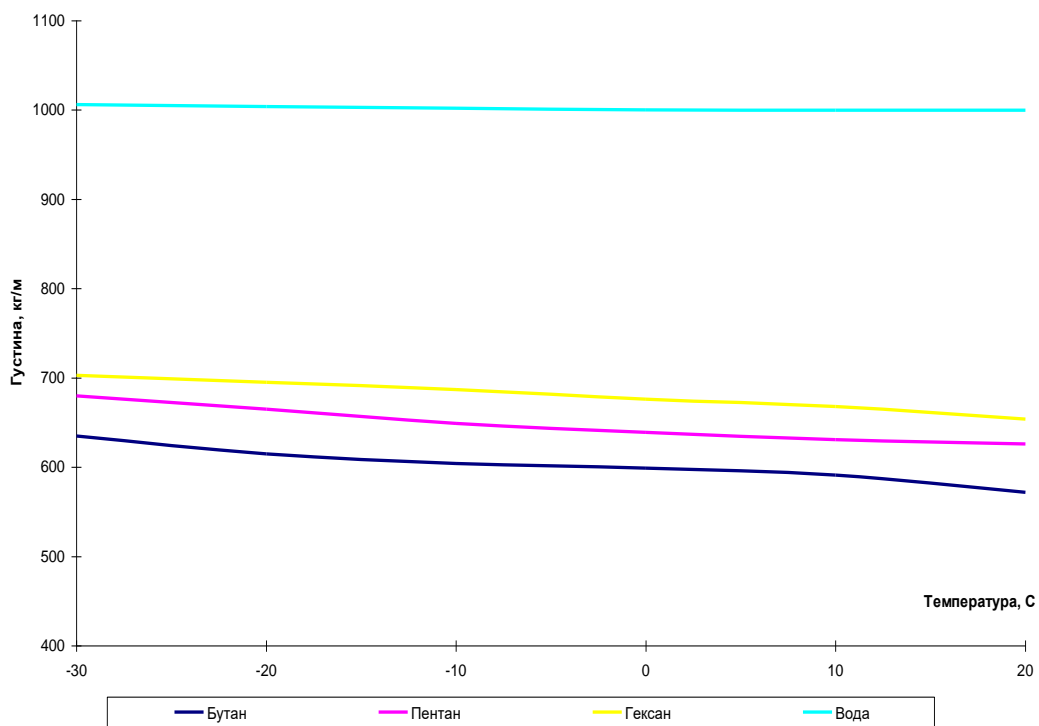


Рисунок 1.9 – Графік залежності густини компонентів природного газу, які можуть перебувати у рідкому стані від температури

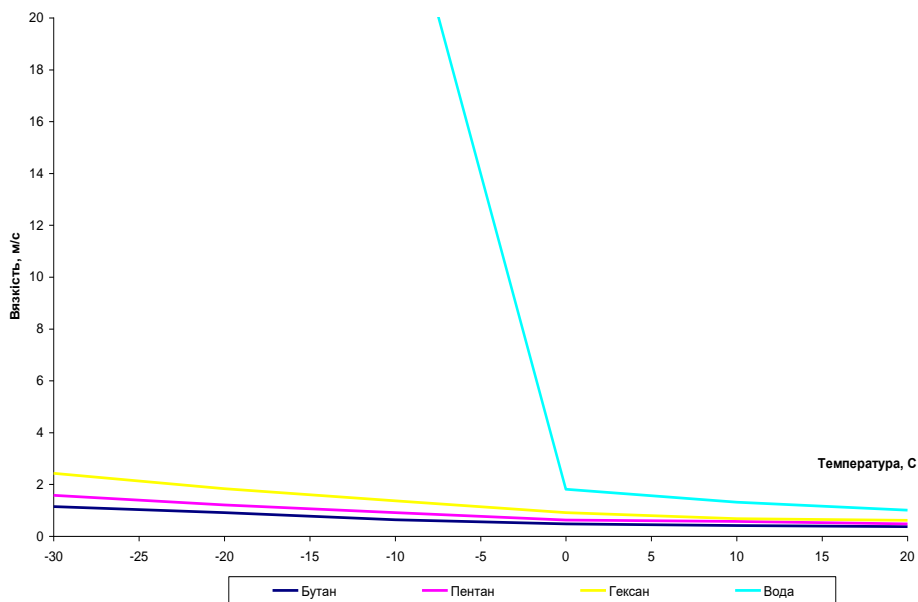


Рисунок 1.10 – Графік залежності кінематичної в'язкості компонентів природного газу, які можуть перебувають в рідкому стані від температури

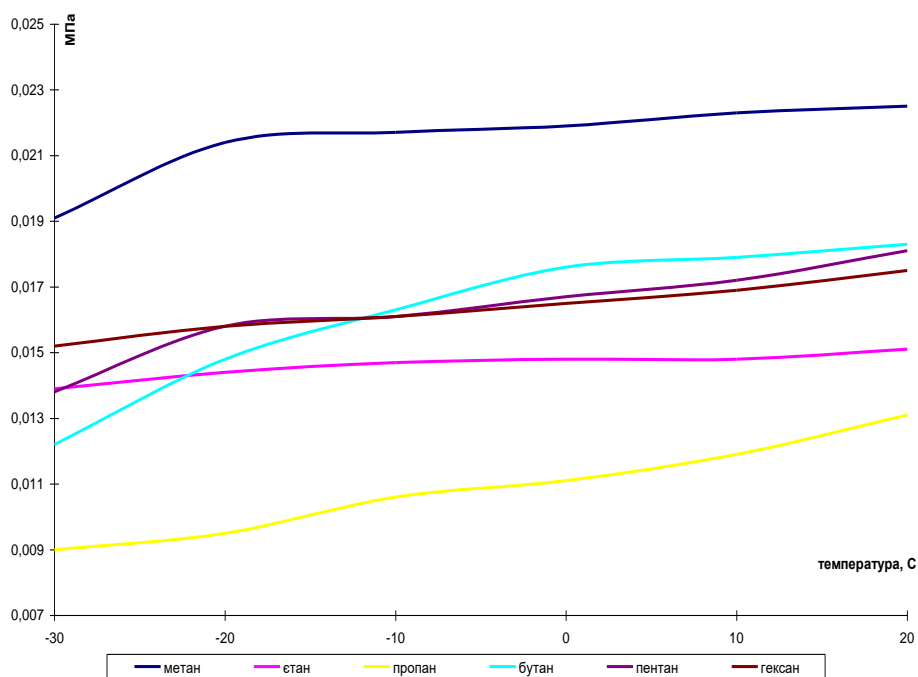


Рисунок 1.11 – Залежність перепаду тиску між входом та виходом звужуючого пристрою діаметром 0,1 мм. при русі його внутрішньою порожниною компонентів природного газу в пароподібному стані від температури

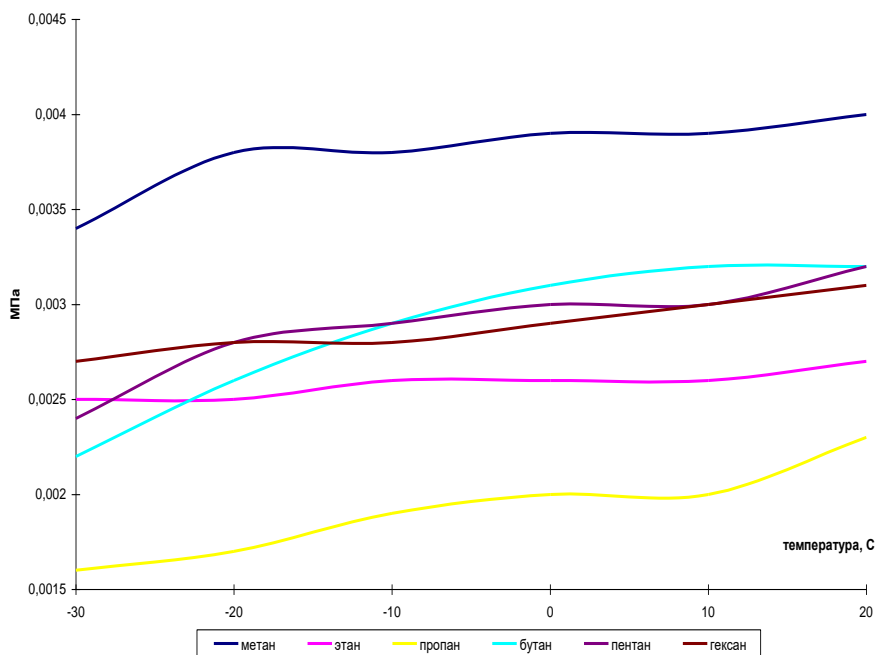


Рисунок 1.12 – Залежність перепаду тиску між входом та виходом звужуючого пристрою діаметром 0,2 мм. при русі його внутрішньою порожниною компонентів природного газу в пароподібному стані від температури

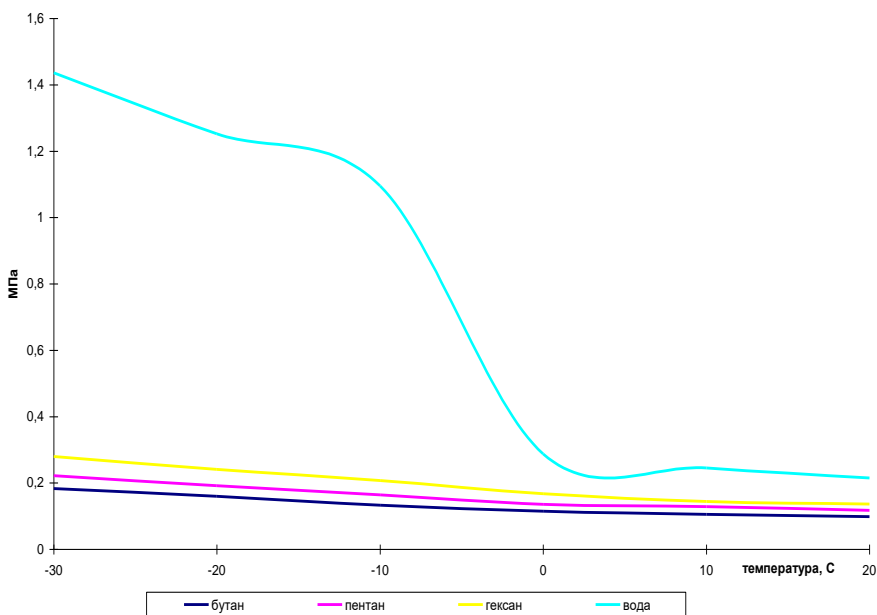


Рисунок 1.13 – Залежність перепаду тиску між входом та виходом звужуючого пристрою діаметром 0,1 мм. при русі його внутрішньою порожниною компонентів природного газу в рідкому стані від температури

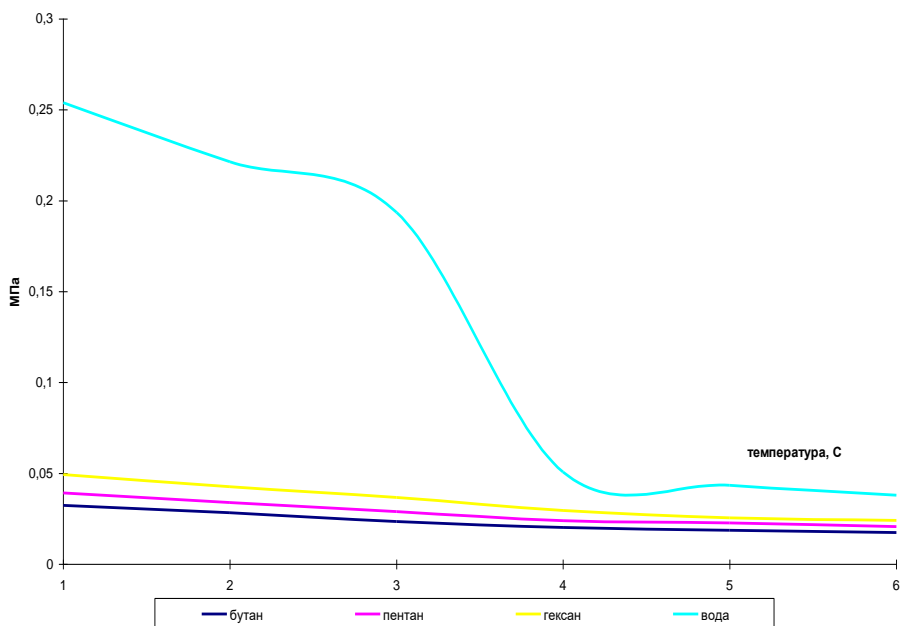


Рисунок 1.14 – Залежність перепад тиску між входом та виходом звужуючого пристрою діаметром 0,2 мм. при русі його внутрішньою порожниною компонентів природного газу в рідкому стані від температури

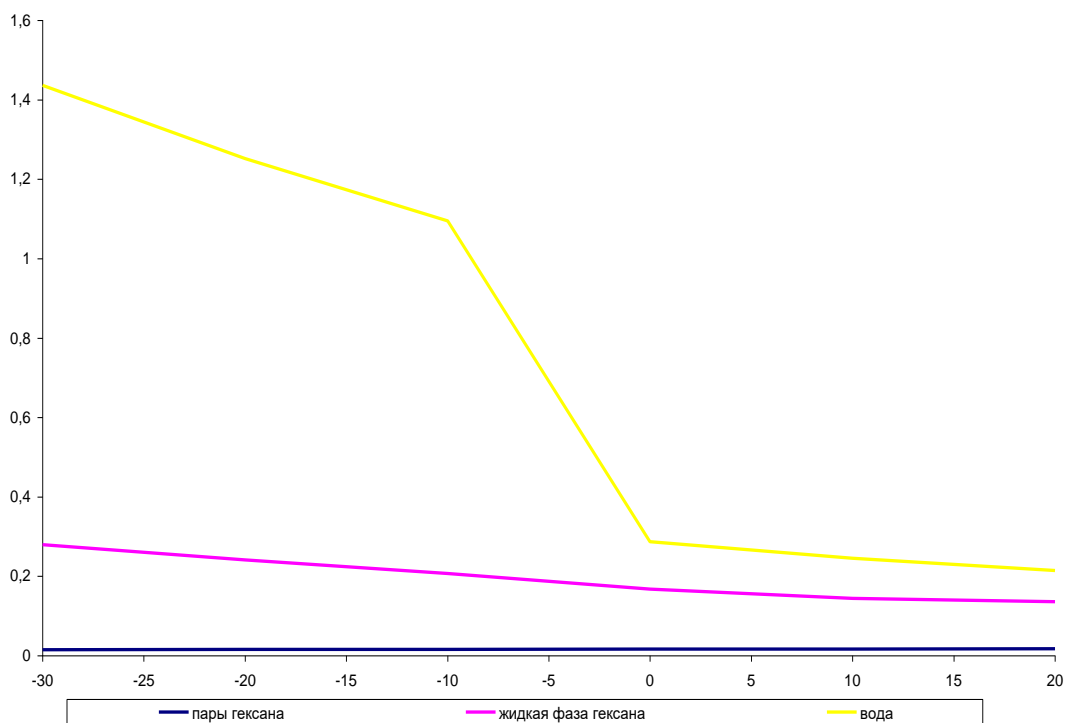


Рисунок 1.15 – Залежність перепаду тиску між входом та виходом звужуючого пристрою діаметром 0,1 мм. при русі його внутрішньою порожниною вуглеводневого компоненту та вологи від температури

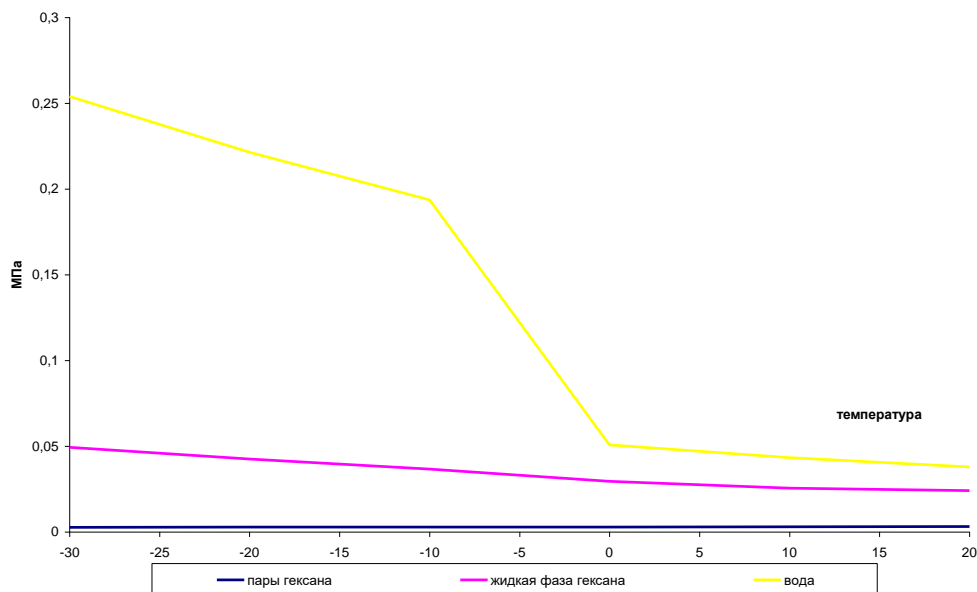


Рисунок 1.16– Залежність перепаду тиску між входом та виходом звужуючого пристрою діаметром 0,2 мм. при русі його внутрішньою порожниною вуглеводневого компоненту та вологи від температури

При аналізі графічного відображення розрахованих значень перепаду тисків за різних умов можна стверджувати, що:

- обрання значення діаметру звужуючого пристрою в діапазоні значень від 0,1 мм. до 0,2 мм. надає можливість забезпечити похибку вимірювання температури початку конденсації, яка обумовлена різністю термодинамічних умов на вході і виході звужуючого пристрою, в межах від 0,1 °C до 0,2 °C;

- різниця тисків між входом та виходом звужуючого пристрою за умов відсутності конденсації (в “сухому” стані) у порівнянні з його значенням за умов конденсації вуглеводневих компонентів, а тим більше вологи, значно відрізняються;

- різниця значень перепаду тисків між входом та виходом звужуючого пристрою за умов конденсації будь якого з компонентів є майже незмінним порівняно з різницею для різних компонентів в обраному температурному діапазоні;

- різниця значень перепаду тисків між входом та виходом звужуючого пристрою за умов конденсації будь-якого з компонентів вуглеводневого ряду мало відрізняється від різниці за умов конденсації будь-яких вуглеводневих компонентів та вологи;

– різниця значень перепаду тисків між входом та виходом звужуючого пристрою за умов кристалізації компонентів природного газу (крига, кристалогідрат) значно відрізняється від значень при конденсації будь-яких компонентів і може становити значення, що дорівнюють значенням тиску у вимірювальній системі.

Якщо узагальнити результати проведених розрахунків та результати їх аналізу, можна зробити такі висновки:

– значення діаметру звужуючого пристрою від 0,4 мм. до 0,6 мм. дозволяє задовільно проводити ідентифікацію процесу переходу в рідку фазу компонентів вуглеводневого ряду і вологи та утворення сполук в твердому стані в середовищі природного газу;

– рівень різниці тисків, що виникає між входом та виходом звужуючого пристрою, завдяки переходу в рідкий стан компонентів вуглеводневого ряду може виявитись незначним для детальної ідентифікації компоненту, що за умов розробки не є обов'язковим;

– рівень різниці тисків, що виникає між входом та виходом звужуючого пристрою, завдяки переходу компонентів природного газу в рідкий та (або) твердий стан має достатнє значення для його вимірювання з достатньою ймовірністю;

– рівень різниці тисків, що виникає між входом та виходом звужуючого пристрою, завдяки переходу компонентів природного газу в рідкий та (або) твердий стан забезпечує ідентифікацію проходження цих процесів з достатньою часткою ймовірності.

Аналіз залежностей показаних на рис. 1.7 – рис. 1.16 дозволяє стверджувати, що:

– різниця тисків між входом та виходом звужуючого пристрою значною мірою залежить від агрегатного стану окремих компонентів природного газу, причому різниця сягає декількох порядків;

– різниця тисків між входом та виходом звужуючого пристрою при утворенні в ньому вологи в рідкому стані значно відрізняється за значенням від того ж параметру при наявності у вимірювальному газопроводі будь-якого іншого компонента природного газу, крім того, при переході вологи в твердий стан різниця тисків набуває максимального значення, яке є сумірним з робочим тиском на вході до звужуючого пристрою;

– наявність у внутрішній порожнині звужуючого пристрою вологи в рідкому та (або) твердому стані (процес конденсації) викликає змінення перепаду тисків між його входом та виходом, яке можна виміряти;

– при використанні звужуючого пристрою з діаметром від 0,4 мм. до 0,6 мм. крім можливості легко визначити момент виникнення в його порожнині вологи в тому чи іншому агрегатному стані, є ще й можливість відрізнити виникнення її від присутності інших компонентів природного газу, що можуть перейти у рідкий стан за певних термодинамічних умов.

1.9 Висновки до розділу

Існуючі на теперішній час методи визначення параметрів вологості природного газу, як основного показника його якості, та стан їх реалізації в технічних засобах не забезпечують необхідної точності при проведенні вимірювань в автоматичному режимі внаслідок впливу на результат вимірювання домішок різної природи, які входять до складу природного газу.

За результатами проведеного аналізу стану забезпечення визначення параметрів вологості природного газу встановлено, що у газопромисловій практиці, частіше, як показник вологості, використовують значення температури точки роси вологи – температури початку конденсації (кристалізації) пари вологи, яка є присутньою в складі газу при визначеному тиску. Нормативними документами, в більшості, регламентуються саме значення температури точки роси вологи з огляду на їх найбільшу інформативність, крім того, враховуючи багаторічний досвід застосування вимірювального обладнання в умовах виробництва, конденсаційний метод визначено найбільш придатним для застосування.

Показано, що підвищення достовірності результатів визначення вологості на основі конденсаційного методу може бути досягнуто шляхом урахування впливу домішок, які входять до складу природного газу, на результати ідентифікації процесу конденсації (кристалізації) вологи. Актуальність проведення досліджень сформульовано з огляду на необхідність створення нового методу ідентифікації конденсованих компонентів використаного в сучасній вимірювальній системі, яка здатна працювати в автоматичному режимі за умов наявності в складі природного газу технологічних та інших домішок, та забезпечувати при цьому достовірне визначення вмісту вологи в природному газі із задовільною для практики точністю є актуальною.

2 РОЗРОБКА МІКРОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Запропоновано мікропроцесорний блок вимірювання вологості газу, розроблено його структурну та електричну схему, проведено моделювання за допомогою програмних засобів, яке продемонструвало та підтвердило можливість його використання на практиці.

2.1 розробка структурної схеми

Проведені дослідження дозволили розробити засіб вимірювального контролю вологості природного газу (ЗВКВПГ) на основі НВЧ методу біжучої хвилі, структурна схема якого наведена на рис. 1. ЗВКВПГ є двоканальним і складається з вимірювального каналу і каналу порівняння.

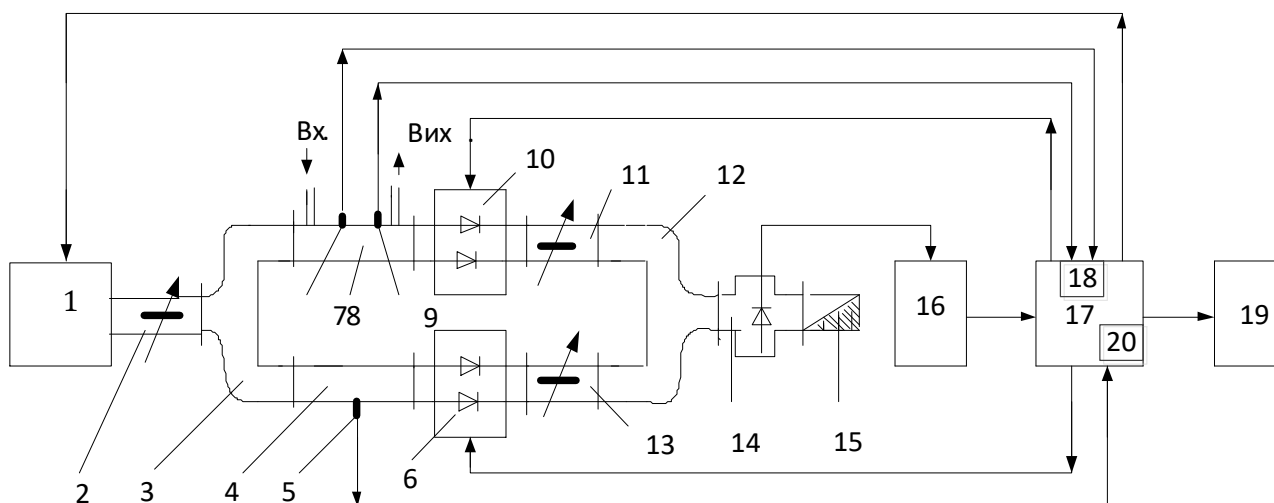


Рисунок 2.1– Структурна схема засобу вимірювального контролю вологості природного газу

ЗВКВПГ містить НВЧ генератор 1, атенюатор 2, хвилеводний трійник 3, хвилеводну секцію порівняння (порівняльну кювету) 4, датчик температури 5, комутатор порівняльного каналу 6, датчик тиску вимірювальної хвилеводної секції 7, хвилеводну вимірювальну секцію (вимірювальну кювету) 8, датчик температури 9, комутатор вимірювального каналу 10, атенюатори вимірювального каналу і каналу порівняння 11 і 13 відповідно, хвилеводний

трійник 12, діодну секцію 14, узгоджене навантаження 15, підсилювач 16, мікропроцесор 17, АЦП 18, індикаторний пристрій 19, вихідний порт 20.

НВЧ генератор 1 ЗВКВПГ, зібраний на ПН-діоді, налаштовується на частоту 10 ГГц за допомогою стабілізованої напруги корегування, яка надходить від мікропроцесора 17. Позначимо потужність високочастотної електромагнітної хвилі (ВЕХ), що виходить від генератора 1 через P_0 . Атенюатор 2 послаблює прохідну ВЕХ на величину K_1 . Тобто потужність на виході атенюатора 2 P_1 буде визначатись

$$P_1 = K_1 \cdot P_0. \quad (2.1)$$

Хвилеводний трійник 3 розділяє ВЕХ на два канали: вимірювальний канал і канал порівняння. Потужність P_1 ВЕХ ділиться трійником 3 на два канали порівню. Позначимо потужність ВЕХ вимірювального каналу через P_g , а потужність ВЕХ порівняльного каналу через P_n . Отже,

$$P_g = P_n = \frac{P_1}{2} = \frac{1}{2} K_1 \cdot P_0, \quad (2.2)$$

Крім того, при проходженні ВЕХ по хвилеводних секціях трійника відбувається ослаблення потужності за рахунок втрат на хвилеводних переходах, пов'язаних з матеріалом хвилеводу, його конструктивними особливостями і технологіями виготовлення. Тоді

$$P_g = P_n = \frac{1}{2} K_1 \cdot K_2 \cdot P_0, \quad (2.3)$$

де K_2 — коефіцієнт втрат, пов'язаний з проходженням хвилеводної секції хвилеводного трійника [9].

2.2 Математична модель мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом

Коли пройшов процес запам'ятовування сигналів U_g і U_n мікропроцесор 17 здійснює операцію ділення цих сигналів. Частка від ділення сигналів U_g і U_n з урахуванням коефіцієнта перетворення K_{11} дорівнюватиме

$$U_1 = K_{11} \cdot \frac{U_n}{U_\epsilon} = K_{11} \cdot \frac{e^{-K_{ct} \cdot Z}}{e^{-K_{tk} \cdot Z}} \quad (2.4)$$

Частка від ділення U_1 запам'ятовується мікропроцесором 17, після чого він здійснює операцію логарифмування

$$U_2 = \ln K_{11} + (K_{tk} - K_{ct}) \cdot Z = \ln K_{11} + (K_w - K_{t2} \cdot t) \cdot Z \quad (2.5)$$

Напруга U_n та U_ϵ надходить на аналоговий вхід мікропроцесора 17, де перетворюється АЦП 18 з коефіцієнтом перетворення K_{12} в цифровий сигнал N . Тоді з врахуванням (14), (30) математичну модель засобу можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \ln\left(\frac{U_n}{U_\epsilon}\right) = \left(\ln K_{11} + \frac{2\pi \cdot L}{\lambda} \cdot (K_w - K_{t2} \cdot t)\right) \cdot K_2 \\ N_1 = \frac{K_{12} \cdot U_\epsilon}{U_{on}} \cdot (2^{n_0} - 1) \\ N_2 = \frac{K_{12} \cdot U_n}{U_{on}} \cdot (2^{n_0} - 1) \end{cases}, \quad (2.6)$$

де N_1 – двійкове значення коду n -розрядного АЦП, щооцифровує напругу U_ϵ вимірювального каналу; N_2 – двійкове значення коду n -розрядного АЦП, щооцифровує напругу U_n порівняльного каналу; K_2 – коефіцієнт перетворення, пов'язаний з градуванням ЗВКВПГ.

Природний газ складається на 98 ÷ 99% з метану [11, 12]. Діелектрична проникність сухого метану дорівнює $\epsilon_m' = 1,000953$ при 0 °С [7]. У кювету порівняння 4 закачане сухе повітря. Діелектрична проникність сухого повітря дорівнює $\epsilon_c' = 1,0006258$ при 0 °С [10]. Відповідно, показники ослаблення сухого повітря K_c і метану K_m будуть відрізнятися. Це необхідно враховувати при вимірюванні вологості природного газу, як з урахуванням корегування за температурою сухого повітря так при корегуванні за температурою сухого метану. Отже формула (30) набуде вигляду

$$U_2 = \ln K_{11} + (-a_c + a_\epsilon) = \ln K_{11} + ((K_m + K_w) - K_{lm}), \quad (2.7)$$

де K_{tm} – розрахунковий показник ослаблення сухого метану з урахуванням впливу температури

$$K_{tm} = K_c + K_{n(0^\circ\text{C})} - K_t \cdot (\pm t), \quad (2.8)$$

де $K_{n(0^\circ\text{C})}$ – коефіцієнт поправки при 0°C ; K_t – температурний поправочний коефіцієнт; t – числовий показник температури коефіцієнта поправки, в градусах Цельсія.

Отже

$$U_2 = \ln K_{11} + \left((K_m + K_w) - (K_c + K_{n(0^\circ\text{C})} - K_t \cdot (\pm t)) \right). \quad (2.9)$$

У таблиці 2.1 занесені значення обчислених коефіцієнтів корегування і похибки при їх застосуванні.

Таблиця 2.1- Значення коефіцієнтів корегування та відносної похибки при їх застосуванні

°C	$\varepsilon_m' - 1$	$\varepsilon_m'' - 1$	$\varepsilon_c' - 1$	$\varepsilon_c'' - 1$	K_c	K_{tm}
1	2	3	4	5	6	7
20	0,0008831	0,00008831	0,00058	0,000058	0,0012026	0,001484
0,0	0,000953	0,0000953	0,0006258	0,00006258	0,0012492	0,0015416
-20	0,0010228	0,00010228	0,0006717	0,00006717	0,0012942	0,0015971
	K_n	$K_{n(0^\circ\text{C})} - K_{n(\pm 20^\circ\text{C})}$	K_{tm}	$\Sigma = K_c + K_{tm}$	$K_{tm} - \Sigma$	$\Delta K_{tm}, \%$
	8	9	10	11	12	13
	0,0002814	0,000011	0,0002817	0,0014843	0,0000003	0,0202
	0,0002924	0,0000107	0,0002924	0,0015416	-----	-----
	0,0003028	0,0000104	0,0003031	0,0015973	0,0000002	0,0125

В стовпцях 2, 3 та 4, 5 табл. 2.1 наведені розрахункові дійсні ε_m' , ε_c' і уявні ε_m'' , ε_c'' значення діелектричної проникності сухого метану та сухого повітря при температурах $+20^\circ\text{C}$, 0°C і -20°C , відповідно. В стовпцях 6, 7 наведені розрахункові значення зміни показника ослаблення K_c сухого повітря та показника ослаблення K_{tm} сухого метану при $+20^\circ\text{C}$, 0°C і -20°C [13]. В стовпці 8 – розрахункові значення зміни коефіцієнта поправки K_n при $+20^\circ\text{C}$, 0°C і -20°C , де $K_n = K_{tm} - K_c$. В стовпці 9 – розрахункові значення температурного

поправочного коефіцієнт K_t при $+20\text{ }^\circ\text{C}$, $0\text{ }^\circ\text{C}$ і $-20\text{ }^\circ\text{C}$, $K_t = K_{n(0^\circ\text{C})} - K_{n(\pm 20^\circ\text{C})}$. Розрахований середній температурний поправочний коефіцієнт – при значенні $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$). Середній поправочний коефіцієнт віднесений до $1\text{ }^\circ\text{C}$ становить $K_t = 0,000000535$. В стовпці 10 наведені розрахункові значення поправочного коефіцієнта K_m при $+20\text{ }^\circ\text{C}$, $0\text{ }^\circ\text{C}$ і $-20\text{ }^\circ\text{C}$. $K_m = K_{n(0^\circ\text{C})} - K_t \cdot (\pm t)$. $K_{m(0^\circ\text{C})} = 0,0002924$ [10]. В стовпці 11 наведені значення суми показника ослаблення сухого повітря та розрахункового значення поправочного коефіцієнта $\Sigma = K_c + K_m$. В стовпці 12 – значення різниці показника ослаблення K_{tm} сухого метану і суми показника ослаблення сухого повітря K_c з розрахунковим значенням поправочного коефіцієнта K_m при $+20\text{ }^\circ\text{C}$, $0\text{ }^\circ\text{C}$ і $-20\text{ }^\circ\text{C}$. В стовпці 13 – значення відносної похибки ΔK_m при зміні температури контрольованого вологого метану відносно $0\text{ }^\circ\text{C}$ до $+20\text{ }^\circ\text{C}$ і $-20\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta K_m = 0,0202\%$ при $+20\text{ }^\circ\text{C}$ та $\Delta K_m = 0,0125\%$ при $-20\text{ }^\circ\text{C}$. Зі стовпця 13 видно, що відносна похибка ΔK_m при зміні температури газу відносно $0\text{ }^\circ\text{C}$ на $+1\text{ }^\circ\text{C}$ і $-1\text{ }^\circ\text{C}$ призводить до похибки $0,001\%$ і $0,000625\%$, відповідно.

2.3 Вибір елементної бази

На основі проведеного аналізу мікропроцесорів вибрано для подальшої роботи мікропроцесор ATmega328.

Вибір мікроконтролера для мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом

ATmega328 - 8-розрядний КМОП мікроконтролер, заснований на архітектурі AVR фірми Atmel. Контролер виконує більшість інструкцій за 1 такт, тому обчислювальна потужність контролера дорівнює 1 MIPS (мільйону операцій в секунду) на 1 МГц.

ATmega328 є - чіп мікроконтролер, створений Atmel в megaAVR. Він має модифікований Harvard архітектури 8-бітний RISC - процесор. Atmel 8-розрядний AVR RISC - заснований мікроконтролер поєднує в собі 32 кБ ISP флеш - пам'яті з можливостями читання і запису в той час, 1 кБ EEPROM, 2 кБ SRAM, 23 загального призначення ліній введення / виводу, 32 загального призначення робочих регістрів, три гнучких таймера / лічильники з режимами порівняння, внутрішні і зовнішні переривання, послідовний програмований USART, 2-провідний послідовний інтерфейс байт-орієнтованим, SPI, послідовний порт, 6-канальний 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач

(8-каналів в TQFP і QFN / МФ пакетів), програмований сторожовий таймер з внутрішнім генератором, і п'ять програмних режимів економії за вибором потужності. Пристрій працює між 1.8-5.5 вольт.

Так як об'єкт регулювання зазвичай аналоговий, то необхідно перетворення з цифрового коду в аналоговий і назад. Для цього в мікроконтроллері ATmega328 існує АЦП і ЦАП, що робить ці мікроконтроллери досить вигідними конкурентами по відношенню до інших мікроконтроллерів (PIC).

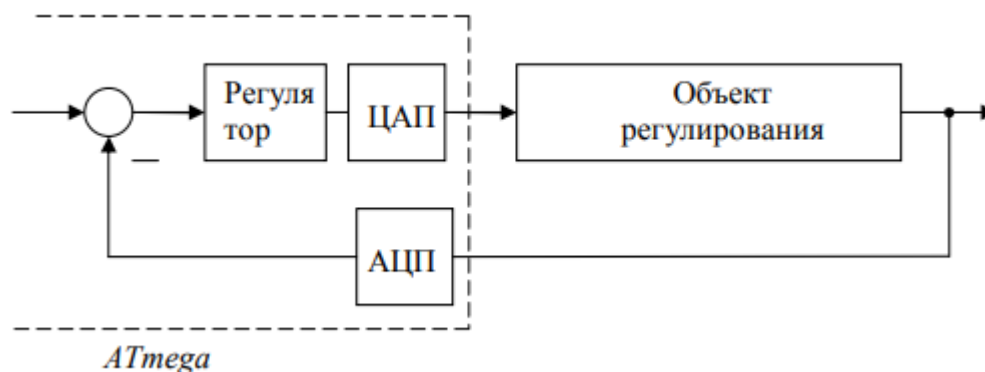


Рисунок 2.2 – Один з варіантів застосування мікроконтроллерів

Мікроконтроллер містить:

- 23 програмовані лінії введення / виводу. Тобто 23 з 28 ніжок мікроконтроллера можуть, як приймати, так і віддавати певну інформацію. Що робити з цією інформацією: «Віддавати або приймати її?», Визначається станом біта управління для кожної ніжки, в регістрі управління цього порту;

- Два 8-розрядних таймера / лічильника (T0 і T2). Будь-таймер - це лічильник імпульсів. Тільки ці імпульси відстоять, один від одного на рівні в часі відрізки. Тому будь-який таймер можна використовувати як лічильник і навпаки. Виробники контроллерів залишили цей вибір за програмістом. Тобто В якому режимі працює даний таймер / лічильник - в режимі вимірювання часу або в режимі лічильника довільних імпульсів програмується самим програмістом безпосередньо в спеціальних регістрах управління, де задається ця, і інша інформація про режим роботи таймера / лічильника.

- Кожен таймер / лічильник забезпечений попередніми дільником. Попередній дільник - це пристрій всередині мікроконтроллера, яке подає тільки кратні певному числу імпульси, на вхід таймера / лічильника. Тобто, наприклад, таймер можна запрограмувати рахувати кожну 10-у мкс або кожну 10-ту мс;

- Один 16-розрядний таймер / лічильник (T1) з окремим попереднім дільником. Цей таймер / лічильник відрізняється від попередніх двох розрядністю, тобто максимальним числом в регістрах рахунки. Разом в мікроконтролері ATmega8 існує три таймера / лічильника (два - 8-розрядних, один - 16-розрядний)

- Один 6-канальний аналого-цифровий перетворювач (АЦП -ADC). З них 4 канали з 10 розрядної точністю і 2 з 8-розрядної точністю. Перемикання між входними каналами АЦП проводиться за допомогою регістра управління АЦП (ADMUX). Внаслідок чого ATmega8 може зчитувати 6 аналогових сигналів, але неодночасно, а послідовно, тобто спочатку відбулося зчитування аналогового сигналу з однієї ніжки мікроконтролера (з 1 каналу). Це лічений значення запам'ятовується в програмі. Потім програмним шляхом відбувається перемикання входу АЦП (Наприклад, з 1 каналу на 2) і виробляється зчитування аналогового сигналу з іншого ніжки. Це значення також запам'ятовується. Процес повторюється, і так далі. В результаті чого швидкість програми зменшиться в 6 разів, якщо використовувати всі 6 входів АЦП. Оскільки програмі щоб отримати інформацію про шести аналогових сигналах необхідно зробити 6 разів перетворення аналогового сигнал в цифровий код, а будь-яка така перетворення забирає значну частину часу роботи мікроконтролера, то час виконання програми каліцтва в 6 разів;

- Три програмованих послідовних інтерфейсу USART, TWI і SPI, які служать для зв'язку цього мікроконтролера з іншими зовнішніми пристроями;

На рисунку 2.3 зображено архітектуру мікроконтролерів ATmega328

ще одна цікава область - сторожовий таймері пристрій управління живленням. Вони відкривають для мікроконтролера безліч додаткових можливостей, зазвичай прихованих за рівнем спрощення Arduino, в тому числі переклад мікропроцесора в економічний режим з подальшою установкою таймера для періодичного перекладу в нормальний режим. Цей трюк може стати в нагоді для створення додатків з низьким енергоспоживанням [13].

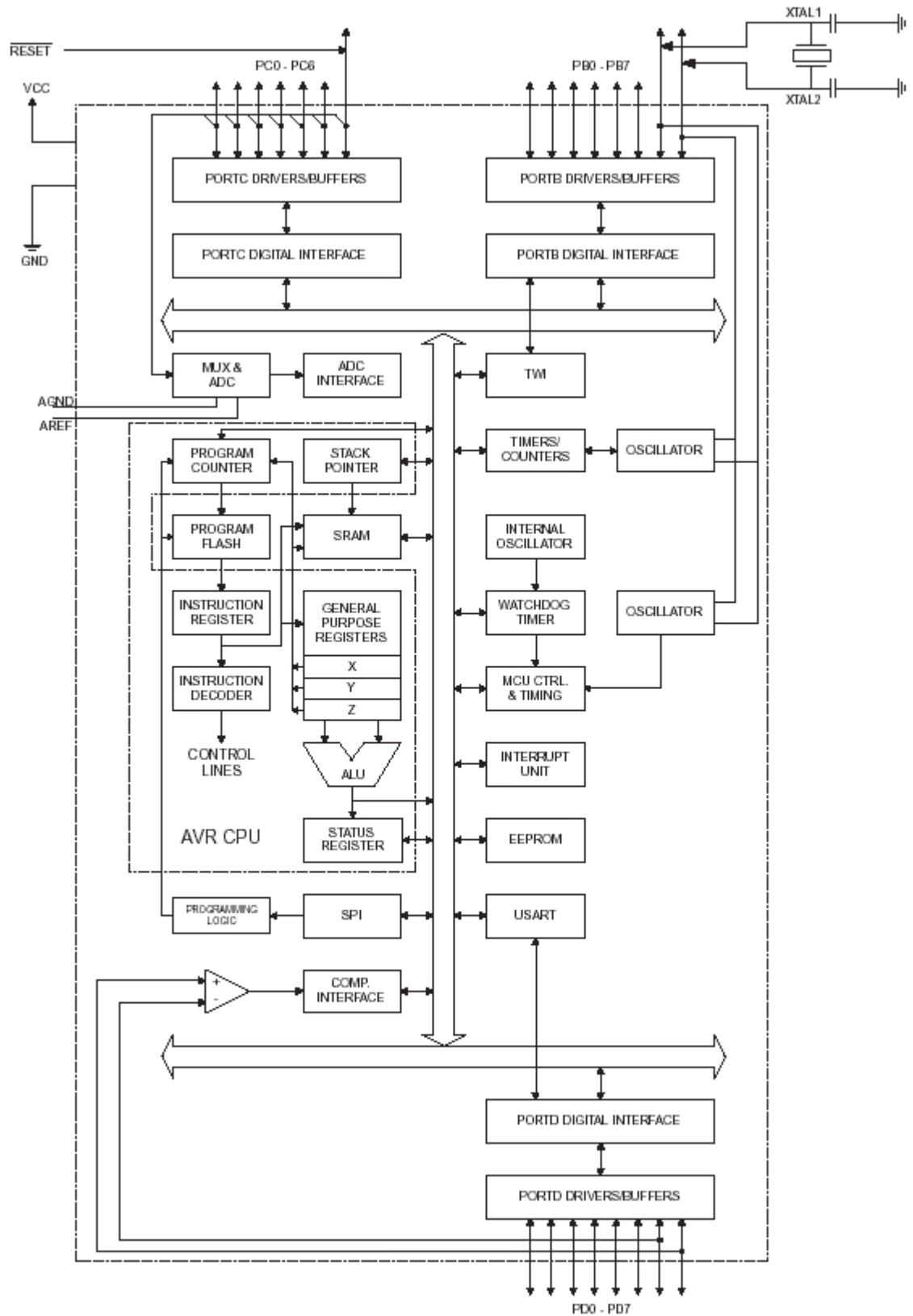


Рисунок 2.3 – Архітектура мікроконтролерів ATmega328

Все інше на рис. 2.4 так чи інакше пов'язане з аналого-цифровим перетворювачем, портами введення / виведення і послідовними інтерфейсами трьох типів, підтримуваними мікро контролером: УСАПП, ППІі ДП.

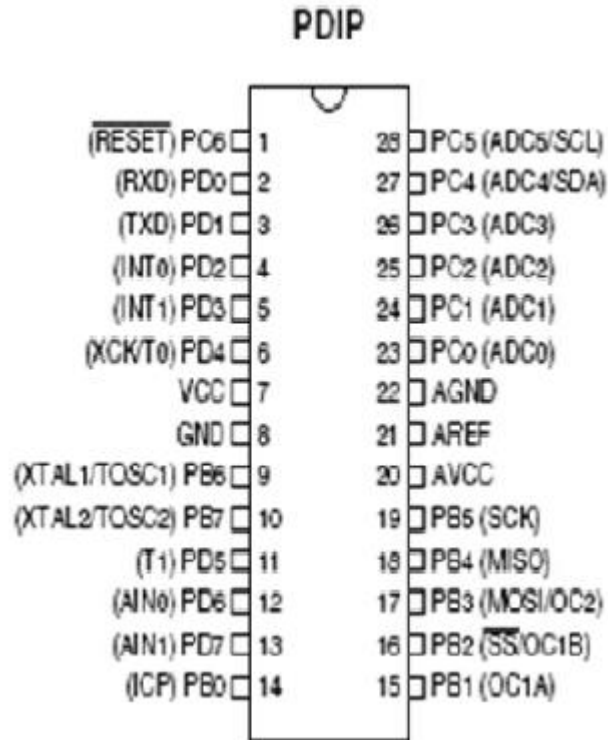


Рисунок 2.4 – призначення ніжок мікроконтролера ATmega328

Приклад, якщо врахувати схему підключення зовнішнього генератора імпульсів, яку можна замінити конденсатором, а також, що це схема для передачі постійного сигналу - не перешкода, то ці ніжки можна використовувати для введення або виведення постійних сигналів. Ще приклад, можна заборонити мікроконтроллеру використовувати сигнал Reset (ніжка 1). тоді цю ніжку можна використовувати для введення або виведення інформації в мікроконтролер. правда після такої операції неможливо буде перезаписати програму в мікроконтроллері, тому що щоб виконати цю операцію необхідно подати сигнал Reset.

- PC6 (Reset) - сигнал скидання по приходу нульового рівня (нуля вольт), Це інверсний сигнал скидання, тобто Reset відбувається при появі нуля вольт на вході, а не 5В, одночасно є 6 бітом порту C.
- Ніжки PD0 (RXD), PD1 (TXD) - необхідні для зв'язку мікроконтролера з іншими пристроями по послідовному інтерфейсу UART. А також, одночасно, ці

ніжки є 0 і 1 бітом порту D. Ніжка TXD - це вихід передавача UART. якщо дозволена робота передавача UART, незалежно від стану біта 1 в регістрі DDRD (Реєстр напрямки передачі інформації) цей висновок налаштований як вихід. Ніжка RXD - вихід приймача UART. якщо дозволена робота передавача UART, незалежно від стану біта 1 в регістрі DDRD (Реєстр напрямки передачі інформації) цей висновок налаштований як вихід. Ніжка RXD - вихід приймача UART. Якщо дозволена робота приймача UART, незалежно від стану 0 біта в регістрі DDRD (реєстр напрямку передачі інформації) цей висновок налаштований як вихід [14].

- VCC - живлення мікроконтролера. Сюди подається сигнал в 5В. Оскільки без харчування мікроконтролер взагалі не працездатний, то цію ніжки не поєднали більше ні з якими функціями.

- PD6 (AIN0) і PD7 (AIN1) - входу аналогового компаратора і одночасно 6 і 7 біт порту D.

- AVCC - напруга живлення АЦП.

- PC4 (ADC4 / SDA) - 4 біт порту 3, 4 канал АЦП і SDA – шина підключення TWI з'єднання з іншим зовнішнім пристроєм по TWI з'єднанню. Розглянемо архітектуру мікроконтролера ATmega8 більш детально (Див. Рис. 3). На ніжки VCC і GND подається напруга живлення мікроконтролера - 5 В. На ніжку AVCC, AGND подається напруга живлення мультиплектора АЦП (MUX). Мультиплексор перемикає вхід АЦП з однієї ніжки мікроконтролера на іншу. В результаті чого, в мікроконтролер можна заводити 6 аналогових сигналів з напругою від 0 до +5 В (ADC0 - ADC5), але при цьому використовується тільки одне АЦП.

Призначення ЦАП і АЦП мікроконтролерів AVR

Цифроаналоговий перетворювач (ЦАП) називають пристрої, що перетворюють сигнал одиниць і нулів (цифровий) в аналоговий (плавно змінюється). Головні характеристики - розрядність і частота дискретизації. У АЦП перетворюється аналоговий сигнал в цифровий вигляд. Порти з підтримкою АЦП потрібні для того, щоб підключити до мікроконтролеру аналогові датчики, наприклад, резистивного типу.

ЦАП знайшов своє застосування в цифрових фільтрах, де вхідний сигнал проходить програмну обробку і виведення через ЦАП в аналоговому вигляді, нижче ви бачите наочні осцилограми. Нижній графік - вхідний сигнал, середній - цей же сигнал, але оброблений аналоговим фільтром, а верхній - цифровий

фільтр на мікроконтролері. Фільтр потрібен для формування потрібного діапазону частот сигналу, а також для формування сигналу певної форми.

Отже, вибрано контролер ATMEGA328 так як він продуктивний і економічний. Має хорошу функціональність і об'єм пам'яті, який дозволяє реалізувати доволі серйозні проекти, такі як блок керування водного БПЛА. Відносно не велика вартість, широко доступний в продажі.

Температурний датчик

Температурний датчик термістор - напівпровідниковий резистор, електричний опір якого істотно зменшується або зростає з ростом температури. Терморезистор виготовляють у вигляді дисків, стрижнів, шайб, трубок, бусинок і тонких пластинок переважно методами порошкової металургії, їх розміри можуть варіюватися в межах від 1-10 мкм до одного сантиметра. Основними параметрами терморезистора є: температурний коефіцієнт опору, номінальний опір, інтервал робочих температур, максимально допустима потужність розсіювання [15].

Характеристики:

- Виробник: NXP;
- Корпус: SOD-70;
- Вихід / інтерфейс: Аналоговий;
- Діапазон температури: ° C = -55 ... + 150° C;
- Струм живлення: MA = 10;
- Тип монтажу: ТНТ;
- Опір, R = 1 980 2020 Ом;
- Тип датчика: Датчик температури;

Блок передачі даних ESP-12F

ESP-12F - модуль WiFi, сконструйований на базі чіпсета ESP8266EX. Модуль містить мікросхему flash-пам'яті формату SOP-210mil, в якій міститься програмне забезпечення модуля. При кожному включенні живлення ці програми автоматично завантажуються в чіп ESP8266EX. Обсягу flash-пам'яті чотири МБ є цілком достатньо, для того, щоб зберігати повноцінні програми, керовані великим набором текстових команд, і для реалізації складного алгоритму аутентифікації і шифрування оснований на сертифікаті безпеки WPA2-Entrprise. Центральним обчислювальним ядром модуля являється вбудований всередині чіпсета ESP8266EX процесор Tensilica L106 32 розряду. Потужності процесорного ядра вистачає для роботи складних призначених для користувача додатків цифрової сигнальної обробки. Модуль забезпечений

вмонтованим кварцовим резонатором, який цілком забезпечує роботу процесорного ядра та периферії при подачі живлення[16].

Характеристики:

Wi-Fi;

- Готовність до сертифікації: TELEC, FCC, CE, SRRC;
- Протоколи: 802.11 b;
- Діапазон частот: 2.4ГГц ~ 2.5ГГц (2400МГц ~ 2483.5МГц);

потужність передавача

- 802.11 b: +20 дБм;
- 802.11 g: +17 дБм;
- 802.11 n: +14 дБм;

чутливість приймача

- 802.11 b: -91 дБм (11 Мбіт / с);
- 802.11 g: -75 дБм (54 Мбіт / с);
- 802.11 n: -72 дБм (MCS7);

Варіанти антени: РСВ-антена

- Апаратне забезпечення;
- Процесорний ядро: Tensilica L106 32 розряду;

Периферійні інтерфейси:

- UART;
- SPI;
- Діапазон напруг живлення: 2.5В ~ 3.6В;

споживання струму

- Середнє значення: 80 мА;
- Робочий діапазон температур: -40 ° С ~ 125 ° С;
- Діапазон температур при зберіганні: -40 ° С ~ 125 ° С;

Корпус: 16x24x3 мм з 22 крайовими контактами і наскрізними отворами у основних контактів;

зовнішні інтерфейси

- 17 GPIO;
- Chip enable (CH_PD);
- Reset;
- ADC;

Датчик вологості та температури DHT11.

Датчик DHT11 використовується для вимірювання та передачі на контролер у вигляді цифрового сигналу показань температури і вологості середовища, в якій він знаходиться і що дозволяє калібрувати цифровий сигнал на виході. Для використання датчика потрібно зібрати на його основі макет (підключити харчування, підключити до контролера, помістити датчик в середу вимірювання). Повинна бути встановлена спеціальна бібліотека, що дозволяє працювати з датчиком. Потім потрібно записати скетч на контролер [17].

Основне застосування таких датчиків, це використання в кімнатних системах контролю температури і вологості і для освоєння початкового розуміння роботи з температурними датчиками

Зовнішній вигляд датчика може відрізнитися, але функціонал і характеристики, залишаються колишніми. Можливий варіант виконання датчика розпаяного на платі з резистором.

Характеристи

Визначення вологості: 20-90% RH \pm 5% (макс.)

Визначення температури: 0-50 °C \pm 2% (макс.)

Частота опитування: не більше 1 Гц

Розміри 15.5 x 12 x 5.5 мм

4 виведення з відстанню між контактами 0.1 "

2.4 Розробка електрично принципової схеми мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом

мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом

Після вибору елементної бази маємо змогу змодельовати електричну принципову схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом.

Відповідно до структурної схеми запропоновано електричну схему пристрою (рис. 2.5).

Для даної схеми обрано мікроконтролер ATMEGA 328, який має достатні функціональні можливості для реалізації поставлених задач.

Принцип роботи пристрою полягає в наступному. При подачі живлення на схему через підсилювач напруги U4, відбувається запуск мікроконтролера і блок вимірювання, який в свою чергу подає сигнал на вимірювання вологості та температури на датчик вологості J1.

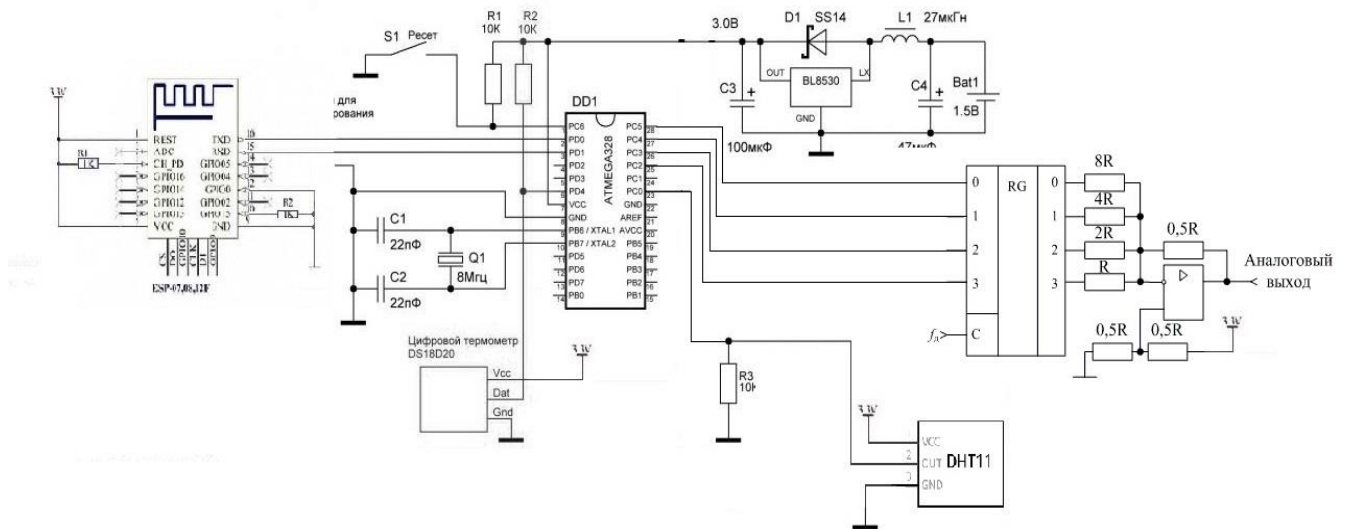


Рисунок 2.5 – Схема електрично принципова мікропроцесорного блоку вимірювання вологості газу.

Після отримання сигналу відбувається замір вологості та температури газу, отримані заміри надходять на ЦАП U4 після чого цифровий сигнал потрапляє на мікроконтролер U1 де відбувається порівняння отриманих даних. Після того як мікроконтролер U1 обробив обробив дані вони надсилаються на блок передачі даних IC1. Схема електрично принципова мікропроцесорного блоку вимірювання вологості газу наведена в додатку В.

2.5 Розробка алгоритму роботи мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом

Опис роботи мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом можна проілюструвати у вигляді алгоритму роботи мікропроцесорного блоку обробки даних, який представлений на рисунку 2.6.

Під час вимірювання мікропроцесор постійно отримує сигнали з блоку вимірювання, що свідчать про зміну параметрів газу. Мікропроцесор також контролює цю зміну, надсилаючи відповідні сигнали, що коректують параметри газу.

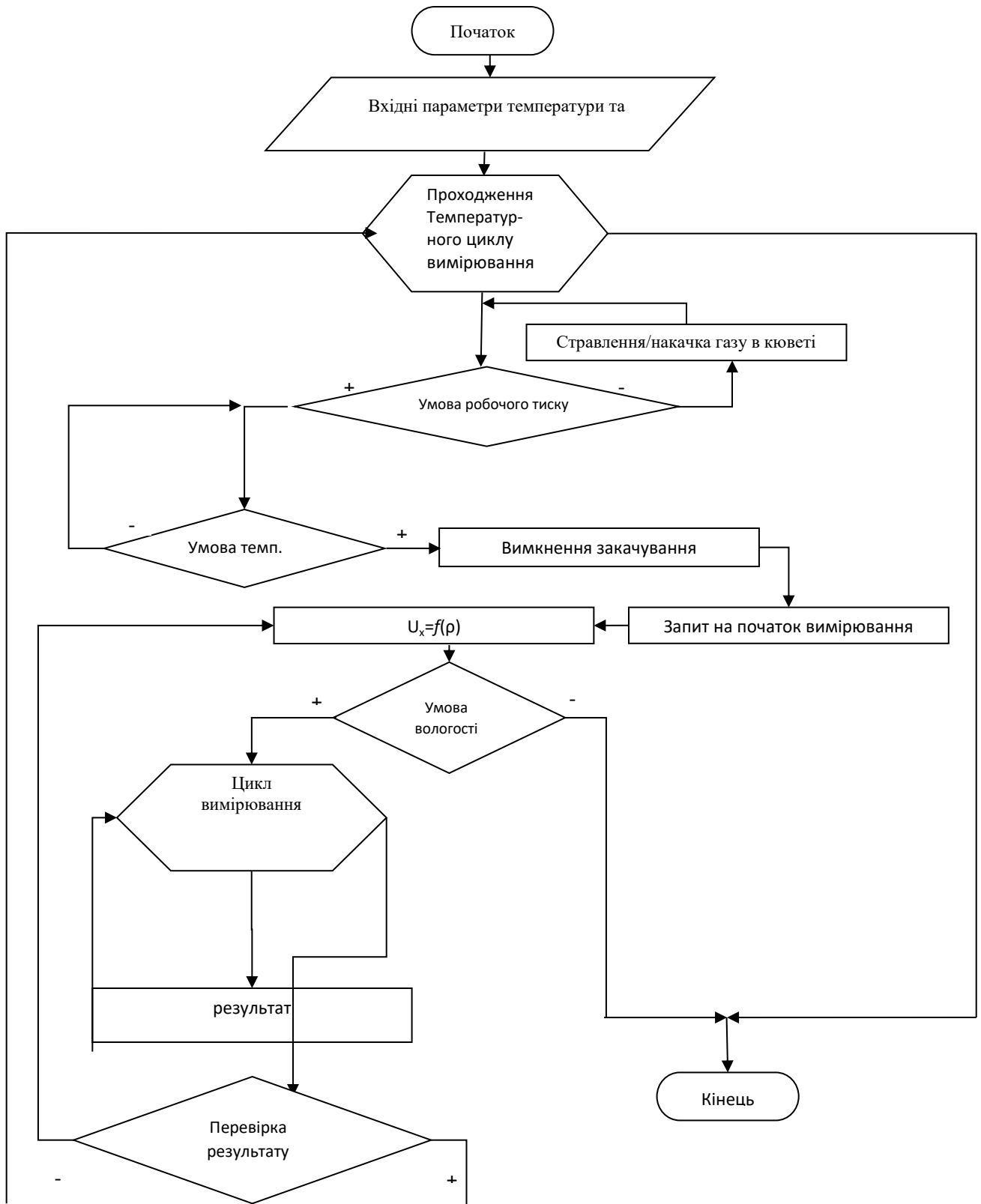


Рисунок 2.6 – Алгоритм роботи мікропроцесорного блоку обробки даних

Процес контролю вологості газу починається при певній заданій температурі із запиту на початок контролю та отримання значення напруги U_x , яка відповідає виміряній вологості газу. В разі, якщо вона знаходиться в допустимих межах, визначаються оптимальні значення газу компонентів k_1 , k_2 , k_3 . Якщо отримані значення газу при підстановці у формулу вологості газу відповідають виміряному значенню вологості, то відбувається перехід на наступний етап вимірювального контролю. В разі якщо виміряна вологість не знаходиться в допустимих межах або отримані значення газу не відповідають виміряному значенню вологості, то відбувається виведення результату на індикатор та закінчення роботи.

Після закінчення процесу контролю для однієї заданої температури мікропроцесорний пристрій здійснює аналогічні операції для наступної заданої температури.

Після проведення заданої кількості вимірювань дані виводяться на блок передачі даних. Для цього використовується мікроконтролер, який здійснює первинну обробку вимірювальної інформації та керує роботою АЦП, і статичний ОЗП, в якому накопичується і зберігається інформація [19].

2.6 Моделювання роботи схеми мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом

Як можна бачити з рисунку 2.8 отримані значення вологості 65% при температурі 25°C температурі. Таким чином, отримані результати моделювання мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом показують можливість її застосування на практиці.

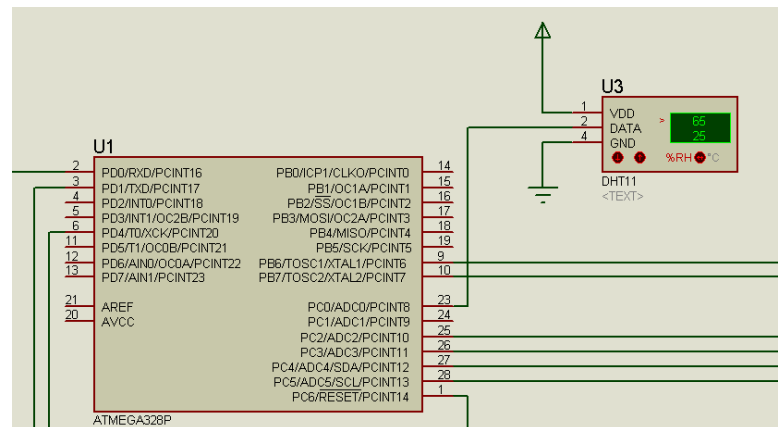


Рисунок 2.7 – Результат моделювання роботи схеми

На рисунку зображено процес роботи електричної схеми. З датчика вологості J1 сигнал надходить на ЦАП U4 після чого мікроконтроллер U1 обробляє отриману інформацію і подає сигнал на блок передачі даних IC1. На рис. 2.8 зображено результат вимірювання температури та вологості газу.

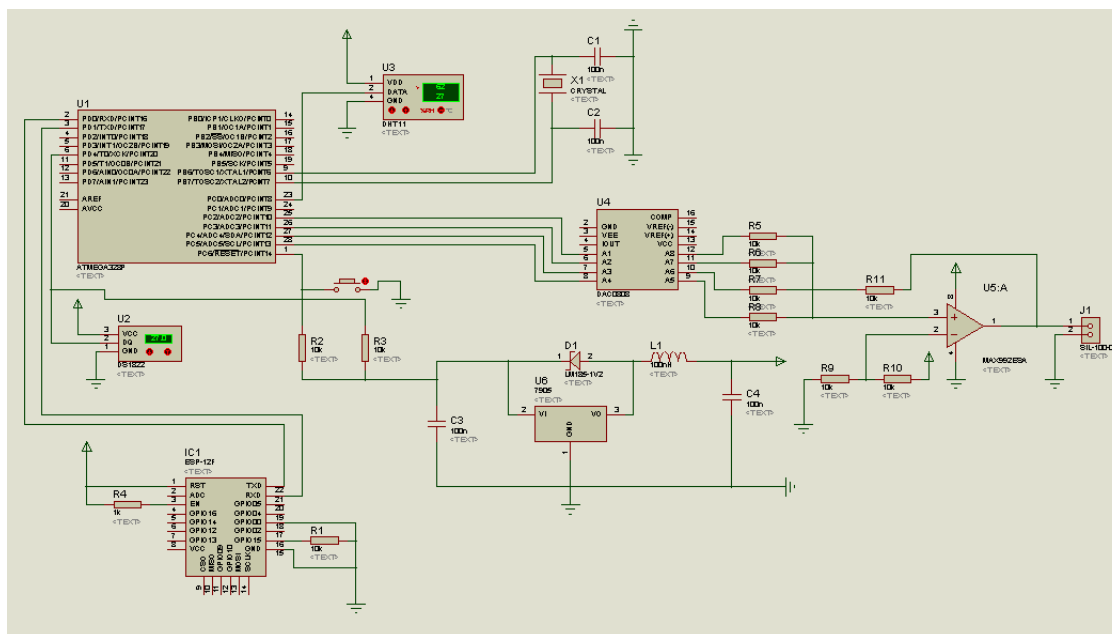


Рисунок 2.8 – Зображення схеми мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом

Для моделювання роботи електричної схеми мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом синтезовано схему в програмному середовищі Proteus (рис. 2.8). Програмне середовище дає змогу в подальшому автоматично розробити топологію друкованої плати пристрою.

2.7 Висновки до другого розділу

Розроблено структурну схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом та описано призначення її основних компонентів.

Розроблено на базі структурної електричну схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом та описано принцип її роботи.

Розроблено блок-схему алгоритму роботи мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом.

3 РОЗРОБКА ПЛАТИ ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

В розділі проведено аналіз типу та матеріалу друкованої плати, класу точності та кроку координатної сітки, на основі чого розроблено друковану плату та складальне креслення мікропроцесорного блоку керування ультразвуковою ванною.

3.1 Вибір типу та матеріалу друкованої плати

При виборі типу друкованої плати для конструкції потрібно враховувати техніко-економічні показники. Модель даного приладу не є досить складною за своєю конструкцією і складається з доступних радіоелементів. Вибираємо двосторонню друковану плату, яка характеризується високими комутаційними якостями за рахунок металізації в отворах, підвищеною міцністю з'єднань виводів навісних елементів з рисунком плати та низькою вартістю.

Для виготовлення друкованої плати використовують фольговані та нефольговані діелектрики. Вихідними матеріалами для їх виготовлення є папір або склотканина, просякнуті синтетичними смолами, або полімерні плівки з лавсану, фторопласту та ін. На поверхню фольгованих матеріалів мідна фольга приклеюється з однієї чи двох сторін листа в процесі виготовлення. Її товщина становить 20 – 50 мкм.

До матеріалу висуваємо такі вимоги:

- висока технологічність;
- високі електрофізичні властивості;
- забезпечення високої адгезії;
- мінімальні механічні короблення.

В табл. 3.1 подано основні властивості матеріалів друкованих плат [21].

Найчастіше для виготовлення друкованих плат використовують склотекстоліт і гетинакс наступних марок:

- ГФ – фольгований гетинакс;
- СФ – фольгований склотекстоліт;
- ФГС – склотекстоліт фольгований травильний;
- СФПН – склотекстоліт фольгований нагрівостійкий;
- СТФ – склотекстоліт теплостійкий.

Таблиця 3.1 – Властивості матеріалів друкованих плат

Параметри	Гетинакс	Текстоліт	Склотекстоліт
Щільність без фольги, г/см ³	1,3...1,4	1,3...1,45	1,6...1,8
Відносна діелектрична проникність	4,5...6	4,5...6	5...6
Питомий об'ємний опір, Ом·м	1012...1014	1012...1014	1014...1015
Діапазон робочих температур, °С	-60...+80	-60...+105	-60...+120
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м×К)	0,25...0,3	0,23...0,34	0,34...0,74
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	22	22	8...9

Товщина друкованої плати визначається товщиною вихідного матеріалу і вибирається залежно від елементної бази та навантажень.

Найоптимальніші параметри для розробки блоку керування ультразвуковою ванною, згідно табл. 3.1, має склотекстоліт. Тому обираємо двосторонній фольгований склотекстоліт марки СФ-2-35-1,5 ТУ16-503.271-86, який має товщину фольги 35 мкм, товщину матеріалу з фольгою 1,5 мм. та діапазон робочих температур від -60 до +120 °С. Даний матеріал, згідно з [21], володіє досить високим значенням ударної міцності, та здатен витримувати перевантаження в 25g та механічні удари з тривалістю імпульсу в 13 мілісекунд. Будучи вкритим захисним лаковим покриттям, фольгований склотекстоліт стає не чутливим до вологи у всьому робочому температурному діапазоні, що задовольняє умовам поставленого технічного завдання.

3.2 Вибір класу точності та методу проектування друкованої плати

До друкованих плат висуваються такі вимоги:

1. Висока точність розташування струмопровідного рисунка
2. Велика величина опору діелектрика
3. Висока механічна міцність
4. Добра здатність до паяння, особливо після тривалого зберігання.

Досягається шляхом вибору типу покриття та технологією його нанесення.

Точність розташування струмопровідного рисунка регламентується вимогами держстандартів. З цією метою введено поняття класу точності друкованих плат.

Для даного виробу (згідно таблиці 3.2), з огляду на не складне трасування оптимальним варіантом буде вибір 2-го класу точності друкованої плати (не вимагає використання високоякісних матеріалів, інструменту та обладнання).

Таблиця 3.2 – Класи точності друкованих плат

Параметри конструкції плат, мм	Клас точності				
	1	2	3	4	5
1. Ширина друкованих провідників	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
2. Відстань між суміжними провідниками	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
3. Ширина гарантійного пояса	0,3	0,2	0,1	0,05	0,0025
4. Відносна товщина ДП	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

Даний клас характеризується наступними параметрами конструкції:

- а) ширина провідника – 0,45 мм;
- б) відстань між сусідніми доріжками – 0,45 мм;
- в) ширина гарантійного пояса – 0,2 мм;
- г) відносна товщина ДП – 0,4 мм.

Установка навісних елементів на друкованій платі здійснюється згідно з ГОСТ 4ГО.010.030-81 та ГОСТ4.ГО.010.009. При розташуванні елементів необхідно враховувати наступні фактори: забезпечення високої надійності, мінімізація розмірів, забезпечення тепловідводу та ремонтпридатності.

Елементи розташовуємо з однієї сторони паралельно сторонам плати по принципу найкоротших зв'язків.

Вибираємо крок координатної сітки 1,25 мм. Координатну сітку на початок координат розташовуємо згідно з ГОСТ 2.417-78. Отвори та елементи друкованого малюнку розташовуємо на платі відносно початку координат [22].

Всі контактні площадки розміщуємо у вузлах сітки. Це ж стосується і виводів елементної бази.

3.3 Розрахунок ширини провідників

Ширина провідників визначається у розрахунку на струм, який проходить через них, та максимально можливе падіння напруги.

Для допустимого струму

$$b_{\min} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{доп}} \times t}, \quad (3.1)$$

де $j_{\text{доп}}$ – допустима густина струму для мідного провідника, $j_{\text{доп}} = 17 \text{ А/мм}^2$;

t – товщина фольги, $t = 35 \text{ мкм}$;

I_{\max} – максимальний постійний струм, який проходить через провідник;

$I_{\max} = 0,03 \text{ А}$, згідно індивідуального завдання.

$$b_{\min} = \frac{0,03}{17 \times 0,035} = 0,05(\text{мм}) = 50(\text{мкм}) < 250(\text{мкм}).$$

Визначимо мінімальну ширину провідника з умови допустимого падіння напруги

$$b_{\min} = \frac{I_{\max} \times \rho \times l_{\max}}{\Delta U_{\text{доп}} \times t}, \quad (3.2)$$

де ρ – питомий опір провідників, $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$;

I_{\max} – струм, який проходить по провіднику, $I_{\max} = 0,03 \text{ А}$;

l_{\max} – максимальна довжина провідника, $l_{\max} = 0,1 \text{ м}$;

$U_{\text{доп}}$ – допустиме падіння напруги (становить 5% від напруги живлення $U_{\text{доп}} = 5 \times 0,05 = 0,25 \text{ В}$);

t – товщина фольги;

$$b_{\min} = \frac{0,03 \times 0,0175 \times 0,1}{0,25 \times 0,035} = 0,06(\text{мм}) = 60(\text{мкм}) < 250(\text{мкм}).$$

Розраховані значення ширини провідників не перевищують обраних для другого класу точності.

3.4 Моделювання проекту в ARES PCB LAYOUT

Для розробки друкованої плати синтезовано схему (рис. 3.2). Розробка друкованої плати в ARES розпочинається з виклику команди Tools>NetlisttoARES в програмі моделювання ISISProteus [23]. Після виклику команди буде автоматично запущено вікно програми ARES з пропозицією вибору необхідного типу друкованої плати, що буде розроблятися. В якості

друкованої плати вибираємо плату з двосторонньою металізацією, після чого зберігаємо проект.

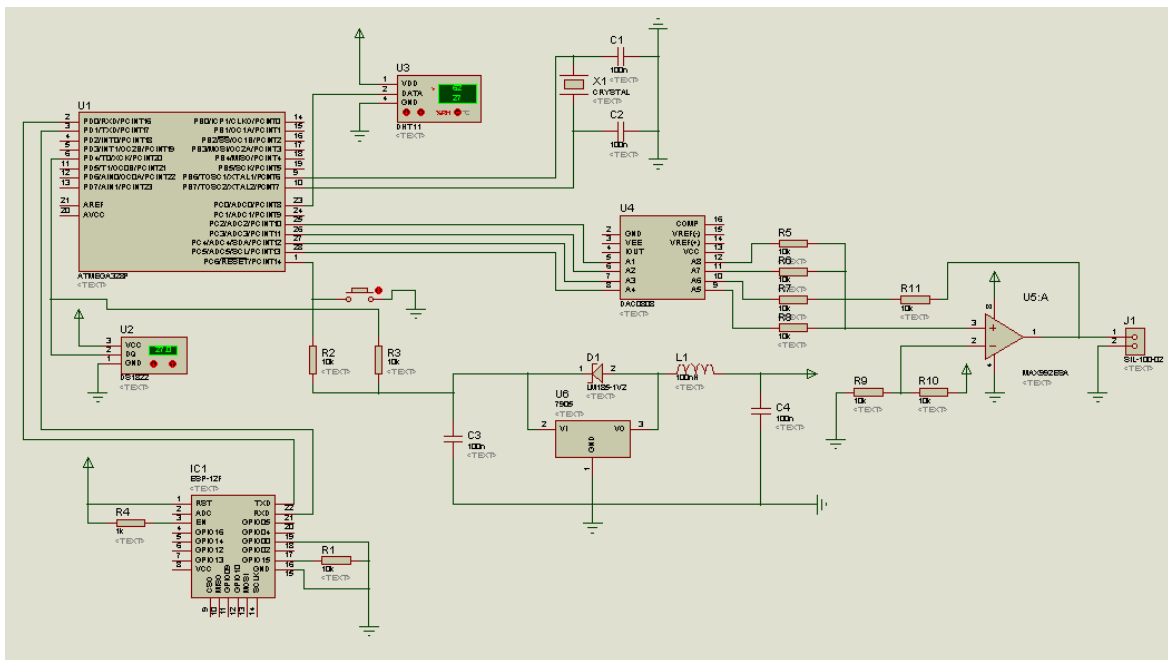


Рисунок 3.1– Схема для розведення плати

В процесі завантаження списку з'єднань для кожного символу схеми в бібліотеках корпусів компонентів *.LIV знаходиться відповідний корпус. Якщо необхідний корпус відсутній у бібліотеці, то за допомогою вкладки PackageMode створюємо новий корпус або проводимо вибірку одного із існуючих корпусів.

Перед початком процесу автоматичного трасування друкованої плати, за допомогою вкладки Technology>DesignRules проводимо необхідні налаштування допустимого розміщення провідників, їх мінімальної та максимально можливої товщини, а також зазорів між ними. Для початку трасування виконуємо команду Tools>AutoRouter. Отримаємо розведену плату (рис. 3.2).

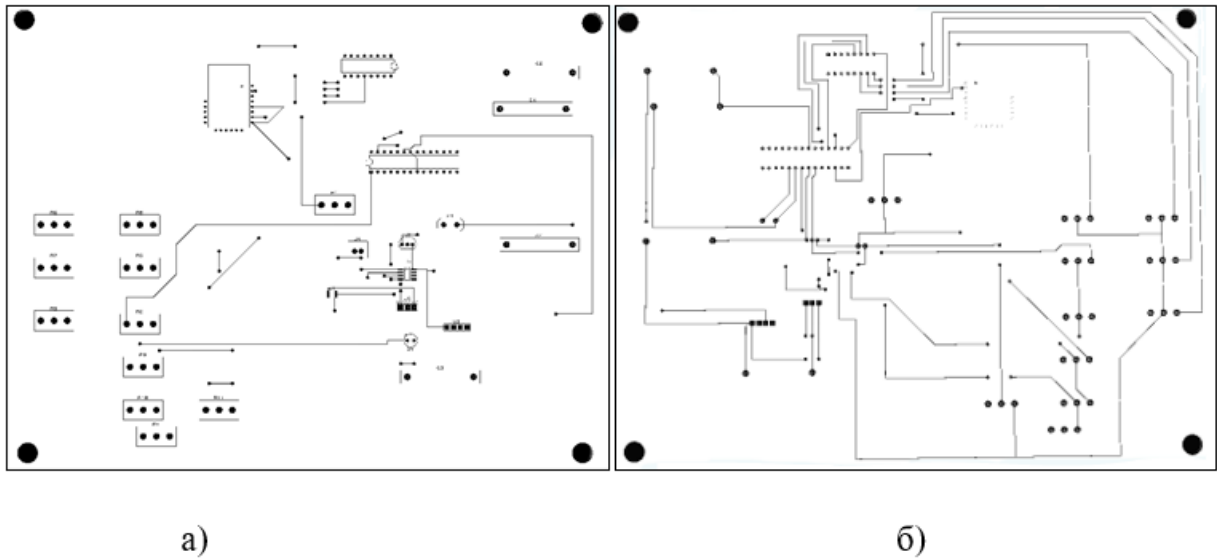


Рисунок 3.2. – Автотрасування та розміщення елементів схеми в середовищі ARESProteus. а)вид зверху б)вид знизу.

Скориставшись функціональними можливостями ARES, побудуємо візуальну трьохвимірну модель друкованої плати з встановленими компонентами. Для цього необхідно виконати команду Output> 3DVisualization.

Побудована трьохвимірна модель пристрою (рис. 3.4).А також зображено вигляд плати без елементів (рис. 3.5).

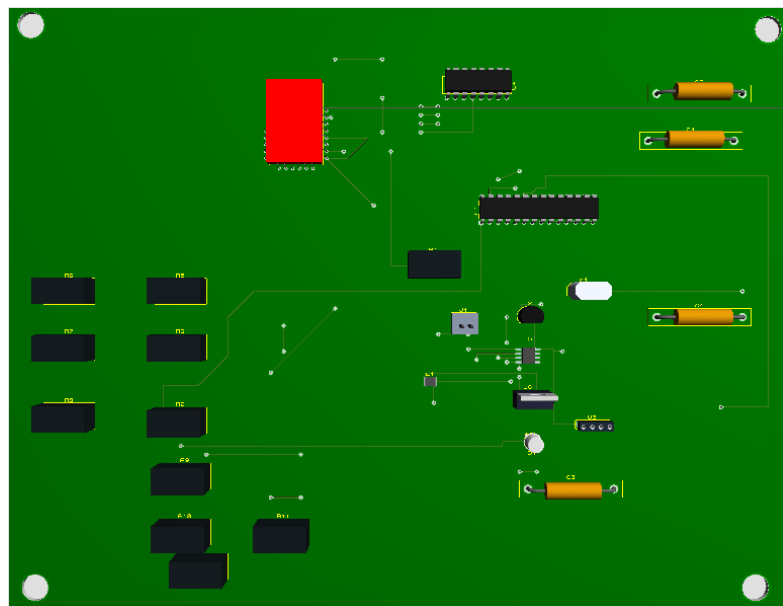


Рисунок 3.3 – Зображення моделі плати пристрою з елементами

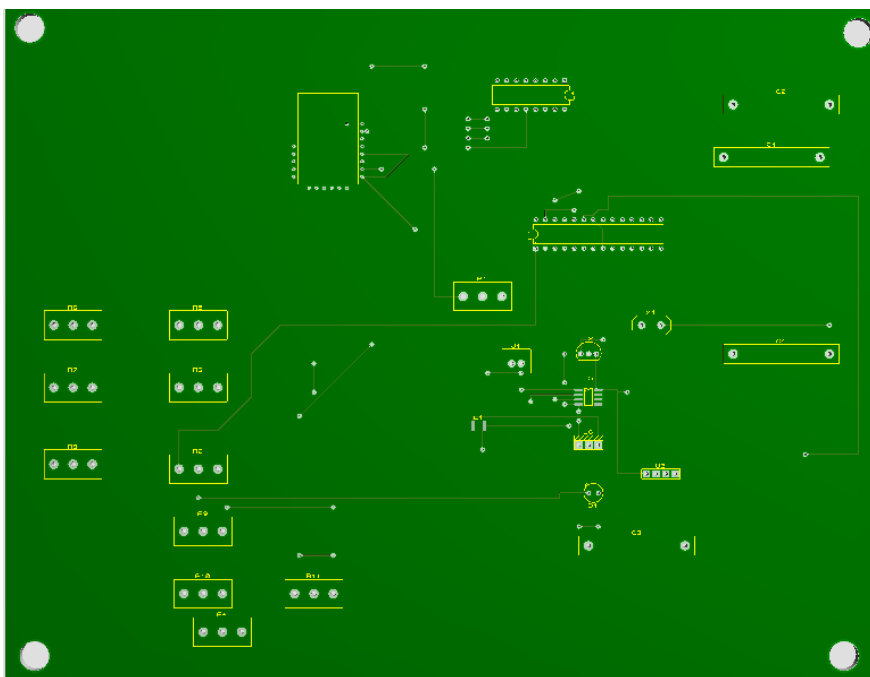


Рисунок 3.4 – Зображення моделі плати пристрою без елементів

Отже, створено модель плати та навісних елементів в програмному пакеті ARES Proteus. Автотрасування та розміщення елементів схеми і Зображення моделі плати пристрою без елементів наведено в додатках Д і Ж відповідно.

3.5 Висновки до третього розділу

Виконано розрахунок параметрів друкованої плати та обрано її тип – двостороння. Цей тип характеризується високими комутаційними властивостями, підвищеною міцністю з'єднань виводів навісних елементів з рисунком плати, високою щільністю розташування електронних компонентів та низькою вартістю.

Обрано матеріал друкованої плати – двосторонній фольгований склотекстоліт марки СФ-2-35-1,5 ТУ16-503.271-86 (ГОСТ 10316 – 78), який має товщину 1,5 мм. Для даного типу плати проведено розрахунок ширини друкованих провідників.

Використовуючи ARES PCB Layout створено проект та проведено моделювання пристрою. На основі проектів ISIS Proteus та ARES PCB Layout створено електричну принципову схему, друковану плату та складальне креслення, які наведені в додатках

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Магістерська кваліфікаційна робота за темою «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» відноситься до науково-технічних робіт, які орієнтовані на виведення на ринок (або рішення про виведення науково-технічної розробки на ринок може бути прийнято у процесі проведення самої роботи), тобто коли відбувається так звана комерціалізація науково-технічної розробки. Цей напрямок є пріоритетним, оскільки результатами розробки можуть користуватися інші споживачі, отримуючи при цьому певний економічний ефект. Але для цього потрібно знайти потенційного інвестора, який би взявся за реалізацію цього проекту і переконати його в економічній доцільності такого кроку.

Для наведеного випадку нами мають бути виконані такі етапи робіт:

- 1) проведено комерційний аудит науково-технічної розробки, тобто встановлення її науково-технічного рівня та комерційного потенціалу;
- 2) розраховано витрати на здійснення науково-технічної розробки;
- 3) розрахована економічна ефективність науково-технічної розробки у випадку її впровадження і комерціалізації потенційним інвестором і проведено обґрунтування економічної доцільності комерціалізації потенційним інвестором.

4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 4.1 [41].

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					

Продовження таблиця 4.1

8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовують ся у військово промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	5	5	5
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	2	2	2
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	4	3	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	3	3	3
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	2	2
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	4	4	4
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	5	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	4	4
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	4	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	4	3	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	3	3
Сума балів	42	41	41
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	41,3		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 4.3 [41].

Таблиця 4.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів $СБ_c$, розрахована на основі висновків	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» становить 41,3 бала, що, відповідно до таблиці 4.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

4.2 Визначення рівня конкурентоспроможності розробки

В процесі визначення економічної ефективності науково-технічної розробки також доцільно провести прогноз рівня її конкурентоспроможності за сукупністю параметрів, що підлягають оцінюванню.

Одиничний параметричний індекс розраховуємо за формулою [41]

$$q_i = \frac{P_i}{P_{\text{базі}}} \quad (4.1)$$

де q_i – одиничний параметричний індекс, розрахований за i -м параметром;

P_i – значення i -го параметра виробу;

$P_{\text{базі}}$ – аналогічний параметр базового виробу-аналога, з яким проводиться порівняння.

Загальні технічні та економічні характеристики розробки представлено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Основні техніко-економічні показники аналога та розробки, що проектується

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Обсяг Flash-пам'яті	кБ	16	32	2	0,25
Тактова частота	МГц	8	16	2	0,12

Продовження таблиця 4.4

Діапазон визначення вологості	од.	70	90	1,28	0,15
Напруга живлення	В	12	5	1,5	0,3
Діапазон визначення температури	од.	50	60	1,2	0,18
Експлуатаційні витрати	грн	60	60	1	0,45
Ціна (тарифний план)	грн	500	350	0,7	0,55

Нормативні параметри оцінюємо показником, який отримує одне з двох значень: 1 – пристрій відповідає нормам і стандартам; 0 – не відповідає.

Груповий показник конкурентоспроможності за нормативними параметрами розраховуємо як добуток частинних показників за кожним параметром за формулою [41]

$$I_{HP} = \prod_{i=1}^n q_i, \quad (4.2)$$

де I_{HP} – загальний показник конкурентоспроможності за нормативними параметрами;

q_i – одиничний (частинний) показник за i -м нормативним параметром;

n – кількість нормативних параметрів, які підлягають оцінюванню.

За нормативними параметрами розроблюваний пристрій відповідає вимогам ДСТУ, тому $I_{HP} = 1$.

Значення групового параметричного індексу за технічними параметрами визначаємо з урахуванням вагомості (частки) кожного параметра [41]

$$I_{TP} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (4.3)$$

де I_{TP} – груповий параметричний індекс за технічними показниками (порівняно з виробом-аналогом);

q_i – одиничний параметричний показник i -го параметра;

α_i – вагомість i -го параметричного показника, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$;

n – кількість технічних параметрів, за якими оцінюється конкурентоспроможність.

Проведемо аналіз параметрів згідно даних таблиці 4.4.

$$I_{mn} = 2 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,12 + 1,28 \cdot 0,15 + 1,5 \cdot 0,3 + 1,2 \cdot 0,18 = 1,60.$$

Груповий параметричний індекс за економічними параметрами розраховуємо за формулою [41]

$$I_{EP} = \sum_{i=1}^m q_i \cdot \beta_i, \quad (4.4)$$

де I_{EP} – груповий параметричний індекс за економічними показниками;

q_i – економічний параметр i -го виду;

β_i – частка i -го економічного параметра, $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$;

m – кількість економічних параметрів, за якими здійснюється оцінювання.

Проведемо аналіз параметрів згідно даних таблиці .

$$I_{EP} = 1 \cdot 0,45 + 0,7 \cdot 0,55 = 0,84.$$

На основі групових параметричних індексів за нормативними, технічними та економічними показниками розрахуємо інтегральний показник конкурентоспроможності за формулою [41]

$$K_{INT} = I_{HP} \cdot \frac{I_{TP}}{I_{EP}}, \quad (4.5)$$

$$K_{INT} = 1 \cdot 1,60 / 0,84 = 1,91.$$

Інтегральний показник конкурентоспроможності $K_{INT} > 1$, отже розробка переважає відомі аналоги за своїми техніко-економічними показниками.

4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [42]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.6)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн);

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=24$ дні.

$$Z_o = 12000,00 \cdot 24 / 24 = 12000,00 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	12000,00	500,00	24	12000,00
Інженер-розробник мікро та наносистемної техніки	11500,00	479,17	14	6708,33
Інженер-проектувальник елетронних компонентів	10200,00	425,00	10	4250,00
Технік	7200,00	300,00	5	1500,00
Всього				24458,33

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.7)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.8)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=2379,00$ (грн);

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [42];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 24$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 2379,00 \cdot 1,10 \cdot 1,65 / (24 \cdot 8) = 22,49 \text{ (грн)}.$$

$$Z_{p1} = 22,49 \cdot 8,00 = 179,91 \text{ (грн)}.$$

Таблиця 4.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн

Продовження таблиця 4.6

Установка офісного обладнання	8,00	2	1,10	22,49	179,91
Підготовка робочого місця розробника мікро- та наносистемної техніки	4,00	2	1,10	22,49	89,96
Інсталяція програмного забезпечення моделювання електронних пристроїв	5,00	5	1,70	34,76	173,78
Формування бази даних досліджень	10,00	4	1,50	30,67	306,67
Тренування системи	3,50	3	1,35	27,60	96,60
Налагодження електронних блоків	4,50	6	2,00	40,89	184,00
Тестування пристрою	7,00	4	1,50	30,67	214,67
Всього					1429,99

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (4.9)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (24458,33 + 1429,99) \cdot 10 / 100\% = 2588,83 \text{ (грн)}.$$

4.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доо}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (4.10)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (24458,33 + 1429,99 + 2588,83) \cdot 22 / 100\% = 6264,97 \text{ (грн)}.$$

Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом».

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.11)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 2,00 \cdot 130,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 286,00 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір CARBONIX Ultra	130,00	2,00	0,000	0,00	286,00
Папір для записів CARBONIX Light A5	65,00	3,00	0,000	0,00	214,50

Продовження таблиця 4.7

Органайзер офісний CARBONIX OFFICE	175,00	2,00	0,000	0,00	385,00
Канцелярське приладдя (набір офісного працівника)	205,00	4,00	0,000	0,00	902,00
Картридж для принтера Canon LBP6000	1020,00	1,00	0,000	0,00	1122,00
Диск оптичний NewVybir CD-R	13,25	3,00	0,000	0,00	43,73
Flesh-пам'ять Kingston 32 GB	225,00	1,00	0,000	0,00	247,50
Тека для паперів CARBONIX BOX-ZX	115,00	2,00	0,000	0,00	253,00
Всього					3453,73

Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.12)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$K_6 = 1 \cdot 34,00 \cdot 1,1 = 37,40$ (грн).

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Плата пристрою	1	34,00	37,40
LM317	3	22,00	72,60
Світлодіод	1	12,00	13,20
Роз'єми SIL-100-01	3	2,50	8,25
Ресистор 10 КОм	3	1,50	4,95
Ресистор 4.7 Ом	1	1,20	1,32
Конденсатор 2,2мкФ	5	1,15	6,33
Ресистор 39 Ом	1	1,25	1,38
Конденсатор 0.68мкФ	3	0,85	2,81
Роз'єми SIL-100-03	9	6,25	61,88
Ресистор 680 Ом	1	1,10	1,21
АТmega328 Мікроконтролер	1	75,00	82,50
Всього			293,81

Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (4.13)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 12800,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 14080,00 \text{ (грн)}.$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання спеціалізованого обладнання по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Метрологічний комплекс МКВТ-1246	1	12800,00	14080,00
Всього			14080,00

Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инпр}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (4.14)$$

де $C_{\text{инпр}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 7264,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 7990,40 \text{ (грн)}.$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Середовище математичного інженерного моделювання Matchcad 15	1	7264,00	7990,40
Всього			7990,40

Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_е} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.15)$$

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_е$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (26800,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 1116,67 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер розробника мікро- та наносистемної техніки	26800,00	2	1	1116,67
Персональний комп'ютер інженера-розробника електронних компонент	25342,00	2	1	1055,92

Продовження таблиця 4.11

Оргтехніка	8150,00	5	1	135,83
Приміщення дослідної лабораторії	326000,00	4	1	6791,67
ОС Windows 10	5720,00	25	1	19,07
Прикладний пакет Microsoft Office 2016	5142,00	2	1	214,25
Прикладний пакет Microsoft Office 2016	5132,00	2	1	213,83
Всього				9547,23

Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.16)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 4,50$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,45 \cdot 164,0 \cdot 4,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 332,10 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер розробника мікро- та наносистемної техніки	0,45	164,0	332,10
Персональний комп'ютер інженера-розробника електронних компонент	0,25	160,0	180,00
Оргтехніка	0,75	10,0	33,75
Метрологічний комплекс МКВТ-1246	0,25	24,0	27,00
Всього			572,85

Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.17)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (24458,33 + 1429,99) \cdot 20 / 100\% = 5177,67 \text{ (грн)}.$$

4.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.18)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (24458,33 + 1429,99) \cdot 30 / 100\% = 7766,50 \text{ (грн)}.$$

Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.19)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 50\%$.

$$I_e = (24458,33 + 1429,99) \cdot 50 / 100\% = 12944,16 \text{ (грн)}.$$

4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.20)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (24458,33 + 1429,99) \cdot 100 / 100\% = 25888,33 \text{ (грн)}.$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{дод} + Z_n + M + K_e + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сн} + I_e + B_{нзв}. \quad (4.21)$$

$B_{заг} = 24458,33 + 1429,99 + 2588,83 + 6264,974909 + 3453,73 + 293,81 + 14080,00 + 7990,40 + 9547,23 + 572,85 + 5177,67 + 7766,50 + 12944,16 + 25888,33 = 122456,80$ (грн).

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.22)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,95$.

$$ZB = 122456,80 / 0,95 = 128901,90 \text{ (грн)}.$$

4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	780	1100	850	500

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 11000 осіб;

$C_б$ – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 300,00 (грн);

$\pm\Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 50,00 грн.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta\Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [41]

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho}{100}\right), \quad (4.23)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2021 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).
Прийmemo $\rho = 35\%$;

ρ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2021 році $\rho = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року

$$\Delta\Pi_1 = (50,00 \cdot 11000,00 + 350,00 \cdot 780) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 196046,83 \text{ (грн)}.$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року

$$\Delta\Pi_2 = (50,00 \cdot 11000,00 + 350,00 \cdot 1880) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 287757,68 \text{ (грн)}.$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року

$$\Delta\Pi_3 = (50,00 \cdot 11000,00 + 350,00 \cdot 2730) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 358625,16 \text{ (грн)}.$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року

$$\Delta\Pi_4 = (50,00 \cdot 11000,00 + 350,00 \cdot 3230) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 400311,91 \text{ (грн)}.$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків $ПП$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (4.24)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,15$;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} III &= 196046,83/(1+0,15)^1 + 287757,68/(1+0,15)^2 + 358625,16/(1+0,15)^3 + \\ &+ 400311,91/(1+0,15)^4 = 170475,50 + 217586,15 + 235801,86 + 228879,63 = 852743,14 \\ &\text{грн.} \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (4.25)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв} = 2$;

$3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 128901,90 грн.

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 128901,90 = 257803,80 \text{ (грн).}$$

Абсолютний економічний ефект $E_{абс}$ для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме

$$E_{абс} = III - PV \quad (4.26)$$

де III – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 852743,14 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 257803,80 грн.

$$E_{абс} = III - PV = 852743,14 - 257803,80 = 594939,35 \text{ (грн).}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій $E_г$, які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$E_g = \sqrt[T_{жс}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (4.27)$$

де $E_{абс}$ – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 594939,35 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 257803,80 грн;

$T_{жс}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримування позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_g = \sqrt[4]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 = (1 + 594939,35 / 257803,80)^{1/4} = 0,35.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій $\tau_{мін}$

$$\tau_{мін} = d + f, \quad (4.28)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2021 році в Україні $d = 0,1$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийmemo 0,25.

$\tau_{мін} = 0,1 + 0,25 = 0,35 < 0,35$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_g , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{ок}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (4.29)$$

де E_g – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 0,35 = 2,87 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Висновки до розділу

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом» становить 41,3 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

При оцінюванні рівня конкурентоспроможності, згідно узагальненого коефіцієнту конкурентоспроможності розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,91 рази.

Також термін окупності становить 2,87 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом».

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Основне завдання охорони праці – мінімізація вірогідності виникнення захворювань та виробничого травматизму під час забезпечення регламентованих параметрів умов праці.

В цьому розділі проводиться розгляд небезпечних, шкідливих та уражаючих для людини та оточуючого довкілля факторів, які виникають під час проведення розробки мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом. Тут розглядаються, зокрема, технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці, визначення кількості вогнегасників, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки, безпека у надзвичайних ситуаціях.

В процесі розробки даного пристрою на працюючих впливають ті чи інші небезпечні і шкідливі виробничі фактори (НШВФ) фізичної та психофізіологічної груп згідно [94].

Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори: понижена або підвищена температура повітря робочої зони, підвищений рівень шуму на робочому місці, підвищений рівень статичної електрики, відсутність або недостатність природного освітлення, недостатня освітленість робочої зони, пряма або відбита блискучість, підвищена яскравість світла.

Психофізіологічні НШВФ: нервово-психічні перевантаження: розумове перенапруження, монотонність праці, перенапруження аналізаторів.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

5.1.1 Безпека щодо організації робочих місць

Конструкція робочого місця, взаємне розташування його елементів та його розміри повинні відповідати антропометричним, фізіологічним та психофізіологічним характеристикам людини, а також характеру праці [97]. Площа, на якій розташовується одне робоче місце для обслуговуючого персоналу, має становити не менше $6,0 \text{ м}^2$, об'єм приміщення – не менше ніж 20 м^3 , висота – не менше $3,2 \text{ м}$ [98].

Кольорове оздоблення інтер'єру приміщення повинно відповідати вказівкам з проектування кольорової обробки інтер'єрів приміщень будівель промислових підприємств. Поверхня підлоги повинна бути рівною, без вибоїн, не слизькою, зручною для вологого прибирання, мати антистатичні властивості.

Не дозволяється застосовувати під час оснащення інтер'єру полімерні матеріали, які забруднюють повітря шкідливими хімічними речовинами та сполуками.

До самостійної роботи з мікроелектронним сенсором вологості з частотним виходом мають допуск особи, які досягли віку 18 років, вивчили інструкцію з охорони праці при роботі з мікроелектронним сенсором вологості з частотним виходом, пройшли відповідну підготовку, інструктаж з охорони праці, обов'язковий медичний огляд та не мають будь-яких протипоказань за станом здоров'я.

Працівник, виконуючий роботу з мікроелектронним сенсором вологості, повинен дотримуватися правил внутрішнього трудового розпорядку закладу, а також встановлені режими праці та відпочинку. Під час роботи з мікроелектронним сенсором вологості можливий вплив на людину наступних небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- травми та різні пошкодження рук у разі дотику до обертових, рухомих частин багатофункціонального мікроелектронний сенсор вологості а;
- ураження електричним струмом при несправному заземленні корпусу мікроелектронний сенсор вологості а та відсутності діелектричного килимка.

Під час роботи з мікроелектронними сенсорами вологості з частотним виходом повинен застосовуватися наступний спецодяг та засоби індивідуального захисту: халат, фартух бавовняний, головний убір (косинка або ковпак), діелектричний килимок.

На харчоблоці докільного навчального закладу обов'язково повинна бути медична аптечка, повністю укомплектована всіма необхідними препаратами та перев'язувальними засобами для надання першої невідкладної медичної допомоги постраждалим у разі отримання травми.

Працюючий з мікроелектронним сенсором вологості з частотним виходом зобов'язаний суворо дотримуватися правил протипожежної безпеки, знати та вміти швидко знаходити місця розташування первинних засобів пожежогасіння.

Харчоблок закладу повинен бути забезпечений первинними засобами пожежогасіння: вогнегасником вуглекислотним або порошковим.

При нещасному випадку потерпілий або очевидець зобов'язаний терміново сповістити про це безпосереднього керівника та адміністрацію навчального закладу. У разі будь-якої несправності багатофункціонального мікроелектронний сенсор вологості а, слід негайно зупинити роботу та доповісти про це адміністрації навчального закладу.

У процесі роботи з мікроелектронним сенсором вологості з частотним виходом необхідно дотримуватися правил носіння спецодягу, користування засобами індивідуального та колективного захисту, а також дотримуватися правил особистої гігієни та утримувати в належній чистоті своє робоче місце. Робітники, які допустили невиконання або порушення *інструкції з охорони праці при роботі з мікроелектронним сенсором вологості з частотним виходом*, притягаються до дисциплінарної відповідальності у відповідності до Правил внутрішнього трудового розпорядку навчального закладу і, за необхідності, підлягають позачерговій перевірці знань, норм і правил охорони праці.

5.2 Технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці

5.2.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Визначаємо для приміщення, де проводяться роботи з розробки мікропроцесорного пристрою зчитування інформації радіочастотним методом, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Ia. Відповідно до [25] допустимі параметри мікроклімату в робочій зоні для холодного та теплого періодів року наведені в таблиці X.1 додатку X. Перепад температури повітря вздовж висоти робочої зони для всіх категорій робіт дозволяється до 3°C. При опроміненні менше 25% поверхні тіла працівника, нормована інтенсивність теплового опромінення – 100 Вт/м².

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК), які використовуються при проектуванні виробничих приміщень (будівель), обладнання, технологічних процесів, вентиляцій, для контролю за якістю виробничого середовища. ГДК шкідливих речовин, що використовуються у даному виробничому приміщенні наведено в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

З метою забезпечення нормованих параметрів мікроклімату і чистоти повітря робочої зони передбачено такі заходи: у приміщенні повинна бути встановлена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів року; для підвищення вологості повітря слід розташовувати місткості з водою за типом акваріумів поблизу опалювальних приладів або використовувати зволожувачі; припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

5.2.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях значні вимоги пред'являються щодо кількісних та якісних показників освітлення. З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, де проводяться роботи з розробки мікропроцесорного пристрою зчитування інформації радіочастотним методом, відповідно до [26] знаходимо, що вони відповідають III розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд г. Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості для штучного освітлення приведені в таблиці X.3 додатку X. Оскільки приміщення знаходиться в місті Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а світлові проєми орієнтовані за азимутом 225° , то за таких умов КЕО визначатиметься за формулою [3, 4]

$$e_N = e_n m_N [\%], \quad (5.1)$$

де e_n – табличне значення КПО, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – номер групи забезпеченості природним світлом.

За відомими значеннями одержимо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення

$$e_{N,b} = 2 \cdot 0,85 = 1,7 (\%);$$

$$e_{N,c} = 1,2 \cdot 0,85 = 1,02 (\%).$$

Для встановлення нормованих значень показників освітлення запропоновано такі заходи: 1) при недостатньому природному освітленні в світлу пору доби доповнення штучним за допомогою люмінесцентних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення; 2) використання штучного освітлення в темну пору доби.

5.2.3 Виробничий шум

Зважаючи на те, що при експлуатації пристроїв крім усього іншого устаткування використовується обладнання, робота якого генерує шум та вібрацію такі як: асинхронні двигуни, 3D принтер компресор, ручний електроінструмент тому необхідно передбачити захист від шуму та вібрації. Визначено, що приміщення, де проводиться робота з розробки мікропроцесорного пристрою зчитування інформації радіочастотним методом може містити робочі місця із шумом та вібрацією, який виходить від сусідніх промислових приміщень. Для запобігання травмуванню працюючих під дією шуму та вібрації вони підлягає нормуванню. Основним документом стосовно виробничого шуму, діючим на території нашої країни, є [27], згідно з яким допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в виробничих приміщеннях не повинні перевищувати значень, що приведені у таблиці 5.1

Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 5.1

Категорії напруженості праці	Категорії важкості праці			
	Легка I	Середньої важкості II	Важка III	Дуже важка IV
Малонапружена I	80	80	75	75
Помірно напружена II	70	70	65	65
Напружена III	60	60	—	—
Дуже напружена IV	50	50	—	—

Для 2-ї категорії забезпечення допустимих параметрів віброакустичних коливань в приміщенні передбачено такі заходи: завчасне здійснення профілактичного ремонту; використання в конструкціях обладнання акустичних екранів та звуко- та віброізоляційних кожухів.

5.2.4 Виробничі випромінювання

Під час виконання роботи із використанням ПК на працівника діє підвищений рівень електромагнітного поля. Випромінювання ПК можуть бути

небезпечними для здоров'я. Низькочастотні поля при тривалому опроміненні сидять біля ПК людей можуть привести до порушень фізіологічних процесів.

Монітор ПК є джерелом електростатичного поля; слабких електромагнітних випромінювань в низькочастотному і високочастотному діапазонах (2 гц – 400кГц); ультрафіолетового проміння; інфрачервоних променів; випромінювання видимого діапазону.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань на робочому місці проектувальника спального корпусу санаторію реабілітації залізничників в м. Літин Вінницької області наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	20кВ/м
для дорослих користувачів	
для дітей дошкільних установ і що вчатьс	15кВ/м
середніх спеціальних і вищих учбових закладів	

Для зменшення впливу електромагнітного випромінювання на проектувальника слід дотримуватися раціонального режиму роботи та відпочинку.

5.3 Психофізіологічні фактори

Оцінка психофізіологічних факторів під час проектування мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом здійснюється відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Загальні енергозатрати організму: до 170 Вт.

Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну): до 30 000.

Робоча поза: вільна зручна поза, можливість зміни пози («сидячи – стоячи») за бажанням працівника; перебування в позі «стоячи» до 35% часу зміни.

Нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну: до 60 раз.

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

– зміст роботи – творча діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму;

– сприймання інформації та їх оцінка – сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальними значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів;

– розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, виконання завдання та його перевірка.

Сенсорні навантаження:

– зосередження (% за зміну) – до 20-75%;

– щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 160;

– навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 40 до 70 %;

– спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) – 5-6 год.

– навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 16 до 20.

Емоційне навантаження:

ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Режим праці:

– тривалість робочого дня – більше 8 год;

– змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

За зазначеними показниками важкості та напруженості праці, робота, яка виконується належить до допустимого класу умов праці (напруженість праці середнього ступеня).

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Метою класифікації надзвичайних ситуацій (НС) є створення ефективного механізму оцінювання події, що відбулася або може відбутися у прогнозований термін, та визначення ступеня реагування на відповідному рівні управління.

Джерелами іонізуючих випромінювань є радіоактивні елементи і їх ізотопи, ядерні реактори, прискорювачі заряджених частинок та ін. рентгенівські установки і високовольтні джерела постійного струму відносяться до джерел рентгенівського випромінювання.

Для іонізуючих випромінювань на елементну базу електронних пристроїв та систем як правило викликає зміну практично всіх електричних і експлуатаційних характеристик їх елементів. Цей процес залежить від протікання процесів іонізації і порушення структури матеріалів зі зміною перехідних струмів в р-п переходах транзисторів, вольт-амперних характеристик напівпровідникових діодів, опорів транзисторів, ємностей конденсаторів, тощо.

Наслідком дії іонізуючих випромінювань на мікроелектронні сенсори вологості може бути миттєва втрата працездатності при критичних рівнях радіації або розвиток відновлюваних чи не відновлюваних змін через деякий час після радіоактивного зараження при рівнях радіації значно нижчих від критичних.

Дія електромагнітного випромінювання характеризується генерацією дуже короткого (10^{-7} с), але інтенсивного електромагнітного імпульсу, який розповсюджується від джерела з інтенсивністю, що зменшується, у відповідності з теорією електромагнетизму. Цей імпульс енергії створює потужне електромагнітне поле, особливо поблизу джерел виникнення. Поле може бути достатньо сильним, щоб викликати короточасні перенапруження в тисячі вольт в електричних провідниках, таких як контактна проводка або провідні доріжки мікросхем.

Залежно від електромагнітної стійкості електроніки до дії ЕМІ і інтенсивності поля, обладнання може бути необоротно пошкоджене або, іншими словами, електрично знищено. Заподіяне пошкодження мало чим

відрізняється від того, що можна чекати від близького удару блискавки і може потребувати повної заміни елементної бази, або принаймні, їх частин.

Тому мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом використовуються в системах збору і обробки даних, вимірювальних системах, системах промислового контролю і можуть бути потенційно уразливі до дії ЕМІ.

Дослідження безпеки роботи мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом в умовах дії іонізуючих випромінювань

Критерієм, що визначає працездатність мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом в умовах дії іонізуючих випромінювань є максимальне значення потужності дози в умовах експлуатації, яка може зумовити виникнення зміни параметрів елементної бази блоків мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом а не порушуючи його працездатність в цілому.

Найбільш уразливими елементами мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом до дії іонізуючих випромінювань є діелектричні матеріали, тому значення потужності дози гамма-випромінювання, що викликає початок зворотних змін для мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом складає $P_{гр}=10^4$ Р/год. Елементами без яких неможливе нормальне функціонування блоків мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом є: транзистори, резистори, конденсатори, діелектричні матеріали, індуктивні елементи та напівпровідники, граничні значення інтенсивності іонізуючого випромінювання яких наведені в табл. 4.6.

Таблиця 5.6 – Визначення допустимої потужності іонізуючих випромінювань мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом

Елементи і матеріали блоків сенсора	Потужності дози, що викликає початок зворотних змін в елементах сенсора	Мінімальна потужності дози, що викликає початок зворотних змін в сенсорі в цілому, $P_{зв}$ Р/с
Транзистори КТ3156	10^5	10^4
Конденсатори К73-17	10^5	
Резистори CF-50	10^6	
Діелектричні матеріали 1564ТЛ2, ADM242,	10^4	

ADM1818

Граничне значення потужності дози іонізуючого випромінювання визначаємо за формулою

$$P_{zp} = P_{zv} \cdot K_{noc} \cdot K_{над} [P/\text{год.}],$$

де $K_{noc} = 1$ – коефіцієнт послаблення радіації (мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом використовуються на відкритому повітрі);
 $K_{над} = 0,9 \dots 0,95$ – коефіцієнт надійності роботи мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом.

Тоді

$$P_{zp} = 10^4 \cdot 0,95 = 9,5 \cdot 10^3 (P/\text{год}).$$

Здійснений розрахунок дає змогу зробити висновок про те, що миттєва втрата працездатності мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом можлива в разі його перебування в умовах дії іонізуючих випромінювань інтенсивністю більше $9,5 \cdot 10^3$ (P/год).

Дослідження безпеки роботи мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом в умовах дії електромагнітного імпульсу

Для визначення області працездатності мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом в умовах дії електромагнітного імпульсу можна використати коефіцієнт безпеки

$$K_B = 20 \lg \frac{U_D}{U_{B(\Gamma)}} [дБ],$$

де U_D – допустиме коливання напруги живлення, В;

$U_{B(\Gamma)}$ – напруга наведена електромагнітними випромінюваннями, відповідно, у вертикальних чи горизонтальних струмопровідних частинах мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом, В.

Розрахунок гранично допустимого значення вертикальної складової напруженості електричного поля, як складової частини електромагнітного поля, доцільно провести виходячи з умови, що $K_{B\min} = 40$ (дБ).

Допустиме коливання напруги живлення мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N = 5 + \frac{5}{100} \cdot 12 = 5,1 \text{ (В)},$$

де $U_{\text{ж}}=5$ В- напруга живлення мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом;

$N=12\%$ - допустимі відхилення напруги, %.

Максимальна довжина струмопровідних частин блоків мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом в горизонтальній площині становить $l_{\text{г}}=0,1$ м.

Максимально допустиме значення наведеної електромагнітним полем напруги в горизонтальних струмопровідних частинах визначається з рівняння

$$K_{\text{БГ}} = 201\text{г} \frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{г}}},$$

Тоді

$$40 = 201\text{г} \frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{г}}},$$

$$\frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{г}}} = 10^{\frac{40}{20}},$$

$$U_{\text{г}} \frac{U_{\text{д}}}{10^{\frac{40}{20}}} = \frac{5,1}{100} = 0,051 \text{ (В)}.$$

Отже в даному розділі було розглянуто вплив двох небезпечних та шкідливих факторів на підставі розрахунків ми можемо зробити наступні висновки, що розроблений мікроелектронний сенсор вологості з частотним виходом може працювати при максимально допустимому значенні електромагнітного поля напруженістю 0,051 (В), а також миттєва втрата працездатності мікроелектронних сенсорів вологості з частотним виходом можлива в разі його перебування в умовах дії іонізуючих випромінювань інтенсивністю більше $9,5 \cdot 10^3$ (Р/год).

ВИСНОВКИ

1. В першому розділі В даній магістерській кваліфікаційній роботі було проведено огляд існуючих на теперішній час методи визначення параметрів вологості природного газу, як основного показника його якості, та стан їх реалізації в технічних засобах не забезпечують необхідної точності при проведенні вимірювань в автоматичному режимі внаслідок впливу на результат вимірювання домішок різної природи, які входять до складу природного газу.

За результатами проведеного аналізу стану забезпечення визначення параметрів вологості природного газу встановлено, що у газопромисловій практиці, частіше, як показник вологості, використовують значення температури точки роси вологи – температури початку конденсації (кристалізації) пари вологи, яка є присутньою в складі газу при визначеному тиску. Нормативними документами, в більшості, регламентуються саме значення температури точки роси вологи з огляду на їх найбільшу інформативність, крім того, враховуючи багаторічний досвід застосування вимірювального обладнання в умовах виробництва, конденсаційний метод визначено найбільш придатним для застосування.

2. Показано, що підвищення достовірності результатів визначення вологості на основі конденсаційного методу може бути досягнуто шляхом урахування впливу домішок, які входять до складу природного газу, на результати ідентифікації процесу конденсації (кристалізації) вологи. Актуальність проведення досліджень сформульовано з огляду на необхідність створення нового методу ідентифікації конденсованих компонентів використаного в сучасній вимірювальній системі, яка здатна працювати в автоматичному режимі за умов наявності в складі природного газу технологічних та інших домішок, та забезпечувати при цьому достовірне визначення вмісту вологи в природному газі із задовільною для практики точністю є актуальною.

Розглянуто методи засновані на сорбції водяної пари. Розглянуто основні прилади вимірювання вологості газів такі як гігрометр та психометр, також було проаналізовано основні датчики вологості газів та принципи їх дії.

3. Розроблено структурну схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом та описано призначення її основних компонентів. Розроблено на базі структурної електричну схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом та описано принцип її роботи. Розроблено блок-схему алгоритму роботи мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом.

Промодельовано розроблену електричну схему в різних режимах роботи, що підтверджує можливість застосування даної схеми на практиці.

4. Виконано розрахунок параметрів друкованої плати та обрано її тип – двостороння. Цей тип характеризується високими комутаційними властивостями, підвищеною міцністю з'єднань виводів навісних елементів з рисунком плати, високою щільністю розташування електронних компонентів та низькою вартістю.

Обрано матеріал друкованої плати – двосторонній фольгований склотекстоліт марки СФ-2-35-1,5 ТУ16-503.271-86 (ГОСТ 10316 – 78), який має товщину 1,5 мм. Для даного типу плати проведено розрахунок ширини друкованих провідників.

Використовуючи ARES PCB Layout створено проект та проведено моделювання пристрою. На основі проектів ISIS Proteus та ARES PCB Layout створено електричну принципову схему, друковану плату та складальне креслення, які наведені в додатках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Класифікація вологості газу — [Електронний ресурс] — Режим доступу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/145/253/284-1?inline=1>— назва з екрану.
2. Методи та прилади для вимірювання вологості— [Електронний ресурс] — Режим доступу <https://studfile.net/preview/5674234/>— назва з екрану.
3. Визначення вологості газу — [Електронний ресурс] — Режим доступу <https://steklopribor.com/p/blog/16/> назва з екрану.
4. Датчики вологості — [Електронний ресурс] — Режим доступу https://uareferat.com/%D0%94%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA%D0%B8_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96
5. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 319 с.
6. Крук І. С. Якість природних газів : довідник / І. С. Крук, О. М. Химко, О. І. Крук. – К.–Х. : НаукаУЦЕБОП, 2010. – 407 с
7. Коряков В. И. Приборы в системах контроля влажности твердых веществ и их метрологические характеристики / В. И. Коряков, А. С. Запорожец // Практика приборостроения. – 2002. – № 1. – С. 5–11.
8. Ивченко Ю. А. Чем измерить влажность? / Ю. А. Ивченко, А. А. Федоров // Датчики и системы. – 2003. – № 8. – С. 53–54.
9. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Н. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
10. Ничуговский Г. Ф. Определение влажности химических веществ / Г. Ф. Ничуговский. – Л. : Химия, 1977. – 200 с.
11. Онушко В. В. Універсальна класифікація оптичних методів дослідження густини газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, В. В. Онушко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2100. – № 4. – С. 23–26. – ISSN 2226–9150.

12. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги : ГОСТ 20060-83. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 10 с.
13. Уоррэл Р. Психрометрическое определение относительной влажности воздуха при температуре, превышающей 100 °С / Р. Уоррэл. – Л. : Гидрометеиздат. – 1967. – 300 с. 10. Берлинер М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия. – 1973. – 400 с.
14. Бекиров Т. М. Основные положения отраслевого стандарта / Т. М. Бекиров // Газовая промышленность. – 1994. – № 7. – С. 24 – 26.
15. Зайцев В. А. Влажность воздуха и ее измерение / В. А. Зайцев, А. А. Ледохович, Г. Т. Никандрова. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 112 с.
16. Білінський Й. Й. Класифікація оптичних методів дослідження фізико-хімічних параметрів газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, В. В. Онушко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 2. – С. 52–56. – ISSN 2219–9365.
17. Плотников В. В. Контроль состава и качества природного газа / В. В. Плотников, В. А. Подрешетников. – Л. : Недра. – 1983. – 345 с.
18. Соков И. А. Метрологическое обеспечение гигрометрии / И. А. Соков. – М. : Госстандарт СССР, (Обз. инф. Госстандарта СССР, вып.1), 1987. – 56 с.
19. Конверсия и новые возможности измерения влажности в трубопроводах / [Д. Л. Рогожинский, Ю. С. Гангнус, Ю. А. Малоземов, и др.] // Газовая промышленность. – № 10. – 1991. – С. 16–17.
20. Schmidt T. Natural Gas Treatment: Simultaneous Water and Hydrocarbon-Dew Point Control / T. Schmidt, D. Rennemann, T. Shulz // Wissenschaft&Technic. – Bd. 46, Heft 10. – 1993. – P. 366–374.
21. Медведев А. В. Печатные платы. Конструкции и материалы: монография / А. В. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
22. Основы проектирования электронных средств. Часть 1: Учебное пособие / Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В./ - 2011г. – 368 с.
23. Proteus. Редактор ISIS [Электронный ресурс] // radio-hobby. – Режим доступ: <http://radio-hobby.org/modules/instruction/instr.php?id=15>
24. Вихревые аппараты / А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.
25. Андрійшин С. О. Вимірювання витрат та кількості газу : довідник / М. П. Андрійшин, С. О. Каневський, О. М. Карпаш [та ін.]. – Івано-Франківськ : Сімик, 2004. – 160 с.

26. ГОСТ 5542-87 Газ горючий природный для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. Госстандарт России (01.01.1988). – М. : ИПК Издательство стандартов, 2000 ; 2004.
27. Артемьев Б. Г. Справочное пособие для работников метрологических служб : в 2 кн. / Б. Г. Артемьев, С. М. Голубев. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 478 с.
28. Базлов М. Н. Подготовка природного газа и конденсата к транспорту / М. Н. Базлов, А. И. Жуков, Т. С. Алексеев. – М. : Недра, 1968. – 215 с.
29. Gritsenko A. I. Gathering and Conditioning of Gas on the Northern Gas Fields of Russia / Gritsenko A. I., Istomin V. A., Kulkov A. N., R. S. Suleimanov. – Moscow, Nedra Publishing House. – 2009. – P. 476.
30. Временные технические условия (ВТУ) на природные и нефтяные газы, предназначенные к транспорту по магистральным газопроводам / Всесоюзный научно-исследовательский институт газа. – М., 1968.
31. Птиманжен Ж. Кондиционирование природного газа / Ж. Птиманжен / International Gas Union. – 1964.
32. Ахмедов Т. Использование непараметрических критериев статистики Уилкоксона и Миллера в медико-биологических исследованиях. Основы факторного анализа : методические рекомендации / Т. Ахмедов. – Харьков, 1987. – С. 11-29.
33. Базлов М. Н. Подготовка природного газа и конденсата к транспорту / М. Н. Базлов, А. И. Жуков, Т. С. Алексеев. – М. : Недра, 1968. – 215 с.
34. Бекиров Т. М. Сбор и подготовка к транспорту природных газов / Т. М. Бекиров, А. Т. Шаталов. – М. : Недра, 1986. – 261 с.
35. Билинский И. И. Математическая модель анализатора влажности природного газа / И. И. Билинский, В. В. Онушко // Наукові праці ВНТУ. Радиоелектроніка і радіоелектронне апаратостроєння. – № 4. – 2010. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2010_4/2010-4_ru.files/ru/10uybgha_ru.pdf
36. Білінський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й. Й. Білінський, М. В. Юкиш, В. В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 5.

– 2018. – С. 18-22. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nbuuv.gov.ua/portal/natural/vvpi/2010_5/10byytrhd.pdf

37. Гвоздев Б. П. Эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений : справочное пособие / Б. П. Гвоздев, А. И. Гриценко, А. Е. Корнилов. – М.: Недра, 2018. – 575 с.

38. Будзуляк Б. В. Конденсационный гигрометр “КОНГ–Прима–2” / Б. В. Будзуляк, А. М. Деревягин, С. В. Селезнев // Газовая промышленность. – № 7. – 1999. – С. 57-59.

39. Бурдун Г. Д. Справочник по международной системе единиц / Г. Д. Бурдун. – 3-е изд., доп. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 232 с. 17. Вихревые аппараты / А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.

40. Габа А. М. Приборы аналитического контроля компонентов продуктов разделения воздуха / А. М. Габа, А. К. Семчевский, В. П. Пирог // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – № 2. – 2007. – С. 34–36.

41. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

42. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри РТ ВНТУ,
докт.техн.наук, професор
О.В. Осадчук
” 4 ” _____ 10 _____ 2021 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом
08-36.МКР. 001.00.000 ТЗ

Керівник роботи
докт.техн.наук, професор каф. РТ
Осадчук В.С.

Виконавець: ст. гр. МНТ-20м
Кравчук М.С.

Вінниця-2021

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 214 “25 ” 09 2021 року та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “03” вересня 2021 р.

Дата закінчення: “10” грудня 2021 р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Мета роботи

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є підвищення точності вимірювання вологості газів.

Задачі дослідження

- проаналізувати існуючі методи вимірювання вологості газів;
- змоделювати структурну та електричну принципову схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом, провести схемотехнічне моделювання;

Об’єкт дослідження

Об’єктом дослідження є процес перетворення концентрації водяної пари в газі в електричний інформаційний сигнал.

1. Вихревые аппараты / А. Д. Сулов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.
2. Андрійшин С. О. Вимірювання витрат та кількості газу : довідник / М. П. Андрійшин, С. О. Каневський, О. М. Карпаш [та ін.]. – Івано-Франківськ : Сімик, 2004. – 160 с.
3. ГОСТ 5542-87 Газ горючий природный для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. Госстандарт России (01.01.1988). – М. : ИПК Издательство стандартов, 2000 ; 2004.
4. Артемьев Б. Г. Справочное пособие для работников метрологических служб : в 2 кн. / Б. Г. Артемьев, С. М. Голубев. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 478 с.
5. Базлов М. Н. Подготовка природного газа и конденсата к транспорту / М. Н. Базлов, А. И. Жуков, Т. С. Алексеев. – М. : Недра, 1968. – 215 с.

6. Gritsenko A. I. Gathering and Conditioning of Gas on the Northern Gas Fields of Russia / Gritsenko A. I., Istomin V. A., Kulkov A. N., R. S. Suleimanov. – Moscow, Nedra Publishing House. – 1999. – P. 476.
7. Временные технические условия (ВТУ) на природные и нефтяные газы, предназначенные к транспорту по магистральным газопроводам / Всесоюзный научно-исследовательский институт газа. – М., 1968.
8. Птиманжен Ж. Кондиционирование природного газа / Ж. Птиманжен / International Gas Union. – 1964.
9. Ахмедов Т. Использование непараметрических критериев статистики Уилкоксона и Миллера в медико-биологических исследованиях. Основы факторного анализа : методические рекомендации / Т. Ахмедов. – Харьков, 1987. – С. 11-29.
10. Базлов М. Н. Подготовка природного газа и конденсата к транспорту / М. Н. Базлов, А. И. Жуков, Т. С. Алексеев. – М. : Недра, 1968. – 215 с.
11. Бекиров Т. М. Сбор и подготовка к транспорту природных газов / Т. М. Бекиров, А. Т. Шаталов. – М. : Недра, 1986. – 261 с.
12. Билинский И. И. Математическая модель анализатора влажности природного газа / И. И. Билинский, В. В. Онушко // Наукові праці ВНТУ. Радиоелектроніка і радіоелектронне апаратостроєння. – № 4. – 2010. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2010_4/2010-4_ru.files/ru/10yuybgha_ru.pdf
13. Білінський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й. Й. Білінський, М. В. Юкиш, В. В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 5. – 2010. – С. 18-22. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/vvpi/2010_5/10byyrdh.pdf
14. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
15. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки,
студент групи МНТ-20м Кравчук М.С.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

- проаналізувати існуючі методи вимірювання вологості газів;
- змодельовати структурну та електричну принципову схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом, провести схемотехнічне моделювання;

Технічні вимоги

- центральна частота генерації радіосигналів -1,12 ГГц із вихідною потужністю 0,3 мВт (1,45 дБм);
- коефіцієнт корисної дії 7,5%;
- струм живлення 30 мА при напрузі живлення 5 В

6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		Початок	Закінчення		
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження МКР.	03.09.2021	14.09.2021	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів.	15.09.2021	21.09.2021	Аналіз літературних джерел. Підготовлений матеріал основних розділів.	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання.	21.09.2021	25.09.2021	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження теми. Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми.	26.09.2021	09.10.2021	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ. Розділ 1-2. Звіт по переддипломній практиці.

5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	10.10.2021	03.11.2021	Проведені розрахунки та дослідження.	Розділ 3-4.
6.	Розділ моделювання	04.11.2021	12.11.2021	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	13.11.2021	18.11.2021	Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	19.11.2021	24.11.2021	Економічна частина	Розділ 5
9.	Охорона праці (ОП)	25.11.2021	30.11.2021	Частина БЖД	Розділ 6
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.12.2021	08.12.2021	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормконтроль	09.12.2021	12.12.2021	Підпис нормконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання рецензування МКР	13.12.2021	19.12.2021	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	21.12.2021	23.12.2021	Позитивний захист	Протокол ЕК

7. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- проаналізовано існуючі методи вимірювання вологості газів;
- змодельовано структурну та електричну принципову схему

Мікроелектронні сенсори вологості з частотним виходом, проведено схемотехнічне моделювання;

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬСЯ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- проаналізовані існуючі методи вимірювання вологості газів;
- змодельовану структурну та електричну принципову схему мікроелектронного сенсора вологості з частотним виходом, проведене схемотехнічне моделювання;

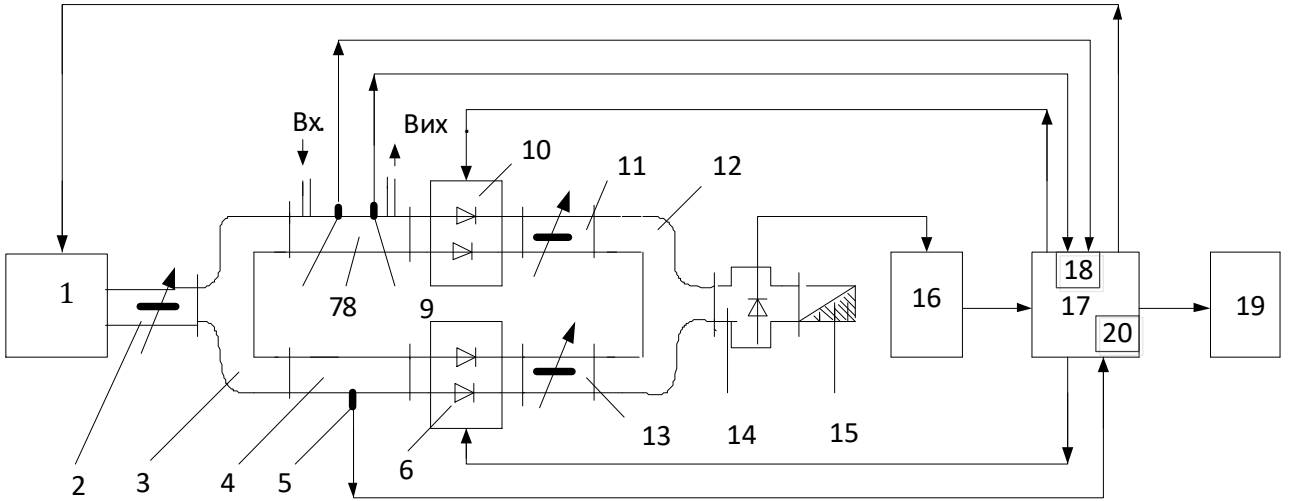
11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов'язковий)

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ
ВИХОДОМ**

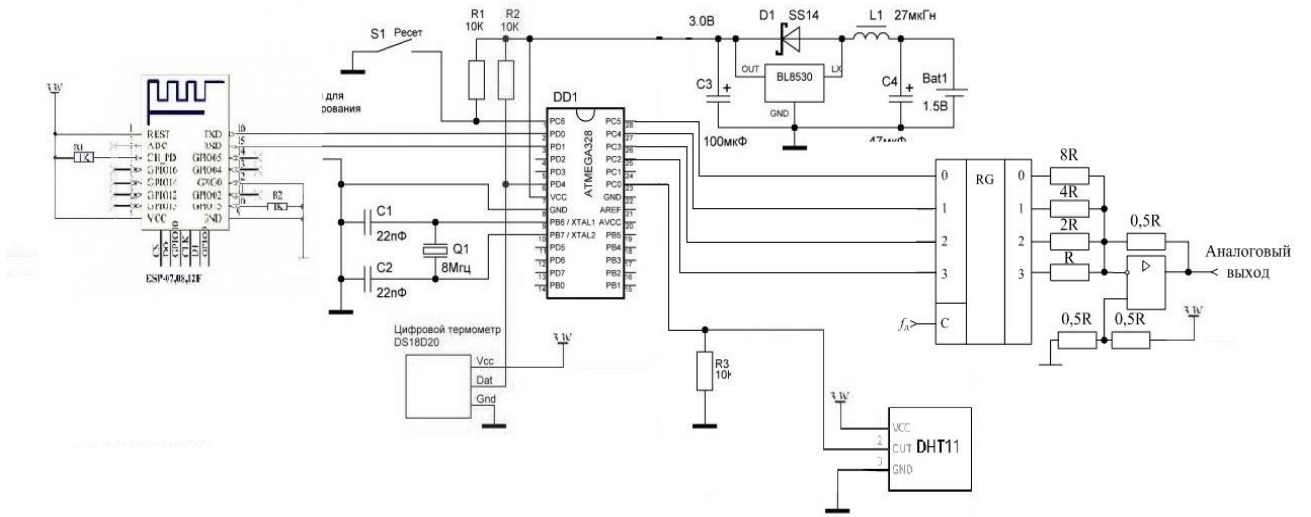
Структурна схема



Додаток В
(обов'язковий)

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ
ВИХОДОМ**

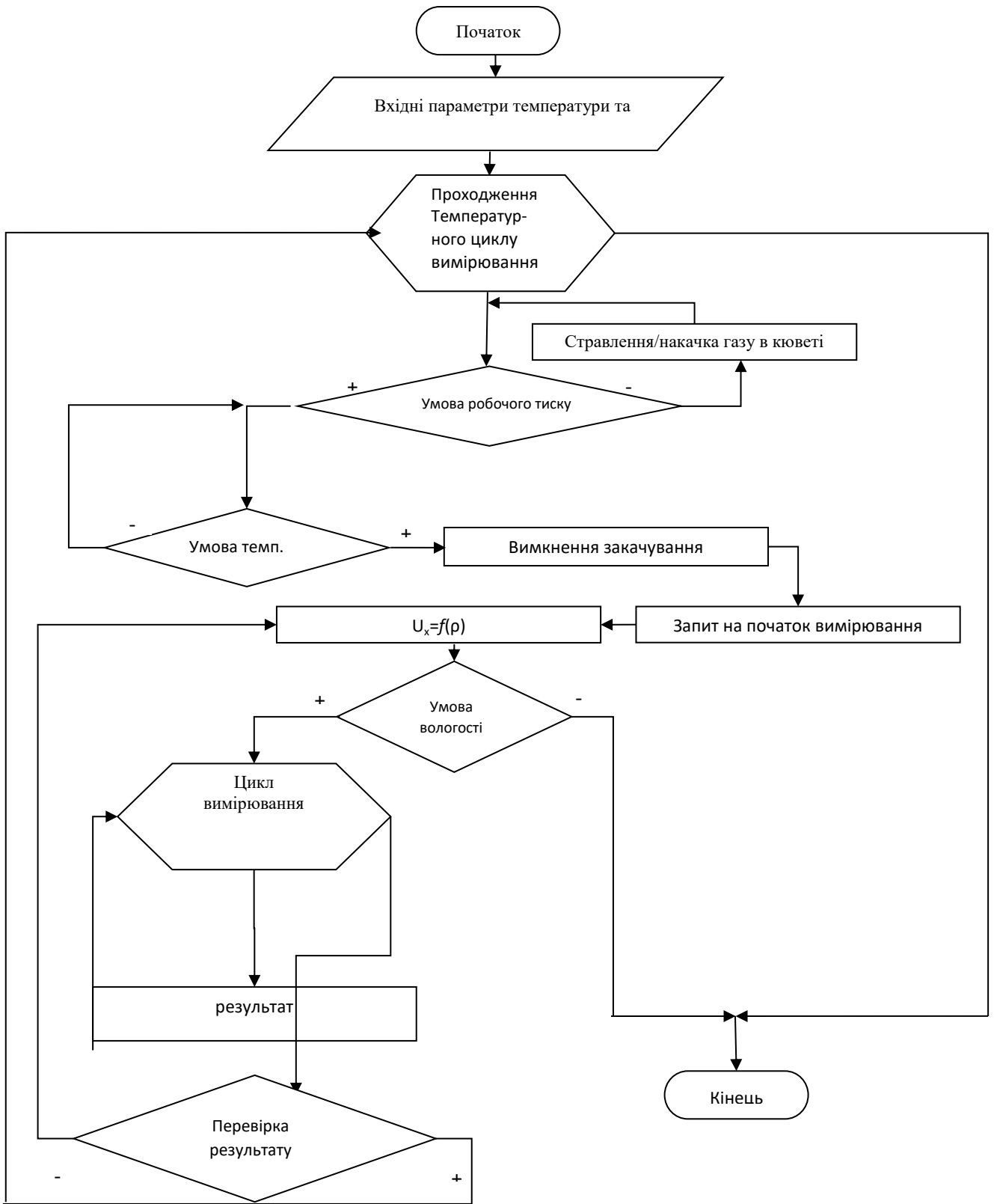
Електрична принципова схема



Додаток Г
(обов'язковий)

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ
ВИХОДОМ**

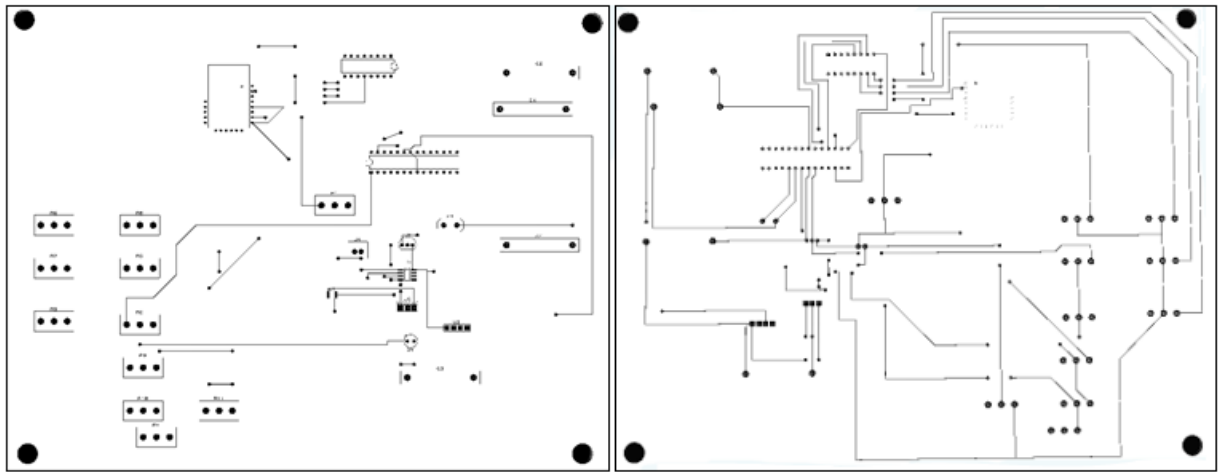
Алгоритм роботи мікроелектронного сенсора вологості



Додаток Д
(обов'язковий)

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ
ВИХОДОМ**

Автотрасування та розміщення елементів схеми в середовищі
ARES Proteus. а) вид зверху б) вид знизу.



a)

б)

Додаток Е
(обов'язковий)

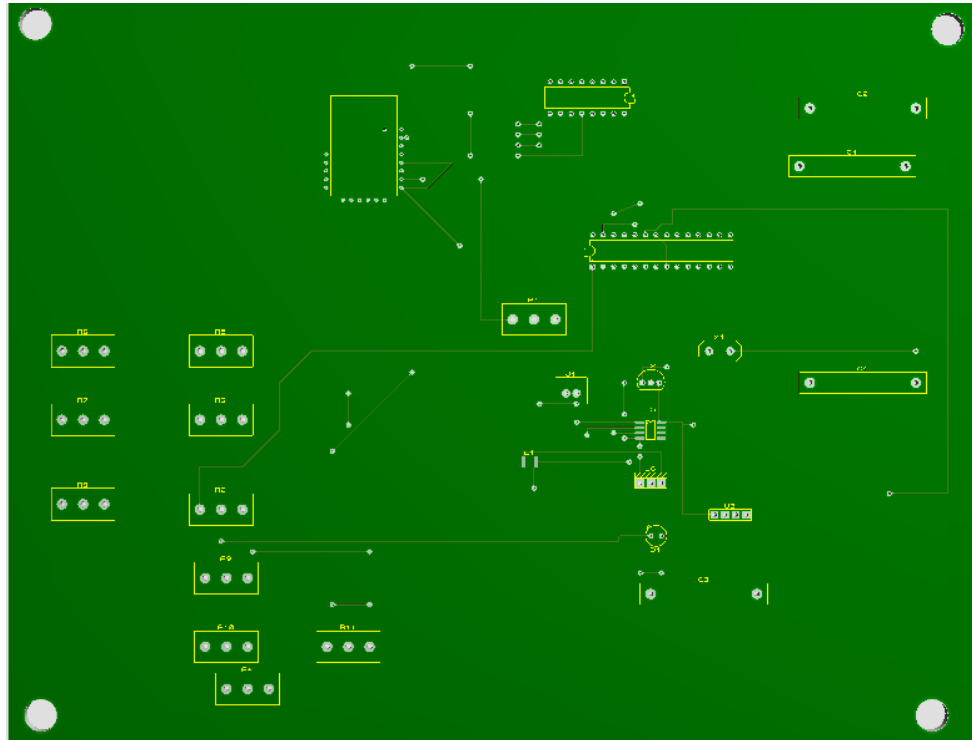
**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ
ВИХОДОМ**

Зовнішній вигляд розробленої друкованої плати з встановленими компонентами

Додаток Ж
(обов'язковий)

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ
ВИХОДОМ**

Зовнішній вигляд розробленої друкованої плати без компонентів



Додаток К
(обов'язковий)

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ
ВИХОДОМ**

Програма моделювання мікроелектронного сенсора вологості

```

// include the libraries
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

//set variable
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
SoftwareSerial portOne(0, 1);
Servo myservoFirst;
Servo myservoSecond;
Sd2Card card;
SdVolume volume;
File root;
int DeletedCount = 0;
int FolderDeleteCount = 0;
int FailCount = 0;
String rootpath = "/";
int potpin = 0;
int val;
int i;
const int SDChipSelect = 4;
char inByte;

void setup() {
  //set pins motors
  myservoFirst.attach(5);
  myservoSecond.attach(6);
  //run RX-TX
  //softSerial.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
  portOne.begin(9600);
  Serial.print("\nInitializing SD card...");
  //run lcd display
  lcd.begin();
  lcd.backlight();

  if (!card.init(SPI_HALF_SPEED, SDChipSelect)) {
    Serial.println("initialization failed. Things to check:");
    Serial.println("* is a card inserted?");
    Serial.println("* is your wiring correct?");
    Serial.println("* did you change the chipSelect pin to match your shield or module?");
    while (1);
  } else {
    Serial.println("Wiring is correct and a card is present.");
  }
}

```

```

// print the type of card
Serial.println();
Serial.print("Card type:      ");
switch (card.type()) {
  case SD_CARD_TYPE_SD1:
    Serial.println("SD1");
    break;
  case SD_CARD_TYPE_SD2:
    Serial.println("SD2");
    break;
  case SD_CARD_TYPE_SDHC:
    Serial.println("SDHC");
    break;
  default:
    Serial.println("Unknown");
}

// Now we will try to open the 'volume'/partition' - it should be FAT16 or FAT32
if (!volume.init(card)) {
  Serial.println("Could not find FAT16/FAT32 partition.\nMake sure you've formatted the card");
  while (1);
}

Serial.print("Clusters:      ");
Serial.println(volume.clusterCount());
Serial.print("Blocks x Cluster: ");
Serial.println(volume.blocksPerCluster());

Serial.print("Total Blocks:  ");
Serial.println(volume.blocksPerCluster() * volume.clusterCount());
Serial.println();

// print the type and size of the first FAT-type volume
uint32_t volumesize;
Serial.print("Volume type is:  FAT");
Serial.println(volume.fatType(), DEC);

volumesize = volume.blocksPerCluster(); // clusters are collections of blocks
volumesize *= volume.clusterCount();   // we'll have a lot of clusters
volumesize /= 2;                        // SD card blocks are always 512 bytes (2 blocks are 1KB)
Serial.print("Volume size (Kb): ");
Serial.println(volumesize);
Serial.print("Volume size (Mb): ");
volumesize /= 1024;
Serial.println(volumesize);
Serial.println(volumesize);
if(volumesize == 0){
  Serial.println("Not have size");
}

```

```

SD.begin(SDChipSelect);

root = SD.open("/");
delay(2000);

rm(root, rootpath);

if( !DeletedCount && !FailCount && !FolderDeleteCount ){
}
else{
  Serial.print("Deleted ");
  Serial.print(DeletedCount);
  Serial.print(" file");
  if( DeletedCount != 1 ){
    Serial.print("s");
  }
  Serial.print(" and ");
  Serial.print(FolderDeleteCount);
  Serial.print(" folder");
  if ( FolderDeleteCount != 1 ){
    Serial.print("s");
  }
  Serial.println(" from SD card.");
  if( FailCount > 0 ){
    Serial.print("Failed to delete ");
    Serial.print(FailCount);
    Serial.print(" item");
    if( FailCount != 1 ){
      Serial.print("s");
    }
  }
}
} else if(volumesize >= 20){
  Serial.println("Have size");
};
}

void loop(void) {
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Initialization");
  lcd.clear();
  delay(200);
  lcd.print("Data analyze");
  val = analogRead(potpin);
  val = map(val, 0, 1023, 0, 180);
  //get information from motors
  if(val >= 0 && val <= 88){

```

```

for(i = val; i>=0; i-=1){
  myservoFirst.write(i);
  delay(150);
  myservoFirst.detach();
}
}else if(val >= 88 && val <=92){
  myservoFirst.write(90);
  myservoSecond.write(90);
  delay(150);
  myservoFirst.detach();
  myservoSecond.detach();
  lcd.clear();
  delay(1000);
  //get date from COM2
  portOne.listen();
  while (portOne.available() > 0) {
  char inByte = portOne.read();
  Serial.print(inByte);
  }
  //save file on SD card
  File dataFile = SD.open('text.txt', FILE_WRITE);
  if (dataFile) {
  while (dataFile.available()) {
    Serial.write(dataFile.read());
  }
  dataFile.close();
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
  Serial.println("error opening datalog.txt");
}
}
}
}else if(val >= 92 && val <=180) {
  for(i = val; i>=0; i=i-1){
  myservoSecond.write(i);
  delay(15);
  myservoSecond.detach();
  }
}
}

//formate SD card
void rm(File dir, String tempPath) {
while(true) {
  File entry = dir.openNextFile();
  String localPath;
  Serial.println("");

```

```

if (entry) {
  if ( entry.isDirectory() )
  {
    localPath = tempPath + entry.name() + rootpath + '\0';
    char folderBuf[localPath.length()];
    localPath.toCharArray(folderBuf, localPath.length() );
    rm(entry, folderBuf);

    if( SD.rmdir( folderBuf ) )
    {
      Serial.print("Deleted folder ");
      Serial.println(folderBuf);
      FolderDeleteCount++;
    }
    else
    {
      Serial.print("Unable to delete folder ");
      Serial.println(folderBuf);
      FailCount++;
    }
  }
  else
  {
    localPath = tempPath + entry.name() + '\0';
    char charBuf[localPath.length()];
    localPath.toCharArray(charBuf, localPath.length() );

    if( SD.remove( charBuf ) )
    {
      Serial.print("Deleted ");
      Serial.println(localPath);
      DeletedCount++;
    }
    else
    {
      Serial.print("Failed to delete ");
      Serial.println(localPath);
      FailCount++;
    }
    {
      else {

        // break out of recursion
        break;
      }
    }
  }
}

```