

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

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«___» _____ 2024р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології»**

спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

**на тему: «Прилад для вимірювання вологості та температури
повітряного середовища у виробничих приміщеннях»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПН-01
Герасимчук Андрій Андрійович

Керівник:

Професор, д.т.н., доцент
Барилко Сергій Віталійович

Рецензент:

Доцент, к.т.н., доцент
Муравйов Олександр Володимирович

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

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП 152. 0102.001 ПЗ	Пояснювальна записка	89	
3	A4	ДП 152. 0102.001 ТК1	Вимірювач температури та вологості, схема структурна	1	
4	A3	ДП 152. 0102.001 ТК2	Вимірювач температури та вологості, схема принципова	1	
5	A4	ДП 152. 0102.001 ТК3	Алгоритм процесу вимірювання температури та вологості	1	
6	A4	ДП 152. 0102.001 ТК СП	Специфікація	3	

				ДП 152.0102.001		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Герасимчук А.А.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Барилко С. В.				1	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ІВТ Гр. ПН-01	
Н/контр.						
Зав.каф.	Єременко В. С.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Прилад для вимірювання вологості та температури
повітряного середовища у виробничих приміщеннях»**

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

Приладобудівний факультету

Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційні вимірювальні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Герасимчуку Андрію Андрійовичу

1. Тема проєкту «Прилад для вимірювання вологості та температури повітряного середовища у виробничих приміщеннях», керівник проєкту Барилко Сергій Віталійович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «28» травня 2024 р. № 2121-с.

2. Термін подання студентом проєкту 14.06.2024 р.

3. Вихідні дані до проєкту: прилад для вимірювання вологості та температури повітряного середовища в діапазоні температури 10 ... 100 °C з максимальною похибкою 4,5% та відносної вологості в діапазоні 5% ... 95% з максимальною похибкою 6,0%.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Розділ 1. Аналіз методів та засобів вимірювання температури та вологості середовища. Розділ 2. Розрахунок параметрів перетворювачів температури та вологості для вимірювальних приладів. Розділ 3. Розробка структурних та електричних схем приладу для вимірювальних каналів температури та вологості повітряного середовища. Розділ 4. Розробка проєкту друкованої плати для вимірювання температури та вологості повітряного середовища. Загальні висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Вимірювач температури та вологості, схема структурна (1л). Вимірювач температури та вологості, схема принципова (1л). Алгоритм процесу вимірювання температури та вологості повітряного середовища (1л). Презентація (на 1 ел. носії).

6. Дата видачі завдання: 01.03.2024 р.

Календарний план

з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Вибір та затвердження теми	15.03.24 р.	
2.	Формулювання та затвердження завдання	26.03.24 р.	
3.	Виконання першого та другого розділів, перевірка їх керівником	26.04.24 р.	
4.	Виконання 3-4 розділів, перевірка їх керівником і консультантом	24.05.24 р.	
5.	Формування графічної частини ДП	31.05.24 р.	
6.	Оформлення та завершення ДП. Надання на розгляд керівнику	03.06.24 р.	
7.	Надання ДП (електронний варіант) відповідальному на кафедрі для перевірки на наявність запозичень (плагіату)	03.06.24 р.	
8.	Остаточна перевірка ДП керівником, надання відгуку	03.06.24 р.	
9.	Попередній захист ДП	04.06.24 р.	
10.	Рецензування	10.06.24 р.	
11.	Надання роботи відповідальному за організацію дипломного проєктування на кафедрі (друкований варіант)	14.06.24 р.	
12.	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК	18.06.24 р.	

Студент

Андрій ГЕРАСИМЧУК

Керівник

Сергій БАРИЛКО

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт на тему: "Прилад для вимірювання вологості та температури повітряного середовища у виробничих приміщеннях" містить 100 сторінок, 50 ілюстрацій та 17 бібліографічних посилань. У дипломному проєкті проведений аналіз методів вимірювання температури та вологості різних середовищ, а саме: термоелектричних методів; оптичних НВЧ-методів заснованих на дослідженні характеристик електромагнітної хвилі; хвилеводних методів вимірювання вологості заснованих на визначенні безконтактно діелектричної проникності й питомої електропровідності різних середовищ; зондових методів заснованих на вимірюванні вологості локальних ділянок діелектричних середовищ та багатьох інших, з яких можна виділити термоелектричний та ємнісний методи.

Було також проаналізовано залежність зміни електричного опору термістора від зміни температури та зміни напруги на термісторі від зміни температури, а також проведено розрахунок основних параметрів схеми включення первинного перетворювача.

Було побудовано залежність зміни частоти коливального контуру перетворювача від ємності первинного перетворювача.

Проаналізовано роботу коливального вимірювального контуру вологості за проведеними розрахунками та побудованою моделлю перетворювача.

Представлено структурні та електричні схеми вимірювальних каналів температури та відносної вологості повітряного середовища. Розроблено проєкт електричної схеми та друкованої плати. Проведена симуляція вимірів температури та відносної вологості повітряного середовища у виробничих приміщеннях.

Ключові слова: температура, відносна вологість, повітряне середовище, термістор, коливальний контур, вимірювальний канал.

ABSTRACT

The diploma project on the topic: “A device for measuring humidity and temperature of the air environment in industrial premises” contains 100 pages, 50 illustrations and 17 bibliographic references. The diploma project analyzed the methods of measuring temperature and humidity of various environments, namely: thermoelectric methods; optical microwave methods based on the study of electromagnetic wave characteristics; waveguide methods of humidity measurement based on non-contact determination of dielectric permeability and specific electrical conductivity of various media; probe methods based on measuring the humidity of local areas of dielectric media and many others, from which thermoelectric and capacitive methods can be distinguished.

The dependence of the change in the electrical resistance of the thermistor on the change in temperature and the change in the voltage on the thermistor on the change in temperature was also analyzed, as well as the calculation of the main parameters of the switching circuit of the primary converter.

The dependence of the change in the frequency of the oscillating circuit of the converter on the capacity of the primary converter was constructed.

The operation of the oscillating humidity measuring circuit was analyzed according to the calculations and the constructed model of the converter.

The structural and electrical diagrams of the measuring channels of temperature and relative humidity of the air environment are presented. The project of the electrical circuit and printed circuit board has been developed. Simulation of measurements of temperature and relative humidity of the air environment in production premises was carried out.

Keywords: temperature, relative humidity, air environment, thermistor, oscillating circuit, measuring channel.

ЗМІСТ

Вступ	10
Розділ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ СЕРЕДОВИЩА	11
1.1 Методи та засоби вимірювання температури.....	11
1.2 Методи вимірювання вологості	18
Висновки до розділу 1.....	30
Розділ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ	31
2.1 Розрахунок параметрів термометрів опору у вимірювальній мостовій схемі.....	31
2.2 Розрахунок параметрів мостової схеми вимірювального елемента напруги з нелінійним опором.....	39
2.3 Похибки термометрів опору включених у вимірювальну схему подільника напруги	45
2.4 Похибки термометрів опору включених у мостову вимірювальну схему	46
2.5 Розрахунок параметрів перетворювачів вологості середовища у вимірювальній схемі	47
Висновки до розділу 2.....	59
Розділ 3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА	60
3.1 Розробка структурної та електричної схем вимірювального каналу температури повітряного середовища	60

3.2 Розробка структурної та електричної схем вимірювального каналу вологості повітряного середовища.....	70
Висновки до розділу 3.....	79
Розділ 4. РОЗРОБКА ПРОЄКТУ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА	80
4.1 Огляд етапів створення проєкту друкованої плати у програмному середовищі Proteus 7.7	80
4.2 Розробка проєкту друкованої плати вимірювального приладу вологості та температури.....	84
Висновки до розділу 4.....	89
Загальні висновки	90
Список використаних джерел.....	91
ДОДАТКИ.....	94

Вступ

Мікроклімат у виробничих приміщеннях грає ключову роль у забезпеченні комфортних і безпечних умов праці для працівників. Температура та відносна вологість повітря - два основні параметри мікроклімату, які впливають на фізіологічний стан людини під час роботи.

Температура повітря в приміщенні може впливати на ефективність праці, концентрацію та загальний комфорт працівників. Висока температура може спричинити перегрівання організму, втому, зниження продуктивності та навіть серйозні медичні проблеми. З іншого боку, низька температура може призвести до холодового стресу, зниження рухливості, а також збільшення ризику захворювань дихальних шляхів.

Відносна вологість також грає важливу роль. Надмірна сухість може призводити до дискомфорту, сухості слизових оболонок, а також може підвищувати ризик захворювань дихальних шляхів. Навпаки, висока вологість може спричинити відчуття важкості в повітрі, створювати умови для розвитку плісняви та бактерій, що також може бути шкідливим для здоров'я працівників.

Тому контроль і підтримання оптимальних значень температури та відносної вологості у виробничих приміщеннях є дуже важливим завданням для забезпечення здоров'я та комфорту працівників, а також для збільшення продуктивності праці.

Розділ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ СЕРЕДОВИЩА

1.1 Методи та засоби вимірювання температури

Мікроклімат виробничих приміщень - один із найважливіших фізичних чинників, що впливають на організми працівників під час його роботи. Критично важливими складовими мікроклімату є температура та відносна вологість.

Для вимірювання температури розроблено багато методів. Більшість з них ґрунтується на вимірюванні певної фізичної властивості робочого матеріалу, яка змінюється зі зміною температури. Одним з найпоширеніших приладів для вимірювання температури є скляний термометр. Він складається зі скляної трубки, заповненої ртуттю або іншою рідиною, яка виконує роль робочого тіла. Підвищення температури змушує рідину розширюватися, тому температуру можна визначити, вимірявши об'єм рідини. Такі термометри зазвичай відкалібровані таким чином, що можливо зчитувати температуру, просто спостерігаючи за рівнем рідини в термометрі.

Кожна методика вимірювання температури має свої унікальні характеристики, які зумовлені як основним принципом методу, так і використовуваними засобами та способами їх підключення. Крім того, під час вимірювання температури необхідно брати до уваги взаємодію датчиків температури із середовищем, температуру якого потрібно виміряти [1].

Контактні датчики температури безпосередньо контактують із середовищем, температуру якого вони вимірюють. Однак, навіть у статичному режимі власна температура контактного датчика (або його частини) зазвичай відрізняється від температури вимірюваного середовища. Ця різниця зумовлена особливостями теплообміну між датчиком і середовищем вимірювання, а також конструктивними характеристиками та теплофізичними властивостями самого датчика й елементів його арматури. Крім того, на

температурну різницю впливають умови теплообміну датчика з навколишнім середовищем. [1].

Існують різні категорії приладів для вимірювання температури, класифікація яких базується на фізичних властивостях речовин, що використовуються в цих приладах. Кожна категорія має свій діапазон можливих показань [2]:

- Термометри розширення ($-190...+650\text{ }^{\circ}\text{C}$) використовують властивість тіл змінювати свій об'єм під впливом температури.
- Манометричні термометри ($-160...+200\text{ }^{\circ}\text{C}$) функціонують через зміну тиску рідини, газу або пари в замкнутому об'ємі під впливом нагрівання або охолодження цих речовин.
- Термометри опору ($-200...+650\text{ }^{\circ}\text{C}$) використовують властивість металевих провідників змінювати свій електричний опір при нагріванні.
- Термоелектричні термометри ($-50...+1800\text{ }^{\circ}\text{C}$) базуються на властивості різномірних металів і сплавів генерувати термоелектрорушійну силу в парі (спаї), що залежить від температури спаю.
- Пірометри ($-30...+6000\text{ }^{\circ}\text{C}$) вимірюють енергію, яку випромінюють нагріті тіла, що залежить від їх температури [2].

Термометри розширення використовують здатність рідин і газів змінювати свій об'єм, а твердих тіл - лінійні розміри при зміні температури. Ці типи термометрів включають рідинні, дилатометричні та манометричні [1].

У **рідинних скляних термометрах** вимірювання температури базується на різниці коефіцієнтів об'ємного розширення матеріалу корпусу термометра та рідини, що в ньому міститься, в залежності від температури [3].

Корпуси термометрів виготовляються зі спеціальних сортів скла з низьким коефіцієнтом розширення. Для вимірювання високих температур використовується кварц. Термометрична рідина може бути ртуттю (Hg), етиловим спиртом ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), толуолом ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$), пентаном (C_5H_{12}), тощо. Найпоширенішими є ртутні термометри. В число їх переваг входять: широкий діапазон вимірювання ($-35...+600\text{ }^{\circ}\text{C}$), незмочуваність скла ртуттю [3].

Термометри, що використовують органічні рідини, придатні для вимірювання лише низьких температур, зазвичай не більше 100 °С.

Ртутні термометри належать до категорії рідинних термометрів. Їхня основна похибка залежить від діапазону вимірювання та ціни поділки шкали, яка зростає зі збільшенням діапазону. Це пов'язано з невеликим відхиленням видимого коефіцієнта розширення ртуті від коефіцієнта розширення скла при зміні температури. Тому ртутні термометри мають майже рівномірну шкалу. Вони виготовляються у двох різновидах: з вкладеною шкалою та паличкового типу.

Термометр із вкладеною шкалою складається з резервуару, заповненого ртуттю, капілярної трубки, циферблата з молочного скла зі шкалою градуювання і зовнішньої циліндричної оболонки, в яку вмонтовані капіляр і циферблат. Один кінець зовнішньої оболонки щільно закритий, а інший припаяний до резервуару [2].

Паличний термометр складається з резервуару, з'єднаного з товстостінною капілярною трубкою зовнішнім діаметром 6-8 мм. Шкала термометра безпосередньо нанесена у вигляді насічок на поверхню скляної капілярної трубки. Порівняно з термометрами із вкладеною шкалою, паличні термометри є більш точними [2].

Дилатометричні термометри поділяються на два види: суто дилатометричні (також відомі як стержневі) та біметалеві. Їхній принцип дії базується на зміні лінійних розмірів твердих тіл під впливом змін температури [3].

Стержневий термометр складається з трубки, яка закрита з одного кінця і розміщується у вимірювальному середовищі, виготовленої з матеріалу з більшим коефіцієнтом лінійного розширення. Усередині трубки знаходиться стрижень, який притискається до її дна важелем, з'єднаним з пружиною. Стрижень виготовлений з матеріалу з малим коефіцієнтом розширення. При зміні температури трубка змінює свою довжину, що призводить до

переміщення в ній стрижня. Стрижень майже не змінює свої розміри і з'єднаний за допомогою важеля з вказівною стрілкою приладу.

Пластинчастий термометр складається з двох металевих смужок, які вигнуті і з'єднані між собою по краях. Одна смужка (смужка 1) має великий коефіцієнт лінійного розширення, тоді як інша (смужка 2) - малий. При зміні температури отримана пластинка змінює ступінь свого вигину. Величина цього вигину вказується за допомогою тяги, важеля і з'єднаної з ним стрілки на шкалі приладу. При підвищенні температури пластинка вигинається у бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення.

Манометричні термометри (МТ) - це пристрої для вимірювання температури, що складаються з чутливого елемента (термобалону) та пристрою для відображення інформації, які з'єднані капілярною трубкою та заповнені робочою речовиною. Принцип їх дії полягає у зміні тиску робочої речовини в закритій системі термометра в залежності від температури.

Манометричні термометри поділяються на три види: рідинні, конденсаційні та газові.

У рідинних манометричних термометрах система заповнена рідиною (ртуть, ксилол, спирти). Як правило, вони застосовуються для вимірювання температури в межах від -50 до $+300$ °C.

Конденсаційні МТ частково наповнені рідиною з низькою температурою кипіння і частково насиченою парою (фреон, пропілен, ацетон). Термометри такого типу здатні вимірювати температуру в діапазоні від -50 до $+300$ °C.

В газових термометрах система заповнена інертними газами (азот, гелій). Межі вимірюваної температури становлять від -50 до $+600$ °C.

Схема манометричного термометра. термосистема, наповнена робочою речовиною, включає термобалон, який занурюється у середовище, що вимірюється. Також є манометрична трубчаста пружина, яка за допомогою тяги рухає вказівну стрілку. Капіляр з'єднує пружину з термобалоном [2].

При нагріванні термобалону збільшення тиску робочої речовини передається через капіляр на трубчасту пружину, що призводить до її

розкручування доки сила, пропорційна різниці тисків у системі та навколишньому середовищі, не зрівноважиться силою пружної деформації пружини [2].

Термоелектричні термометри працюють на принципі властивості металів та сплавів генерувати термоелектрорушійну силу, відому як термо-ЕРС. Величина цієї сили залежить від температури в точці з'єднання (спаю) двох різних провідників (термоелектродів). Саме це з'єднання двох термоелектродів утворює чутливий елемент термометра, який називається термопарою.. Принцип дії термопар ґрунтується на ефекті Зеєбека.

Ефект Зеєбека описує здатність кола генерувати певний електричний потенціал, якщо з'єднані кінці різних матеріалів мають різну температуру. Напрямок струму в колі залежить від того, де знаходиться більш висока температура. У випадку термопар, один спай (з'єднання різних провідників) розміщується в середовищі, температуру якого потрібно виміряти, а інший спай знаходиться при кімнатній температурі і під'єднаний до гальванометра для вимірювання потенціалу. Напрямок струму залежить від різниці температур між двома спаями [4].

Електрорушійна сила (ЕРС), яка викликає струм у колі, називається термо-ЕРС Зеєбека. В першому наближенні вона залежить лише від матеріалів термоелектродів та різниці температур між спаями. Величина термо-ЕРС становить мілівольти при різниці температур 100 К (173,15°C) та температурі холодного спаю 0°C. Наприклад, для пари мідь-константан термо-ЕРС дорівнює 4,25 мВ, а для платина-платинородій - 0,643 мВ. [5]. Схема термопари зображена на рисунку 1.1.

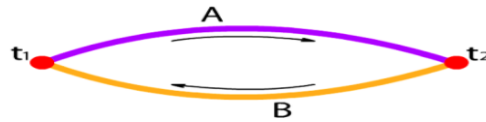


Рисунок 1.1 – Схема термопар ($t_1 > t_2$; А – позитивний електрод; В – негативний електрод; спай з температурою t_1 – гарячий спай (робочий кінець), з температурою t_2 – холодний спай (вільний кінець); стрілками показано напрямок струму) [5]

Термопары та їх характеристики класифікуються згідно з стандартами МЕК, ДСТУ 2857-94 та ДСТУ EN 60584-1:2016, як наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Відповідність стандартів термопар

Матеріал	Тип за МЕК	Тип за ДСТУ
Хромель-алюмель	К	ТХА
Залізо-константан	Ј	ТЖК
Ніхросил-нісил	Н	ТНН
Платинородій-платина	R	ТПП 13
Платинородій-платина	S	ТПП 10
Платинородій-платинородій	В	ТПР
Мідь-константан	T	ТМКн
Хромель-константан	E	ТХКн

Принцип дії *термометрів опору* базується на тому, що електричний опір металевих провідників змінюється в залежності від температури. Як відомо, метали збільшують свій опір при нагріванні. Отже, знаючи залежність опору провідника від температури і вимірюючи цей опір за допомогою електровимірювального приладу, можна визначити температуру провідника. [2].

В порівнянні з іншими термометрами, основною перевагою термометрів опору є висока стабільність і практично лінійні характеристики. Вони також стійкі до механічних впливів і мають досить невеликі розміри.

Недоліки резистивних температурних датчиків включають у себе обов'язкову потребу у стійкому джерелі електричного струму та необхідність використання багатопровідних схем підключення для мінімізації впливу опору з'єднуючих дротів.

Максимальна температура, яку можуть виміряти дровові термометри опору, обмежена їхньою стійкістю до нагрівання і становить 650°C [2].

Пірометри є зручним і поширеним методом вимірювання температури, оскільки дозволяють здійснювати її безконтактний вимір. Їхній принцип роботи базується на вимірюванні електромагнітного випромінювання від тіла, що вимірюється [4].

Пірометри за способом вимірювання поділяються на:

- оптичні пірометри;
- радіаційні пірометри;
- фотоелектричні пірометри [4].

Зі збільшенням температури тіла швидко зростає інтенсивність його теплового випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини. За температури 500°C тіло випромінює інфрачервоні промені великої довжини хвилі. Подальше підвищення температури призводить до появи видимих променів меншої довжини хвилі, через що тіло починає світитися. Спочатку тіло має темно-червоний колір, але зі зростанням температури і появою хвиль меншої довжини, його колір переходить спочатку у червоний, потім у жовтогарячий, жовтий і, нарешті, білий - суміш променів різної довжини хвилі. [2].

Оптичні пірометри - це пристрої, які працюють шляхом порівняння інтенсивності випромінювання досліджуваного об'єкта з інтенсивністю випромінювання нитки розжарювання, температура якої відома заздалегідь [4].

На відміну від оптичних візуальних пірометрів, фотоелектричні пірометри є автоматичними пристроями. В них використовуються чутливі елементи, які сприймають променисту енергію, такі як фотоеlementи, фотопомножувачі, фотоеlementи опору та фотодіоди [2].

Принцип дії радіаційних пірометрів (повного випромінювання) базується на залежності повної енергетичної яскравості тіла в видимій та невидимій частинах спектру випромінювання від температури нагрітого тіла. За допомогою об'єктива енергія нагрітого тіла концентрується на кінцях батареї термоелектричних перетворювачів, яка є приймачем і перетворює променисту теплову енергію в термо-ЕРС. Величина цієї термо-ЕРС вимірюється мілівольтметром, шкала якого проградуєвана в градусах Цельсія [3].

1.2 Методи вимірювання вологості

Дослідження в галузі датчиків вологості швидко прогресують, і датчики вологості - незалежно від технології виготовлення - широко застосовуються в промисловості та побуті як вимірювальне обладнання або для забезпечення комфорту людини. Через різні умови експлуатації датчиків вологості в різних сферах застосування, починаючи від використання в приміщенні і закінчуючи використанням на відкритому повітрі, були розроблені різні типи приладів для вимірювання вологості, засновані на різних принципах роботи і різноманітних гігроскопічних чутливих матеріалів. Серед різних термінів та одиниць вимірювання вологості найбільш поширеними є абсолютна та відносна вологість.

Абсолютна вологість - це відношення маси водяної пари до об'єму повітря, виражене в грамах на кубічний метр. Абсолютна вологість може бути розрахована на основі відносної вологості, температури повітря або виміряна безпосередньо.

Відносна вологість - це кількість вологи в повітрі порівняно з рівнем вологи при тій же температурі і тиску, необхідним для насичення, виражена у

відсотках. Більшість датчиків вологості працюють за принципом RH через високу точність, надійність і низьку вартість.

Сенсори вологості повітря можна розділити на: термісторні, резистивні та ємнісні.

Термісторні датчики вологості використовують властивість води конденсуватися та випаровуватися. Вони складаються з двох термісторів. Один термістор розміщений у герметичній камері з сухим повітрям, а другий - незахищений, знаходиться у середовищі, де потрібно виміряти вологість. Принцип роботи базується на тому, що при випаровуванні води знижується температура тіла. Знаючи різницю температур між захищеним термістором та незахищеним, можна визначити вологість повітря [4]. Термісторний датчик вологості зображено на рис. 1.2.

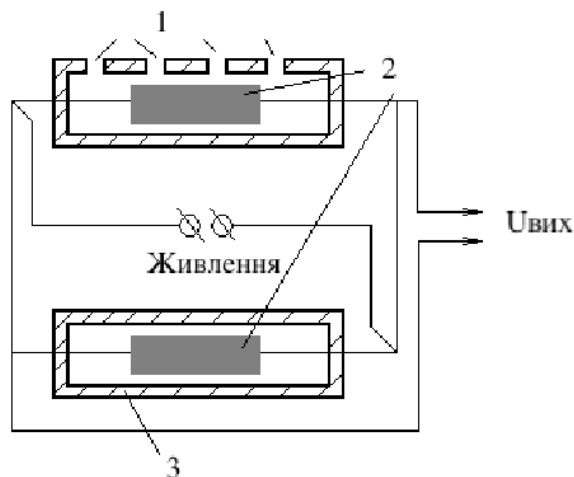


Рисунок 1.2 – Термісторний датчик вологості (1 – камера з отворами, 2 – термістори, 3 – герметична камера) [6]

Резистивний датчик складається з двох електродів, нанесених на підкладку. Поверх електродів наносять шар матеріалу, який має низький опір, проте, сильно залежним від вологості. У якості такого матеріалу, зазвичай, обирається оксид алюмінію. Він добре поглинає воду з навколишнього середовища, при цьому має досить помітну зміну питомого опору. На рис. 1.3 зображено схему резистивного датчика вологості.

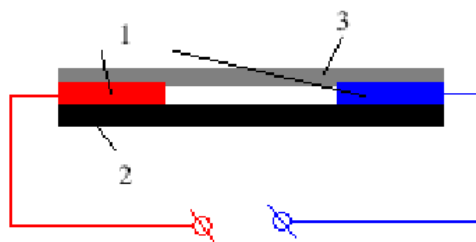


Рисунок 1.3 – Резистивний датчик вологості (1 – електроди, 2 – підкладка, 3 – оксид алюмінію) [6]

Опір ланцюга, в який включено цей датчик буде залежати від вологості середовища, в якому він перебуває. Основною перевагою таких датчиків є їх низька вартість.

Існує два основних типи резистивних датчиків вологості: на основі кераміки та полімерні. Обидва типи мають свої переваги та обмеження, що робить їх придатними для різних застосувань [7].

Резистивні датчики вологості на основі кераміки використовують пористий керамічний матеріал як чутливий до вологості елемент. Найчастіше керамічними матеріалами є метало-оксидні напівпровідники, такі як діоксид титану (TiO_2) та оксид алюмінію (Al_2O_3). Ці датчики працюють за рахунок адсорбції молекул води на керамічній поверхні, що спричиняє зміну електричного опору матеріалу. Резистивні датчики вологості на основі кераміки відомі своєю чудовою довготривалою стабільністю, високою точністю та широким діапазоном робочих температур. Однак вони можуть мати відносно повільний час відповіді і демонструвати гістерезис, тобто відставання у реакції датчика на зміну вологості [7].

Резистивні датчики вологості на основі полімерів використовують тонку плівку гігроскопічного полімеру як чутливий елемент. Найпоширенішими полімерами є поліімід, поліетиленоксид і різні провідні полімери. Ці датчики працюють за рахунок набухання під впливом вологи, що спричиняє зміну електричного опору полімеру. Резистивні датчики вологості на основі полімерів мають швидкий час відгуку, низький гістерезис і хорошу чутливість.

Однак вони можуть мати обмежену довготривалу стабільність, а їхній робочий температурний діапазон, як правило, вузький порівняно з датчиками на основі кераміки [7].

Ємнісні датчики (рис. 1.4) відносної вологості (RH) складаються з двох шарів металевих електродів між діелектричним (непровідним) матеріалом, як правило, полімерною плівкою з діелектричною проникністю близько від 2 до 15. Діелектрична плівка всередині ємнісного датчика вологості притягує і поглинає вологу з навколишнього повітря. Як тільки волога контактує з електродами, відбувається зміна напруги.

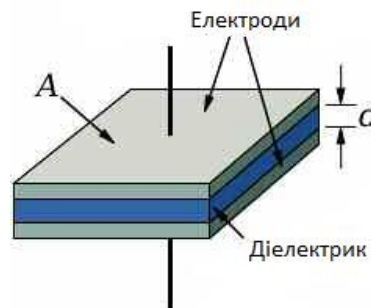


Рисунок 1.4 - Схема ємнісного датчика вологості [8]

Коли волога відсутня, ємність визначається геометрією конденсатора і діелектричною проникністю (відносною проникністю) діелектричного матеріалу. При зміні вологості навколишнього повітря діелектричний полімер поглинає і виділяє водяну пару, тому електрична ємність датчика змінюється.

При нормальній кімнатній температурі діелектрична проникність водяної пари має значення близько 80, що набагато більше, ніж діелектрична проникність діелектричного матеріалу датчика. Тому поглинання вологи датчиком призводить до збільшення ємності датчика.

До переваг ємнісних датчиків можна віднести:

- Широкий діапазон вимірювання
- Майже лінійна залежність вихідної напруги від вологості
- Довговічність
- Низька вартість

- Нескладне обслуговування

Основними недоліками ємнісних датчиків є:

- Обмеження відстані між сигнальним контуром і датчиком;
- Втрата точності при відносній вологості нижче 5%

В *оптичних* вимірювачах вологовміст визначається на підставі ефекту точки роси. Температура утворення точки роси перебуває в прямій залежності від атмосферного тиску і вологості середовища, що знаходиться навколо. Виходячи з цього, за наявності таких даних як температура і тиск можна обчислити і вологість.

Датчик (рис. 1.5) складається з світлодіоду, який випускає світло на скельце, температуру якого можна плавно регулювати. Також на нього встановлюється сенсор температури.

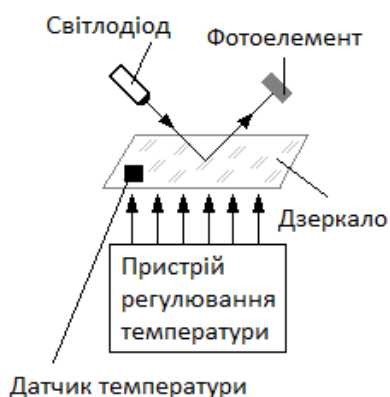


Рисунок 1.5 – Оптичний датчик температури

Якщо скельце помістити в газоподібне оточення, коли температура в момент вимірювання вища за точку роси, і потім поступово охолоджувати, то на скляній поверхні утворюється водяний конденсат. Для визначення вологості, перед початком вимірювань температуру дзеркальця витримують вищою за точку роси. Дзеркальце остуджується - виступає конденсат. Потік світла зі світлодіоду, потрапляючи в це середовище, заломлюватиметься і розсіпатиметься, що призведе до зниження струму в приймаючому фотодетекторі.

Пристрої, які використовують цей метод вимірювання вологості, мають низку переваг: їх виробництво відносно недороге, проте вони демонструють високу надійність і стабільність показників; здатні вимірювати вологість у широкому діапазоні; можуть працювати за підвищених температур та в умовах утворення конденсату [9].

Серед недоліків можна відзначити інерційність вимірювання, зволоження середовища, яке аналізується, під час експлуатації пристрою, дещо нижчу точність вимірювань порівняно з іншими методами, а також потребу в регулярному технічному обслуговуванні [9].

Розроблено новий метод швидкої реєстрації вологості за допомогою фотоприймача, який фіксує оптичний сигнал при випаданні крапель конденсату на охолодженій поверхні пристрою Пельтьє (термоелектричного охолоджувача). Пристрій Пельтьє живиться імпульсним струмом. Коли поверхня охолоджується, подача струму припиняється при виявленні зміни оптичного сигналу внаслідок утворення крапель води. Потім прикладається зворотний імпульс для швидкого повернення пристрою до температури оточуючого середовища. Затримка виявлення оптичного сигналу становить від 0,25 до 12,2 секунд для діапазону вологості від 15% до 70%. Схема оптичного детектора точки роси наведена на рис. 1.6 [9,10].

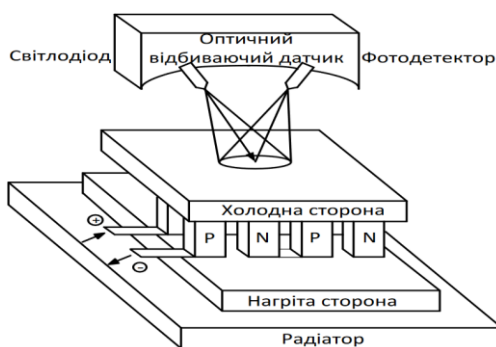


Рисунок 1.6 - Схема детектора точки роси з використанням пристрою Пельтьє [9]

Пристрій містить одноступеневий термоелектричний охолоджувач, встановлений на мідному радіаторі. Над холодною стороною

термоелектричного охолоджувача (пристрою Пельтьє) розміщені світлодіод та фотодетектор [11]. Фотодетектор складається з фотодіода та операційного підсилювача, де фотодіод генерує струм, а операційний підсилювач із зворотнім зв'язком перетворює цей струм у напругу. Вихідна напруга фотодетектора прямо пропорційна світловому потоку, який потрапляє на фоточутливий шар. Коли вода конденсується на холодній поверхні пристрою Пельтьє, світловий потік від інфрачервоного світлодіода розсіюється, що призводить до зменшення рівня фотосигналу [9].

Для промислових конденсаційних гігрометрів, вимірювання точки роси води у присутності раніше сконденсованих домішок, таких як вуглеводні, є поширеною проблемою. Зазвичай у таких умовах автоматичні конденсаційні гігрометри вимірюють точку роси першої сконденсованої домішки у досліджуваному газі. Цю проблему вдалося вирішити за допомогою ефекту повного заломлення. Цей ефект виникає, коли потік вертикально поляризованих хвиль (випромінювання від напівпровідникового лазера) падає на межу поділу «конденсат - охолоджуване дзеркало» під кутом Брюстера, що призводить до відсутності відбитої хвилі [9].

Згідно з законами фізичної оптики, при певному куті падіння α відбита хвиля повністю поляризується. Кут Брюстера α визначається за формулою:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{n_3}{n_1} \quad (1.1)$$

де n_1 – показник заломлення газового середовища; n_3 – показник заломлення матеріалу дзеркала [9].

Отже, коли діелектричне дзеркало освітлюється поляризованим світлом у площині падіння і виконується умова Брюстера, відбита хвиля відсутня. Це призводить до реєстрації системою нульового рівня фотосигналу з фотоприймачів U_0 (рис 1.7) [9].

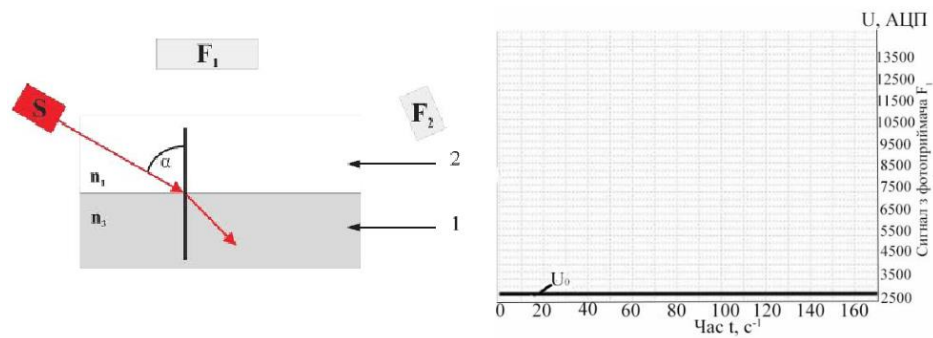


Рисунок 1.7 - Відсутність відбитої хвилі: α – кут Брюстера, 1 – діелектричне охолоджуване дзеркало, 2 – середовище, що досліджується (газ), S – лазерний діод, F1, F2 – фотоприймачі системи реєстрації, U0 – нульовий сигнал фотоприймача [9]

Для визначення сконденсованих з газу води та/або вуглеводнів використовуються різниці у відбивальних властивостях утвореного конденсату на поверхні дзеркала. Під час охолодження дзеркала і утворення крапель конденсованої водяної пари на його поверхні спостерігається інтенсивне розсіювання світла [9].

Під час процесу конденсації водяної пари система реєстрації відображає зростання рівня фотосигналу, що надходить з фотоприймача F1 (рис. 1.8, рис. 1.9). Кількість води, яка сконденсована на поверхні охолоджуваного дзеркала, впливає на рівень фотосигналу [9].

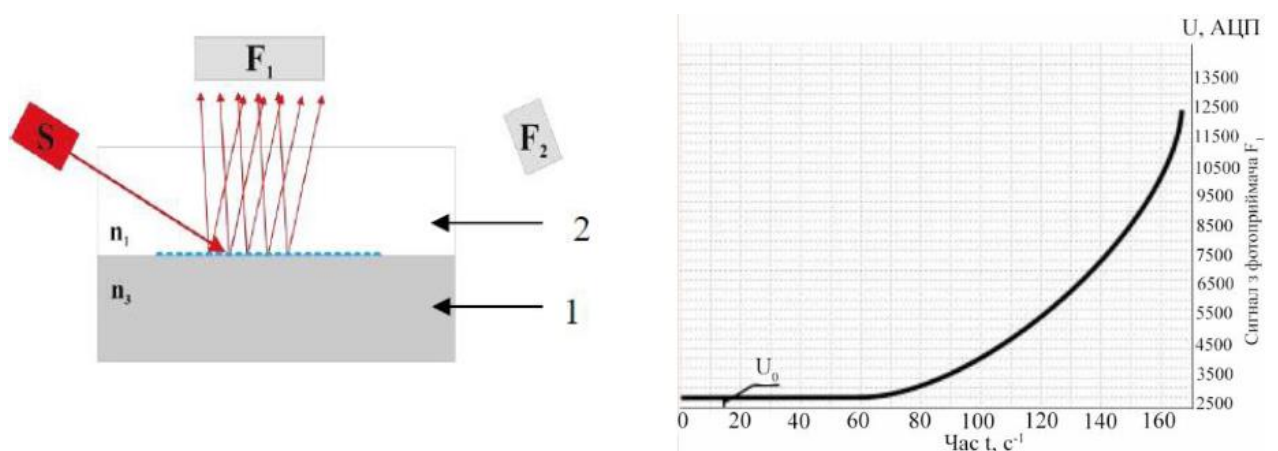


Рисунок 1.8 – Розсіювання світла при конденсації водяної пари на охолоджувану поверхню дзеркала [9]

При утворенні на дзеркалі тонкої плівки вуглеводнів 2, що має показник заломлення n_2 , відмінний від показника заломлення n_3 , закон Брюстера порушується. Це призводить до появи хвилі, відбитої від межі поділу середовища «газ - плівка». Крім того, через оптичну прозорість сконденсованої плівки утворюється друга відбита хвиля від межі поділу «плівка - дзеркало». В результаті фотоприймач F2 реєструє обидві відбиті промені, що створюють інтерференційну картину [9].

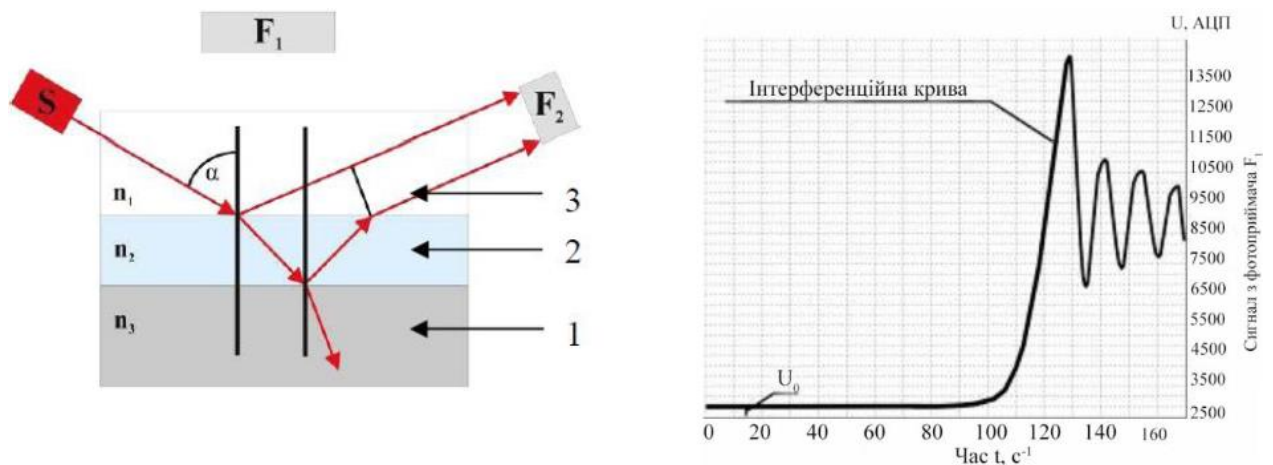


Рисунок 1.9 - Схема поширення світла при наявності на дзеркалі плівки конденсату 2 з показником заломлення n_2 : 1 – діелектричне охолоджуване дзеркало; 2 – плівка сконденсованого вуглеводню; 3 – середовище, що досліджується (газ) [9]

Незважаючи на поширене використання, оптичні гігromетри точки роси мають деякі недоліки, такі як висока вартість, часте забруднення дзеркала та нестабільність при безперервній експлуатації. Гігromетри точки роси, засновані на прямих вимірюваннях маси конденсату, потенційно можуть забезпечити більш точне та роздільне вимірювання точки роси [9].

Галузь вимірювання вологості за допомогою надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання розвивається з 1950-х років. Основними перевагами НВЧ вологомірів є: можливість безконтактних вимірювань (у вільному просторі), висока чутливість, необмежена верхня межа вимірювань, незначний вплив

хімічного складу матеріалу та деяких інших факторів на результати вимірювань [13].

Надвисокочастотні (НВЧ) вологоміри використовують значну різницю в електричних властивостях води та сухого матеріалу. Концентрація вологи вимірюється за ослабленням НВЧ-випромінювання, яке проходить крізь шар аналізованого матеріалу, ґрунтуючись на двох фізичних явищах: поглинанні та розсіюванні радіохвиль через наявність широкосмугової обертальної релаксації полярних водяних молекул в області НВЧ. Чим більша вологість матеріалу, тим слабший сигнал надходить до вимірювального обладнання. НВЧ-вологоміри дозволяють вимірювати вологість у широкому діапазоні (0-100%) з високою точністю [9].

Головними недоліками хвильових методів вимірювання вологості є складність апаратури, необхідної для реалізації цього методу, а також можливість застосування методу лише для визначення вмісту вологи у чистих газах [9].

Серед НВЧ методів вимірювання вологості можна виділити:

1. Оптичні
2. Резонансні
3. Хвилеводні
4. Зондові.

Оптичні НВЧ-методи базуються на аналізі характеристик електромагнітної хвилі, що пройшла через зразок матеріалу, порівняно з характеристиками хвилі, що проходить по іншому шляху або по тому ж шляху, але без матеріалу. Вимірювання зводяться до визначення комплексного коефіцієнта передачі для напрямленої системи, яка може бути частково або повністю заповнена досліджуваною речовиною, або представляти область вільного простору, де поширюються електромагнітні коливання НВЧ. Оптичні методи отримали широке застосування, оскільки їхня перевага полягає у безконтактності вимірювання та можливості інтегральної оцінки вологості у

великих об'ємах матеріалу, що веде до більшої інформаційної ємності методу [14].

Резонансний метод полягає в вимірюванні параметрів резонатора, коли в нього вносять досліджуваний матеріал. Шляхом вимірювання частот резонатора можна визначити діелектричну проникність матеріалу, а вимірюючи його добротність, можна визначити коефіцієнт втрат [14].

Хвильоводні методи вимірювання вологості ґрунтуються на визначенні безконтактно діелектричної проникності та питомої електропровідності рідких середовищ. Для цього у хвильоводі, що заповнений досліджуваною речовиною, створюється режим біжучих хвиль. Здійснюється вимірювання послаблення поля поверхневої повільної хвилі в нормальній і горизонтальній площинах щодо напрямку її поширення. За розрахованим значенням коефіцієнтів послаблення поля в нормальній площині оцінюється величина діелектричної проникності ϵ , а за коефіцієнтом послаблення поля вздовж напрямку поширення хвилі - інформація про величину питомої провідності γ [14].

Зондові методи використовуються для вимірювання вологості в окремих ділянках діелектричних середовищ і для визначення профілю або плану розподілу вологості, зокрема в тепличних субстратах, ґрунтах, сипучих мінеральних добривах, зернопродуктах і т.д. Зондові НВЧ системи вимірювання вологості ґрунтуються на впровадженні в досліджуване середовище первинного перетворювача вологості в параметри НВЧ-поля, які попередньо відкалібровані в сухому середовищі. У процесі вимірювання визначають значення резонансної частоти і добротності первинного вимірювального перетворювача та розраховують вологість досліджуваного середовища [14].

Реалізований НВЧ варіант гігрометрів на основі спеціальних вологопоглинаючих матеріалів. Фактично це аналог мікроелектронних ємнісних датчиків для вимірювання вологості. Перевагами НВЧ гігрометричного сенсора є можливість окремої оптимізації вологосорбентного

матеріалу за критерієм нормованості процесів поглинання та десорбції вологи, а також можливість вимірювання його ефективної діелектричної проникності як функції поглинання вологи з газу [9].

На рис. 1.10 показано функціональну схему розробленого НВЧ гігromетра проточного газу з мікрохвильовим датчиком на основі коаксiального резонатора. з торцевою вимірювальною апертурою [9].

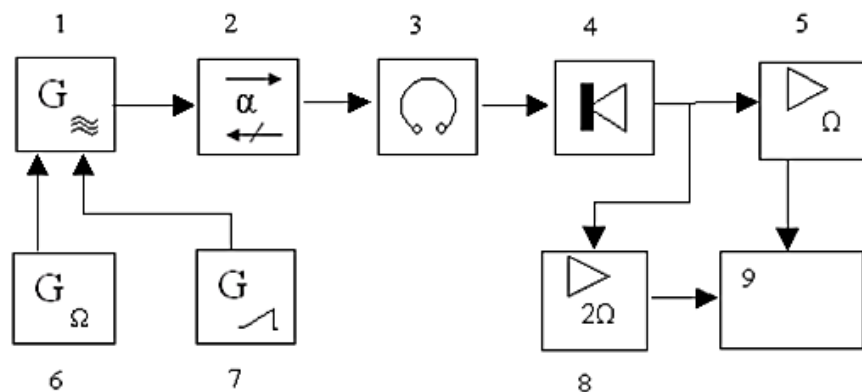


Рисунок 1.10. - Функціональна схема НВЧ гігromетра модуляційного типу: 1 – НВЧ генератор; 2 – феритовий вентиль; 3 – РПП; 4 – НВЧ детектор; 5,8 – селективні підсилювачі; 6 – НЧ генератор; 7 – генератор пилкоподібної напруги; 9 – мікроконтролер [9]

Вологопоглинаюча частина сенсора (3) може наноситися на діелектричну підкладку і оптимально вбудовуватися у випромінювальну апертуру РПП (1) відповідно до критеріїв значення його робочої добротності та чутливості. Видалення накопиченої вологи для підготовки сенсора до нового вимірювання здійснюється після досягнення показниками гігromетра насичення за допомогою або резистивного нагрівання (а), або нагрівання інфрачервоним випромінюванням (б). При вимірюванні вологості в певній дозі (кількості) вологопоглинач може вводитися в поле РПП за варіантом (в) [9].

Висновки до розділу 1

Провівши аналіз у першому розділі методів вимірювання температури і вологості, а саме: оптичних НВЧ-методів засновані на дослідженні характеристик електромагнітної хвилі; хвилеводних методів вимірювання вологості заснованих на визначенні безконтактно діелектричної проникності й питомої електропровідності різних середовищ; зондових методів заснованих на вимірюванні вологості локальних ділянок діелектричних середовищ та багатьох інших, можна виділити термоелектричний та ємнісний методи. За допомогою цих методів можна вимірювати температуру та вологість повітряного середовища без необхідності використання додаткових приладів корекції показав вимірювань з необхідною точністю.

Розділ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

2.1 Розрахунок параметрів термометрів опору у вимірювальній мостовій схемі

Мостова схема з нелінійним опором, що виконує роль вимірювального елемента температури і називається термометром опору, не має рухомих частин.

У термометрах опору плече мосту являє собою термістор. Плечі r_1 , r_2 і r_3 виконуються з матеріалу із можливим малим температурним коефіцієнтом опору α , наприклад у вигляді котушок, намотаних ізольованим дротом з манганіну ($\alpha = 0,000015 \text{ 1/град}$), тому їхній опір практично не залежить від температури. Резистори r_1 , r_2 і r_3 підібрані так, щоб міст був урівноважений при заданому значенні температури середовища, що оточує термістор: $\theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{зад}}$. Тоді відхилення температури $\theta_{\text{вх}}$ від заданого значення $\theta_{\text{зад}}$ призведе до появи вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$ відповідної полярності (при живленні постійним струмом) або фази (при живленні змінним струмом). Задане значення температури можна змінювати, регулюючи величину одного з постійних опорів.

Можна побудувати схему на двох однакових термісторах у протилежних плечах мосту і винесених в одну й ту саму температурну зону. При цьому чутливість елемента зросте вдвічі.

При живленні схеми змінним струмом зміна знаку $\theta_{\text{вх}} - \theta_{\text{зад}}$ призводить до перекидання фази вихідної напруги. Однак у цьому випадку постійна часу нагріву термістора має бути у багато разів більшою за період змінного струму, щоб уникнути появи на виході при $\theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{зад}}$ вищих гармонік.

Як термістор можуть бути використані котушки з намотуванням з ізольованого мідного дроту при $\theta_{\text{вх}} = 100 \div 150^\circ\text{C}$ ($\alpha = 0,0004 \text{ 1/град}$), нікелевого дроту при $\theta_{\text{вх}} = 250 \div 300^\circ\text{C}$ ($\alpha = 0,0046 \text{ 1/град}$) і платинового

дроту при $\theta_{\text{вх}} < 800^\circ\text{C}$ ($\alpha = 0,00398$ 1/град), або напівпровідникові термістори, що працюють залежно від типу при температурах $150 - 500^\circ\text{C}$ і мають $\alpha = -(0,03 \div 0,06)$ 1/град. Також існують термоопори із суміші оксидів металів, які мають назву позистори, що мають $\alpha = +(0,05 \div 0,3)$ 1/град при $\theta_{\text{вх}} = 110 \div 180^\circ\text{C}$. Слід зазначити, що дротяні термістори забезпечують більш стабільну в часі вольт-амперну характеристику, хоча мають значно менше абсолютне значення α , ніж напівпровідникові.

Можна скласти систему рівнянь статички (рис.2.1), що повністю описує кількісні співвідношення в термісторі, якщо знехтувати нерівномірністю температури за об'ємом термістора і складовими, що містять $\theta - \theta_{\text{зад}}$ у ступені більшому за перший, що можливо через малість $\theta - \theta_{\text{зад}}$ при працюючій системі автоматичної стабілізації температури, і використовуючи усереднені температурні параметри:

$$\begin{cases} U_T I = k(\theta - \theta_{\text{вх}}), \\ \frac{U_T}{I} = r_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_{\text{зад}})], \end{cases} \quad (2.1)$$

де U_T , I - напруга і струм у термісторі (діючі значення при живленні схеми змінним струмом); θ - температура термістора; $\theta_{\text{вх}}$ - температура навколишнього середовища; r_0 - опір термістора при $\theta = \theta_{\text{зад}}$; $k = \gamma S$ - теплопередача, Вт/град; γ - коефіцієнт теплопередачі в навколишнє середовище, Вт/см² · град; S - площа поверхні охолодження, см².

Виключивши з рівнянь (2.1) θ , отримаємо рівняння вольт-амперної характеристики термістора:

$$U_T = \frac{r_0 [1 + \alpha(\theta_{\text{вх}} - \theta_{\text{зад}})]}{1 - \frac{\alpha}{k} r_0 I^2} I, \quad (2.2)$$

що зв'язує U_T , I і $\theta_{\text{вх}}$. Згідно з цим рівнянням можна побудувати вольт-амперні характеристики термісторів при $\theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{зад}}$.

З рівняння (2.2) знаходимо повний опір:

$$r_{\text{пов}} = \frac{U_T}{I} \mid \theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{зад}} = \frac{r_0}{1 - \frac{\alpha}{k} r_0 I_0^2}, \quad (2.3)$$

і диференціальний опір:

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU_T}{dI} \mid \theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{зад}} = \frac{1 + \frac{\alpha}{k} r_0 I_0^2}{\left(1 - \frac{\alpha}{k} r_0 I_0^2\right)^2} r_0, \quad (2.4)$$

значення опору термістора в робочій точці буде при значеннях I_0, U_0 .

Розрахунок статичної характеристики термістора (чутливого елемента) в MathCAD для застосування її у моделі вимірювального каналу приладу

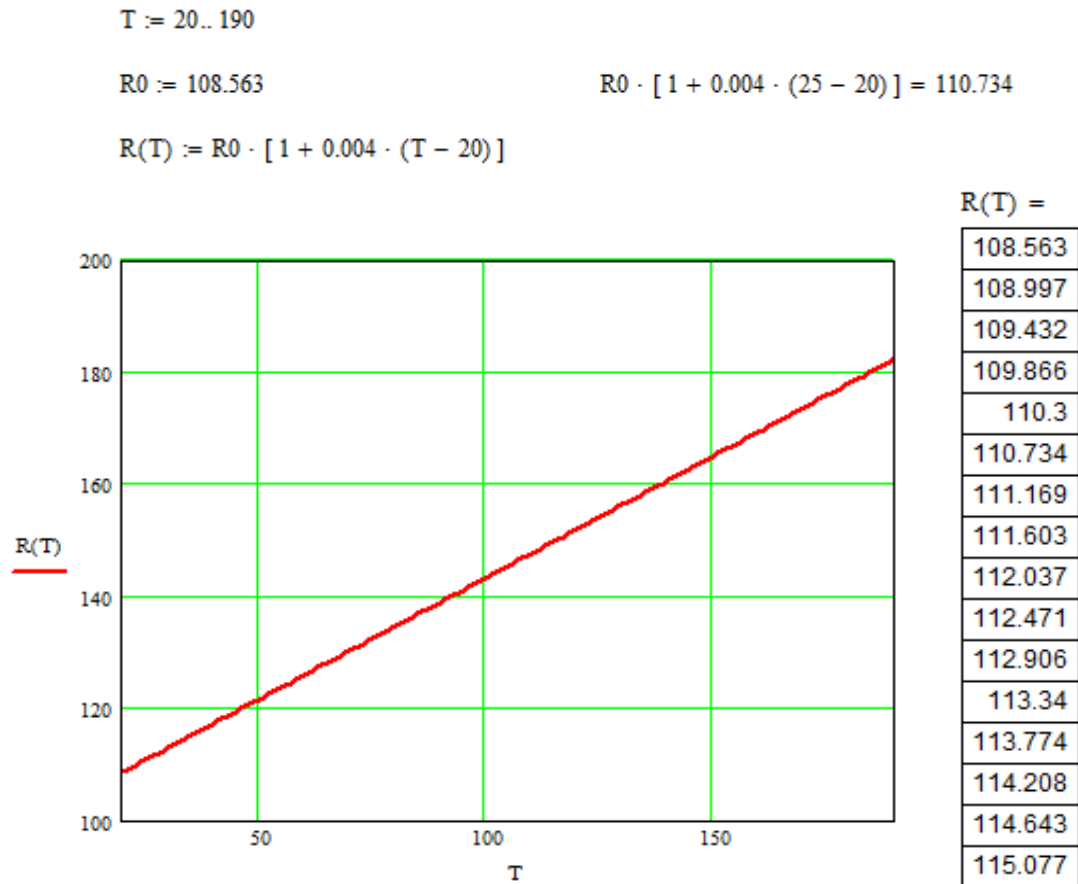


Рисунок 2.1. – Залежність зміни опору $R(T)$, Ω від температури T , $^{\circ}\text{C}$ термістора

Ці формули дають змогу аналітично визначити $r_{\text{пов}}$ і $r_{\text{диф}}$ при обраному значенні I_0 . Між $r_{\text{пов}}$ і $r_{\text{диф}}$ є зв'язок:

$$2r_{\text{пов}}^2 = r_0(r_{\text{диф}} + r_{\text{пов}}). \quad (2.5)$$

Статична чутливість перетворювача при $\theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{зад}}$ буде:

$$K = \frac{dU_{\text{вих}}}{d\theta_{\text{вх}}} = \frac{\alpha r_1 r_{\text{пов}} r_{\text{н}} (r_1 + r_{\text{пов}}) I_0}{(r_1 r_{\text{диф}} + r_1 r_{\text{н}} + r_{\text{диф}} r_{\text{н}})(r_1 + r_{\text{пов}}) + r_2 r_{\text{пов}} (r_1 + r_{\text{диф}})}, \quad (2.6)$$

і постійна часу термометра-опору:

$$T = \frac{(r_1 r_{\text{пов}} + r_1 r_{\text{н}} + r_2 r_{\text{пов}} + r_{\text{н}} r_{\text{пов}})(r_1 + r_{\text{пов}})}{(r_1 r_{\text{диф}} + r_1 r_{\text{н}} + r_{\text{диф}} r_{\text{н}})(r_1 + r_{\text{пов}}) + r_2 r_{\text{пов}}(r_1 + r_{\text{диф}})}, \quad (2.7)$$

де $T_T = \frac{r_{\text{диф}} + r_{\text{пв}}}{2r_{\text{пв}}} \cdot \frac{C}{k}$ - постійна часу термістора, сек; $C = cm$ - повна теплоємність термістора, Дж/рад; m - маса; c - питома теплоємність.

Початковий струм:

$$I_0 = \frac{U}{r_1 + r_{\text{пов}}}. \quad (2.8)$$

Дослідження рівняння (2.6) показує, що K при зміні $r_{\text{н}}$, r_1 і r_2 зростає за абсолютною величиною при збільшенні $r_{\text{н}}$, r_1 і зменшенні r_2 , якщо $I_0 = \text{const}$.

При $r_{\text{н}} = \infty$:

$$K = K_0 = \alpha \frac{r_1 r_{\text{пов}}}{r_1 + r_{\text{диф}}} I_0, \quad (2.9)$$

однак найбільша потужність на виході має місце при $r_{\text{н}} = r_{\text{вн}}$, де внутрішній опір схеми:

$$r_{\text{вн}} = \frac{r_1 r_{\text{диф}}}{r_1 + r_{\text{диф}}} + \frac{r_2 r_{\text{пов}}}{r_1 + r_{\text{пов}}}, \quad (2.10)$$

коли $K = \frac{1}{2} K_0$. При неузгодженому навантаженні:

$$K = \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{н}} + r_{\text{вн}}} K_0. \quad (2.11)$$

При заданому $r_{\text{н}}$ і $I_0 = \text{const}$ збільшення r_1 згідно з рівнянням (2.9), викликає необхідність збільшення напруги джерела живлення U , вибір якого в більшості випадків обмежений. Зменшення r_2 пов'язане з пропорційним зменшенням r_3 , оскільки з умови рівноваги мостової схеми виходить:

$$r_3 = \frac{r_2}{r_1} \cdot r_{\text{пов}}, \quad (2.12)$$

і в кінцевому рахунку обмежене потужністю $\frac{U^2}{r_2 + r_3}$, що витрачається в гілці r_2, r_3 . Зазвичай вибирають $r_2 = r_1$. Тоді $r_3 = r_{\text{пов}}$.

Дослідження показують, що найбільше значення ККД $\eta_{\text{макс}}$, має мостова схема з рівними плечима та узгодженим навантаженням, тобто при $r_1 = r_2 = r_3 = r_{\text{пов}} = r_{\text{н}}$, $\eta_{\text{макс}} = \frac{1}{64} \left(\frac{\Delta r}{r_{\text{пов}}} \right)^3$, де Δr - зміна опору термістора.

Вибір режиму, тобто струму I_0 , від якого залежать $r_{\text{пов}}$ і $r_{\text{диф}}$, істотно впливає на величину статичної чутливості, якщо зробити підстановку $r_1 = mr_{\text{пв}}$ і врахувати попередні формули, то отримаємо:

$$|K_0| = \left| \frac{\alpha m r_0 I_0}{1+m+(1-m)\frac{\alpha}{k} r_0 I_0^2} \right|. \quad (2.13)$$

Дослідження рівняння (2.13) показує, що $|K_0|_{\text{макс}} = \frac{m}{2} \sqrt{\frac{\alpha k r_0}{1-m^2}}$, при:

$$I_0 = I_{0\text{опт}} = \sqrt{\frac{(1+m)k}{|1-m||\alpha|r_0}}, \quad (2.14)$$

якщо $\alpha > 0$ і $m < 1$, або $\alpha < 0$, $m > 1$. При цьому ж значенні струму $|K_0|$ досягає нескінченності, якщо $\alpha > 0$, $m > 1$, або $\alpha < 0$, $m < 1$.

Однак при $\alpha > 0$ досягти струму $I_{0\text{опт}}$ практично неможливо через перегрів термістора. При $\alpha < 0$ і $m < 1$ досягнення струму $I_{0\text{опт}}$ означає одночасне досягнення межі стійкості, за якою знаходиться релейний режим роботи елемента. Отже, у всіх вищенаведених випадках можлива робота елементів тільки на малих струмах $I_0 < I_{0\text{опт}}$.

Практичне здійснення оптимального режиму можливе тільки за умови $\alpha < 0$, $m > 1$. При $m = 1$ $|K_0|_{\text{макс}} = \infty$ і $I_{0\text{опт}} = \infty$, тому для зниження струму $I_{0\text{опт}}$ і зменшення впливу нестабільності вольт-амперної характеристики термістора протягом часу експлуатації рекомендується при $\alpha < 0$ вибирати $m > 1,2$, що, згідно з рівнянням (2.14), відповідає $I_{0\text{опт}} < 3,32 \sqrt{\frac{k}{|\alpha| r_0}}$, $|K_0|_{\text{макс}} < 0,903 \cdot \sqrt{|\alpha| k r_0}$ і роботі на низхідній гілці вольт-амперної характеристики термістора.

При заданому значенні U число m можна знайти за формулою:

$$m^4 + 2m^3 + 4\frac{\alpha}{k} \cdot \frac{U^2}{r_0} m^2 - 2m - 1 = 0, \quad (2.15)$$

отриманої з попередніх рівнянь.

Розглянемо вибір граничного допустимого значення струму $I_0 = I_{0\text{доп}}$ виходячи з умови нагрівання термістора до допустимої температури $\theta = \theta_{\text{доп}}$, коли $\theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{зад}}$. Тоді, виключивши з рівнянь U_T і r_0 , отримаємо:

$$I_{0\text{доп}} = \sqrt{\frac{k(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{зад}})}{r_{\text{пв}}}}. \quad (2.16)$$

Для розрахунку за заданим значенням $r_{\text{н}}$ при виборі $r_{\text{н}} = r_{\text{вн}}$ зручніше користуватися формулами:

$$r_0 = \frac{m+1}{1+\alpha(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{зад}})} \cdot \frac{m+1+2\alpha(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{зад}})}{(m+1)(n+1) + 2\alpha(m+n+1)(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{зад}})} \cdot \frac{r_{\text{н}}}{m}, \quad (2.17)$$

$$r_{\text{пов}} = [1 + \alpha(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{зад}})] r_0, \quad (2.18)$$

$$r_{\text{диф}} = \left(\frac{2r_{\text{пов}}}{r_0} - 1 \right) r_{\text{пов}}, \quad (2.19)$$

отриманими з попередніх рівнянь, де:

$$m = \frac{r_1}{r_{\text{пл}}}; n = \frac{r_2}{r_1}.$$

У разі заміни в цій системі рівняння (2.17) на рівняння (2.15) для розрахунку за оптимальним струмом при $\alpha < 0$ і $m > 1$ отримаємо:

$$r_0 = \frac{2(m+1)}{n(m-1)-1} r_{\text{н}}; \quad (2.20)$$

$$r_{\text{пов}} = \frac{m-1}{2m} r_0, \quad (2.21)$$

а $r_{\text{диф}}$ визначається з формули (2.19).

Отримані рівняння дають змогу розрахувати термометричний опір за різних варіантів завдання, що демонструється на таких прикладах.

Для прикладу розрахуємо термометричний опір за схемою на термісторі з мідного дроту для роботи як вимірювальний елемент за умови $\theta_{\text{зад}} = 100^\circ\text{C}$ і опорі навантаження $r_{\text{н}} = 200 \text{ Ом}$.

1. Для підвищення ККД вибираємо $r_1 = r_2 = r_3 = r_{\text{пв}}$, тобто. $m = 1$ і $n = 1$.
2. Приймавши для міді $\alpha = 0,004 \text{ 1/град}$ і для ізоляції дроту ПЕЛ-1 $\theta_{\text{доп}} = 120^\circ\text{C}$, з рівнянь (2.17), (2.18), (2.19) знаходимо:

$$3. r_0 = \frac{1+1}{1+0,004(120-100)} \cdot \frac{1+1+2 \cdot 0,004(120-100)}{(1+1)(1+1)+2 \cdot 0,004(1+1+1)(120-100)} \cdot \frac{200}{1} = 179 \text{ Ом},$$

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_{\text{пов}} = [1 + 0,004(120 - 100)] \cdot 180 = 193 \text{ Ом},$$

$$r_{\text{диф}} = \left(2 \cdot \frac{193}{173} - 1\right) 193 = 224 \text{ Ом}.$$

4. Визначаємо питомий опір міді при $\theta = \theta_{\text{зад}}$:

$$\rho_0 = [1 + \alpha(\theta_{\text{зад}} - 20)] \rho_{20} = [1 + 0,004(100 - 20)] \cdot 0,0175 = 0,0231 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}.$$

5. Вибираємо за сортиментом дроту марки ПЕЛ-1 найтонший дріт з $d = 0,05 \text{ мм}$ ($d_{\text{із}} = 0,065 \text{ мм}$; $q = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$), визначаємо його довжину $l = \frac{qr_0}{\rho_0} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 179}{2,31 \cdot 10^{-2}} = 15,2 \text{ м}$. Намотуємо дріт на керамічну трубку із зовнішнім діаметром $D_{\text{тр}} = 6 \text{ мм}$ і внутрішнім $D = 4 \text{ мм}$. Тоді довжина витка $l_{\text{в}} = \pi(D_{\text{тр}} + d_{\text{із}}) = \pi(6 + 0,065) = 19,2 \text{ мм}$ і число витків $\omega = \frac{l}{l_{\text{в}}} = \frac{15200}{19,2} = 796$. Активна довжина трубки $l_{\text{тр}} = \omega d_{\text{із}} = 796 \cdot 0,065 = 51,8 \text{ мм}$.

6. Бічна поверхня охолодження $S = \pi(D_{\text{тр}} + 2d_{\text{із}}) l_{\text{тр}} = \pi(6 + 2 \cdot 0,065) \cdot 51,8 = 996 \text{ мм}^2 = 9,96 \text{ см}^2$. Приймавши коефіцієнт теплопередачі в повітря $\gamma = 20 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}$, отримаємо $k = \gamma S = 2 \cdot 10^{-3} \times 9,96 = 1,99 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/град}$.

7. Об'єм міді $V_{\text{м}} = l \frac{\pi d^2}{4} = 1520 \frac{\pi(5 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 2,98 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3$; об'єм кераміки $V_{\text{кр}} = \frac{\pi}{4}(D_{\text{тр}}^2 - D^2) l_{\text{тр}} = \frac{\pi}{4}(6^2 - 4^2) 51,8 = 814 \text{ мм}^3 = 0,814 \text{ см}^3$. Приймавши питому об'ємну теплоємність для міді 3,5 і для кераміки $1,26 \text{ Дж/см}^3 \cdot \text{град}$, отримаємо загальну теплоємність термістора $C = 3,5 \cdot 2,98 \cdot 10^{-2} + 1,26 \cdot 0,814 = 1,13 \text{ Дж/град}$.

8. За формулою знаходимо постійні часу термістора $T_T = \frac{r_{\text{диф}} + r_{\text{пв}}}{2r_{\text{пв}}} \cdot \frac{C}{k} = \frac{224 + 193}{2 \cdot 193} \cdot \frac{1,13}{1,99 \cdot 10^{-2}} = 61 \text{ сек}$ і всієї схеми $T = 0,908 \cdot 61 = 55 \text{ сек}$.

9. З рівнянь (2.16), (2.8), (2.9), (2.11) знаходимо:

$$I_0 = I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{1,99 \cdot 10^{-2}(120 - 100)}{193}} = 0,0455 \text{ А} = 45,5 \text{ мА},$$

$$U = (r_1 + r_{\text{пов}})I_0 = 2 \cdot 193 \cdot 0,0455 = 17,6 \text{ В},$$

$$K_0 = 0,004 \frac{193^2}{193 + 224} \cdot 0,0455 = 16,2 \cdot 10^{-3} \text{ В/град},$$

$$K = \frac{1}{2} \cdot 16,2 \cdot 10^{-3} = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ В/град}.$$

Також для прикладу розрахуємо термометричний опір за схемою на напівпровідниковому термісторі для роботи як вимірювальний елемент за умови $\theta_{\text{зад}} = 20^\circ \text{ С}$, опір навантаження $r_{\text{н}} = 3 \text{ кОм}$, напруга джерела постійного струму $U = 28 \text{ В}$.

1. За каталогом обираємо термістор з опором при заданій температурі, близьким до $r_{\text{н}}$. Таким є термістор типу ТОС-М, що має такі параметри: $r_0 = 5 \text{ кОм}$; $I_{\text{доп}} = 5 \text{ мА}$; $\alpha = -0,03 \text{ 1/град}$; $P_{\text{доп}} = 60 \text{ мВт}$; $T_T = 4,5 \text{ сек}$; $\theta_{\text{раб}} = 0 \div 180^\circ \text{ С}$; $k = 1,3 \text{ мВт/град}$ і вагу $0,5 \text{ г}$.

2. Вирішуючи рівняння (2.15) $m^4 + 2m^3 - 14,5m^2 - 2m - 1 = 0$ чисельним методом (наприклад, методом Ньютона), знаходимо $m = 3,03$. Інші два комплексних і один дійсний від'ємний корінь нас не цікавлять.

3. За формулами (2.14), (2.21), (2.19) визначаємо:

$$I_0 = \sqrt{\frac{(1 + 3,03)1,3 \cdot 10^{(-3)}}{|1 - 3,03| \cdot |-0,03| \cdot 5 \cdot 10^{(-3)}}} = 4,15 \cdot 10^{(-3)} \quad \alpha < I_{\text{доп}},$$

$$r_{\text{пов}} = \frac{3,03 - 1}{2 \cdot 3,03} \cdot 5 \cdot 10^3 = 1,68 \text{ кОм},$$

$$r_{\text{диф}} = \left(2 \cdot \frac{1,68}{5} - 1\right) 1,68 = -0,552 \text{ кОм}.$$

4. Потужність розсіювання в термісторі:

$$P_T = r_{\text{пв}} I_0^2 = 1,68 \cdot 10^3 \cdot (4,15 \cdot 10^{-3})^2 = 28,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} < P_{\text{доп}}$$

5. З рівняння визначаємо: $n = \frac{2(m+1)\frac{r_H}{r_0}+1}{m-1} = \frac{2(3,03+1)\frac{3}{5}+1}{3,03-1} = 2,88$.

6. Знаходимо: $r_1 = m r_{пв} = 3,03 \cdot 1,68 = 5,07 \text{ кОм}$ та $r_2 = n r_1 = 2,88 \cdot 5,07 = 14,6 \text{ кОм}$.

7. За формулою $r_3 = \frac{r_2}{r_1} r_{пв} = n r_{пв} = 2,88 \cdot 1,68 = 4,82 \text{ кОм}$.

8. З рівнянь (2.13), (2.11), (2.7) визначаємо:

$$|K_0| = \frac{m}{2} \sqrt{\frac{\alpha k r_0}{1-m^2}} = \frac{3,03}{2} \sqrt{\frac{(-0,03) \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3}{1-3,03^2}} = 0,234 \text{ D/град},$$

$$|K| = \frac{1}{2} |K_0| = \frac{1}{2} \cdot 0,234 = 0,117 \text{ В/град},$$

$$T = 1,96 \cdot T_T = 1,96 \cdot 4,5 = 8,8 \text{ сек.}$$

2.2 Розрахунок параметрів мостової схеми вимірювального елемента напруги з нелінійним опором

Мостова схема, подібна до термістора-опору з одним або з двома однаковими нелінійними опорами у двох протилежних плечах, може слугувати вимірювальним елементом напруги або температури (у випадку підключення термометра опору у схему подільника напруги, яка, в свою чергу, може підключатися до мостової схеми відповідним чином).

Схема вимірювального елемента з одним нелінійним опором r . Резистори r_1 , r_2 , r_3 виконано з манганінового дроту, їхній опір постійний. За допомогою одного з них міст урівноважується ($U_{вих} = 0$), коли на вході напруга дорівнює заданому значенню ($U_{вх} = U_{зад}$). У разі відхилення $U_{вх}$ в той чи інший бік від $U_{зад}$ за рахунок зміни струму в r змінюється величина r , і міст виходить із рівноваги у відповідний бік. Задане значення $U_{зад}$ можна змінювати, регулюючи величину опору одного з постійних резисторів.

Схема з двома однаковими нелінійними опорами має вдвічі більшу чутливість, ніж з одним, за інших рівних умов.

У якості нелінійного опору, можуть бути застосовані теплоінерційні опори (термістори, барретори, лампи розжарювання), та безінерційні (віліти, тирити, лампи тліючого і дугового розряду), у яких опір безпосередньо залежить від величини струму, протікаючого в схемі.

Краще обирати безінерційні опори, особливо тирити і віліти, а з теплоінерційних - лампи розжарювання. Для збільшення швидкодії схеми можуть використовуватися всі безінерційні опори, але краще за інших - віліти і тирити.

Статична чутливість мостової схеми в режимі холостого ходу ($r_n = \infty$):

$$K_0 = \frac{dU_{\text{вих } 0}}{dU_{\text{вх}}} = \frac{r_1(r_{\text{пов}} - r_{\text{диф}})}{(r_1 + r_{\text{пов}})(r_1 + r_{\text{диф}})}, \quad (2.22)$$

де величини $r_{\text{пов}}$ и $r_{\text{диф}}$ визначені вище.

Чутливість схеми за увімкненого навантаження визначається рівняннями схеми, на підставі яких:

$$K = \frac{dU_{\text{вих}}}{dU_{\text{вх}}} = \frac{r_n r_1 (r_{\text{пов}} - r_{\text{диф}})}{r_n (r_1 + r_{\text{диф}})(r_1 + r_{\text{пов}}) + r_1 r_{\text{диф}}(r_1 + r_{\text{пов}}) + r_2 r_{\text{пов}}(r_1 + r_{\text{диф}})}. \quad (2.23)$$

Постійна часу схеми:

$$T = \frac{(r_1 + r_{\text{пов}})(r_n r_1 + r_n r_{\text{пов}} + r_1 r_{\text{пов}} + r_2 r_{\text{пов}})}{(r_1 + r_{\text{диф}})(r_n r_1 + r_n r_{\text{пов}} + r_2 r_{\text{пов}}) + r_1 r_{\text{диф}}(r_1 + r_{\text{пов}})} T_T,$$

де T_T - теплоінерційний опір.

Як видно з рівняння (2.13), $|K_0|$ досягає максимуму, що існує при $r_{\text{диф}} > 0$ і рівного:

$$|K_0|_{\text{макс}} = \left| \frac{\sqrt{\frac{r_{\text{диф}}}{r_{\text{пов}}} - 1}}{\sqrt{\frac{r_{\text{диф}}}{r_{\text{пов}}} + 1}} \right| < 1 \text{ при } r_1 = r_{1 \text{ опт}} = \sqrt{r_{\text{диф}} r_{\text{пов}}}. \quad (2.24)$$

Останній вираз показує, що відношення $\frac{r_{\text{диф}}}{r_{\text{пов}}}$ слід вибирати якомога більшим або меншим за одиницю, щоб наблизити $|K_0|_{\text{макс}}$ до одиниці. Робочу точку на вольт-амперній характеристиці нелінійного опору, що відповідає

максимуму або мінімуму $\frac{r_{\text{диф}}}{r_{\text{пов}}}$ легко знайти, якщо перебудувати її в логарифмічному масштабі, оскільки:

$$\frac{r_{\text{диф}}}{r_{\text{пов}}} = \frac{IdU_T}{U_T dI} = \frac{d \ln U_T}{d \ln I}.$$

Шуканими точками будуть точки перегину.

Якщо точку з координатами I_0, U_0 прийняти для врівноваженого стану мосту, то вибрати r_1 можна за умови, що $U_{\text{зад}}$ не задано чисельно, оскільки рівняння $r_1 + r_{\text{пов}} = \frac{U_{\text{зад}}}{I_0}$, де $r_{\text{пов}} = \frac{U_0}{I_0}$, уже визначає r_1 . Величина $U_{\text{зад}}$ не задана чисельно, якщо $U_{\text{вх}}$ подається на вхід системи через трансформатор або дільник, коефіцієнт передачі якого ще не вибрано.

При $r_{\text{диф}} < 0$ и $|r_{\text{диф}}| < r_1 |K_0|$, якщо $r_1 \rightarrow |r_{\text{диф}}|$, схема працює в режимі підсилювача з $|K_0| > 1$. Чим більше $|K_0|$, тим сильніше позначається на роботі мосту вплив сторонніх чинників. Отже, у цьому режимі залежно від стабільності вольт-амперної характеристики нелінійного опору не слід добиватися великого значення $|K_0|$.

При $r_{\text{диф}} < 0$ и $|r_{\text{диф}}| > r_1$ схема переходить у релейний режим, який нас не цікавить.

Розрахунок схеми в режимі холостого ходу має практичний сенс, коли опір навантаження $r_{\text{н}}$ завідомо у багато разів більший за внутрішній опір схеми. При цьому зазвичай вибирають $r_2 = r_1$ і згідно $r_3 = r_{\text{пов}}$.

Під час увімкнення навантаження статична чутливість схеми за абсолютним значенням зменшується до величини, що визначається рівнянням наведеним вище. При узгодженому навантаженні ($r_{\text{н}} = r_{\text{вн}}$) корисна потужність у навантаженні та ККД схеми досягають максимуму. Під час розв'язання задачі синтезу величина $r_{\text{н}} = \text{const}$, оскільки вона задана. Видно, що $|K|$ збільшується при зменшенні r_2 , прямуючи до певної межі, яка практично не досяжна через обмеження, що накладається потужністю, яка розсіюється в гілці r_2, r_3 . Зазвичай вибирають $r_2 = r_1$, тоді $r_3 = r_{\text{пов}}$. При цьому функція $|K| = |K(r_1)|$ має максимум при:

$$r_1 = r_{1 \text{ опт}} = \sqrt{\frac{r_n r_{\text{диф}} r_{\text{пов}}}{r_n + r_{\text{диф}} + r_{\text{пов}}}}, \quad (2.25)$$

Рівний:

$$|K|_{\text{макс}} = \frac{r_n |r_{\text{пов}} - r_{\text{диф}}|}{r_n (r_{\text{диф}} + r_{\text{пов}}) + 2 r_{\text{диф}} r_{\text{пов}} + 2 \sqrt{r_n r_{\text{диф}} r_{\text{пов}} (r_n + r_{\text{пов}} + r_{\text{диф}})}}, \quad (2.26)$$

в існуючий при $r_{\text{диф}} > 0$.

Користуватися рівнянням (2.25) можна тільки в тому разі, якщо $U_{\text{зад}}$ чисельно не задано, оскільки $U_{\text{зад}}$ визначає r_1 рівнянням:

$$U_{\text{зад}} = (r_1 + r_{\text{пов}}) I_0, \quad (2.27)$$

де I_0 - струм, що протікає через нелінійний опір за рівноваги моста ($U_{\text{вх}} = U_{\text{зад}}$); для збільшення різниці $r_{\text{пов}} - r_{\text{диф}}$ його бажано вибирати близьким до допустимого значення $I_{\text{доп}}$, що визначається допустимою потужністю розсіювання в цьому термісторі.

При $r_{\text{диф}} < 0$, але за позитивності знаменника рівняння (2.23) зберігається підсилювальний режим схеми. Для збільшення $|K|$ струм I_0 слід вибирати якомога більшим.

У разі використання термістора як нелінійного опору, якщо зміни струму в ньому невеликі, вольт-амперна характеристика його описується рівнянням (2.2):

$$U_T = \frac{r_0 I}{1 - \frac{\alpha}{k} r_0 I^2}, \quad (2.28)$$

де r_0 - опір його за відсутності струму.

Розглянемо приклади розрахунку мостової схеми вимірювального елемента напруги.

Розрахуємо схему вимірювального елемента на лампі розжарювання за заданої напруги $U_{\text{зад}} = 26\text{В}$ і опорі навантаження $r_n = 300\text{ Ом}$. Температура навколишнього середовища $\theta_{\text{сер}} = 20^\circ \text{C}$.

1. Вибираємо лампу розжарювання з вольфрамовою ниткою з напругою і опором, близькими до $U_{\text{зад}}$ і r_n її параметри: $U_{\text{ном}} = 24\text{В}$; $I_{\text{ном}} = 0,1\text{А}$;

$\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3}$ 1/град; температура гарячої нитки $\theta_{\Gamma} = 2800^{\circ}\text{C}$; $T_T \approx 0,2\text{сек.}$

2. За формулою (2.1):

$$k = \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{\theta_{\Gamma} - \theta_{\text{сер}}} = \frac{24 \cdot 0,1}{2800 - 20} = 0,864 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/град.}$$

3. З рівняння (2.28) визначаємо:

$$r_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{\left(1 + \frac{\alpha}{k} U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}\right) I_{\text{ном}}} = \frac{24}{\left(1 + \frac{4,82}{0,864} \cdot 24 \cdot 0,1\right) \cdot 0,1} = 16,7 \text{ Ом.}$$

4. Прийmemo $I_0 = 0,0095\text{A} < I_{\text{ном}}$ щоб підвищити термін служби лампи, тоді з рівнянь (2.3) і (2.19) отримаємо:

$$r_{\text{пв}} = \frac{16,7}{1 - \frac{4,82}{0,864} \cdot 16,7 \cdot 0,095^2} = 104 \text{ Ом,}$$

$$r_{\text{диф}} = \left(2 \cdot \frac{104}{16,7} - 1\right) \cdot 104 = 1190 \text{ Ом.}$$

5. Якщо вибрати $r_2 = r_1$ и r_1 за формулою (2.25):

$$r_1 = \sqrt{\frac{300 \cdot 1190 \cdot 104}{300 + 1190 + 104}} = 1520 \text{ Ом,}$$

то з рівняння (2.26) визначимо:

$$\begin{aligned} |K|_{\text{макс}} &= \\ &= \frac{300|104 - 1190|}{300(1190 + 104) + 2 \cdot 1190 \cdot 104 + 2\sqrt{300 \cdot 1190 \cdot 104(300 + 1190 + 104)}} \\ &= 0,290, \end{aligned}$$

а з рівняння (2.27): $U_{\text{зад}} = (152 + 104) \cdot 0,095 = 24,3 \text{ В.}$

6. Якщо визначити за (2.27): $r_1 = \frac{U_{\text{зад}}}{I_0} - r_{\text{пв}} = \frac{26}{0,095} - 104 = 170 \text{ Ом,}$

вибрати $r_2 = r_1$ та $r_3 = r_{\text{пов}}$, то згідно з рівнянням (2.23):

$$\begin{aligned} K &= \frac{300 \cdot 170(104 - 1190)}{300(170 + 1190)(170 + 104) + 170 \cdot 1190(170 + 104) + 170 \cdot 104(170 + 1190)} = \\ &= -0,287. \end{aligned}$$

7. З рівняння (2.24) знаходимо постійну часу схеми:

$$T = 0,17 \cdot 0,2 = 0,034 \text{ сек.}$$

8. Споживана потужність:

$$P_{\text{спож}} \approx \left(\frac{1}{r_1 + r_{\text{пов}}} + \frac{1}{r_2 + r_3} \right) U_{\text{зад}}^2 = \left(\frac{1}{170 + 104} + \frac{1}{170 + 104} \right) \cdot 26^2 = 5 \text{ Вт.}$$

Для прикладу розрахуємо вимірювальний елемент напруги на термісторі за заданої напруги змінного струму $U_{\text{зад}} = 36 \text{ В}$, опорі навантаження $r_{\text{н}} = 2000 \text{ Ом}$, температурі навколишнього середовища $\theta_{\text{ср}} = 20^\circ \text{C}$.

1. Для цього прикладу придатний термістор ТОС-М, де для нього при $\theta_{\text{ср}} = 20^\circ \text{C}$ і струмі $I_0 = 0,00415 \text{ А}$ розраховані параметри $r_{\text{пов}} = 1680 \text{ Ом}$ та $r_{\text{диф}} = -552 \text{ Ом}$, а також $T_t \approx 4,5 \text{ сек.}$

2. З рівняння (2.27) знаходимо:

$$r_1 = \frac{U_{\text{зад}}}{I_0} - r_{\text{пов}} = \frac{36}{4,15 \cdot 10^{-3}} - 1680 = 7000 \text{ Ом.}$$

3. Вибираємо $r_2 = r_1$ і $r_3 = r_{\text{пов}}$. Тоді за формулою (2.23) визначимо:

$$K = \frac{2 \cdot 7(1,68 + 0,552)}{2(7 - 0,552)(7 + 1,68) - 7 \cdot 0,552(7 + 1,68) + 7 \cdot 1,68(7 - 0,552)} = 0,204.$$

4. З рівняння (2.24) визначаємо: $T = 2,3 \cdot 4,5 \approx 10 \text{ сек.}$

5. Споживана потужність:

$$P_{\text{спож}} \approx \left(\frac{1}{r_1 + r_{\text{пов}}} + \frac{1}{r_2 + r_3} \right) U_{\text{зад}}^2 = \frac{2}{7 \cdot 10^3 + 1,68 \cdot 10^3} \cdot 36^2 = 0,3 \text{ Вт.}$$

У разі використання у вимірювальному елементі теплоінерційного нелінійного опору на його роботу впливає зміна температури навколишнього середовища $\pm \Delta \theta_{\text{ср}}$ і за формулою (2.6) обчислити $K_0 = K$. Тоді нестабільність напруги на виході $\delta U_{\text{вих}} = K_0 \Delta \theta_{\text{ср}}$.

Якщо задатися $\Delta \theta_{\text{ср}} = \pm 20^\circ \text{C}$, то в першому прикладі $\pm \Delta U_{\text{вих}} = 3,56 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 0,071 \text{ В}$, а в другому прикладі $\mp \Delta U_{\text{вих}} = 0,17 \cdot 20 = 3,4 \text{ В}$.

Аналогічно викликає нестабільність напруги на виході термометра-опору коливання напруги живлення $\pm \Delta U$: $\Delta U_{\text{вих}} = K_U \Delta U$, де $K_U = K$ визначається рівнянням (2.23).

2.3 Похибки термометрів опору включених у вимірювальну схему подільника напруги

Розглянемо випадок [15] виникнення похибки перетворення вихідного сигналу в подільнику напруги (рис.2.2), що виникає внаслідок відхилення значень опорів резисторів від їх нормованих показників:

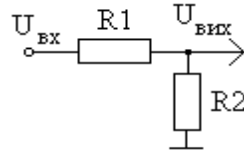


Рисунок 2.2 – Схема включення опору

$$K = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_{2N} + \Delta R_2}{R_{1N} + R_{2N} + \Delta R_1 + \Delta R_2}. \quad (2.29)$$

При відхиленні значень наведених на схемі опорів R_1, R_2 від їх розрахункових номінальних значень R_{1N}, R_{2N} на певні зміни величин $\Delta R_1, \Delta R_2$ загальний коефіцієнт передачі схеми подільника напруги буде відрізнятися від значення $K_N = \frac{R_{2N}}{R_{1N} + R_{2N}}$ з номінальними опорами. При цьому абсолютна похибка для коефіцієнта передачі буде становити $\Delta K = K - K_N$, а відносна похибка тоді складе $\gamma_K = \frac{\Delta K}{K_N} \cdot 100\%$.

Інший вид похибки, яка може виникати [15] пов'язаний із складовою загальної похибки, що виникає внаслідок впливу засобу вимірювання на стан подільника напруги. Виникнення цієї похибки від взаємодії з вимірювальним приладом вольтметром V розглянемо на прикладі підключення його з внутрішнім опором r_V (рис.2.3) до подільника напруги.

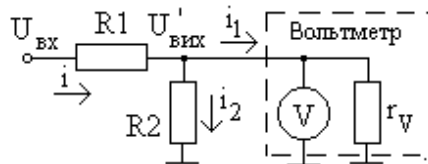


Рисунок 2.3 – Схема підключення вольтметра

Відносне значення похибки від взаємодії при підключенні вольтметра до подільника напруги можна показати так:

$$\gamma_6 = \frac{U_{вх} - U'_{вх}}{U_{вх}} \cdot 100\% = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot r_V + R_2 \cdot r_V} \cdot 100\%. \quad (2.30)$$

Можна також привести приклад додаткової похибки як температурної похибку подільника напруги. З урахуванням температурних коефіцієнтів опору (ТКО) резисторів схеми коефіцієнт передачі для цієї ділянки кола можна показати так:

$$K(t^o) = \frac{R_{10}(1+\alpha t^o)}{R_{10}(1+\alpha t^o) + R_{20}(1+\beta t^o)}, \quad (2.31)$$

де α, β - ТКО матеріалу опорів, з якого виготовлені резистори R_1, R_2 . Абсолютну температурну похибку подільника напруги подамо як:

$$\Delta K(t^o) = K(t^o) - K_N = \frac{R_{10}R_{20}(\beta t - \alpha t)}{(R_{10} + R_{20})[R_{10}(1+\alpha t) + R_{20}(1+\beta t)]}. \quad (2.32)$$

Отже, для того, щоб зменшити похибку коефіцієнту перетворення (передачі ланки схеми) ΔK , необхідно контролювати значення величин резисторів та виконувати їх з одного матеріалу, тоді $\alpha = \beta$, а ΔK прямуватиме до нуля.

2.4 Похибки термометрів опору включених у мостову вимірювальну схему

Приріст опору Δr лінії від зміни температури становитиме:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = r_1 \cdot \frac{t_2 - t_1}{\tau + t_1}. \quad (2.33)$$

Звідси отримуємо абсолютну похибку Δt в показах температури:

$$\Delta t = \frac{\Delta r}{\Delta R_T} = \frac{r_1 \cdot (t_2 - t_1)}{R_0 \cdot \alpha \cdot (\tau + t_1)}, \quad (2.34)$$

де R_0 – опір перетворювача термометра при 0°C ; $\Delta R_T = R_0 \alpha$ – приріст опору перетворювача при зміні вимірюваної температури на 1 град.

Так, наприклад, за значень $t_1 = 20^\circ\text{C}$; $t_2 = 50^\circ\text{C}$; $R_0 = 108,6 \text{ Ом}$ (перетворювач платиновий, для якого $\alpha = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$) у гіршому випадку, коли опір мідної лінії дорівнює 5 Ом, похибка вимірювання $\Delta t = + 4,1^\circ\text{C}$.

Для зменшення похибки від коливань температури лінії застосовують так звані багатопровідні лінії зв'язку, коли до перетворювача опору підводять більше двох дротів.

2.5 Розрахунок параметрів перетворювачів вологості середовища у вимірювальній схемі

Математична модель перетворення вимірювання вологості газу буде базуватися на зміні поведінки діелектрика в електромагнітному полі та характеризуватиметься величинами комплексних діелектричної ε^* та магнітної μ^* проникностей. У вологих немагнітних матеріалах їхні електричні властивості в слабких змінних електричних полях можна описати двома параметрами, пов'язаними з дійсною ε' та уявною ε'' складовими комплексної діелектричної проникності через $\varepsilon^* = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon(1 + j \operatorname{tg} \delta)$ [16]. Сучасна фізика діелектриків пов'язує залежність діелектричної проникності ε і $\operatorname{tg} \delta$ кута втрат матеріалів від їх властивостей.

Другим етапом розрахунку нашого перетворювача є включення ємнісного перетворювача у схему коливального контуру з котушкою та опором, а також обчислення його параметрів. Треба зазначити, що котушки для змінного струму повинні не тільки мати певний сталий активний опір, але й мати мінімальні реактивні складові опору [15].

Покажемо наш простий коливальний контур в наступному виді на рис.2.4.

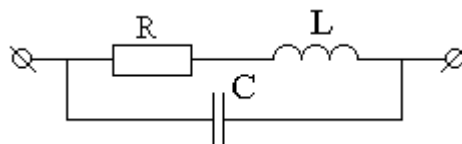


Рисунок 2.4 – Схема простого RLC контура

Проведемо розрахунок комплексного опору для нашого контуру:

$$\dot{Z} = \frac{(R + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2} + j\omega \frac{L - CR^2 - \omega^2 L^2 C}{(1 - \omega^2 CL)^2 + \omega^2 C^2 R^2}. \quad (2.35)$$

Зазвичай, виконується умова $\omega^2 LC \ll 1$, що дозволяє дещо спростити вираз (2.35):

$$\dot{Z} = \frac{R}{1+\omega^2 C^2 R^2} + j\omega \frac{L-CR^2-\omega^2 L^2 C}{1+\omega^2 C^2 R^2} = |\dot{Z}|e^{j\theta}, \quad (2.36)$$

де

$$|\dot{Z}| = \frac{\sqrt{R^2+(L-CR^2-\omega^2 L^2 C)^2}}{1+\omega^2 C^2 R^2}, \quad (2.37)$$

$$\theta = \arctg \frac{\omega(L-CR^2-\omega^2 L^2 C)}{R}. \quad (2.38)$$

Коливальний контур вимірювального перетворювача наведено на рис. 2.5.

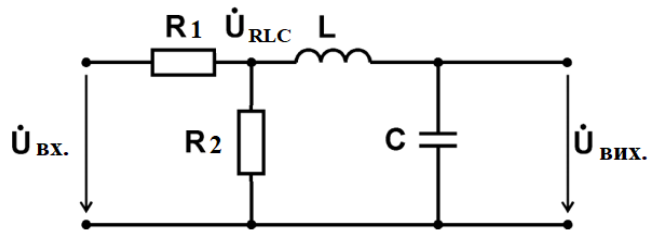


Рисунок 2.5 – Схема контура вимірювального перетворювача

Розрахуємо співвідношення комплексних напруг $\frac{U_{BX}}{U_{RLC}}$, що створюються в контурі, які відповідають співвідношенням опорів в схемі:

$$\frac{U_{BX}}{U_{RLC}} = \frac{\left(R_1 + \frac{R_2 \cdot \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right)}{R_2 + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \right)}{\left(\frac{R_2 \cdot \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right)}{R_2 + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \right)}, \quad (2.39)$$

звідки

$$Z_{нов} = R_1 + \frac{R_2 \cdot \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right)}{R_2 + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}},$$

$$Z_{нов} = R_1 + \frac{R_2 \cdot j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_2 + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)},$$

$$\dot{Z}_{нов} = R_1 + \frac{jR_2^2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + R_2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}{R_2^2 - jR_2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + jR_2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (2.40)$$

$$\dot{Z}_{нов} = R_1 + \frac{jR_2^2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + R_2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}{R_2^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

$$\dot{Z}_{нов} = R_1 + \frac{\left(R_2\omega L - \frac{R_2}{\omega C}\right)\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R_2^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} + j \frac{\left(R_2^2\omega L - R_2^2\frac{1}{\omega C}\right)}{R_2^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

$$\dot{Z}_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad (2.41)$$

$$K_{лан} = \frac{U_{Вих}}{U_{Вх}} = \frac{\dot{Z}_C}{\dot{Z}_{нов}}, \quad (2.42)$$

тоді отримаємо з виразів (2.40), (2.41) та (2.42) формулу для частоти ланки перетворювача:

$$f_{лан} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{R_2}{\omega C} - R_2\omega L\right)\omega^3 C^4}{R_2\omega^2 C^3 + \omega^3 LC^3 - \omega C^2}}, \quad (2.43)$$

$$f_{лан} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{R_2}{\omega C} - R_2\omega L\right)\omega^2 C^3}{R_2\omega C^2 + \omega^2 LC^2 - C}},$$

$$f_{лан} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_2\omega C^2 - R_2\omega^3 LC^3}{R_2\omega C^2 + \omega^2 LC^2 - C}},$$

$$f_{лан} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_2\omega C - R_2\omega^3 LC^2}{R_2\omega C + \omega^2 LC - 1}},$$

При $\omega^2 LC > 1$ вираз (2.43) наближено подамо так:

$$f_{лан} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_2 - R_2\omega^2 LC}{R_2 + L\omega}},$$

або

$$f_{\text{лан}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1-\omega^2 LC}{1+\frac{L\omega}{R_2}}}, \quad (2.44)$$

При $\omega^2 LC < 1$ вираз (2.43) наближено подамо так:

$$f_{\text{лан}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1-\omega^2 LC}{\omega^2 LC}}. \quad (2.45)$$

Для розрахунку залежності робочої частоти $f_{\text{лан}}$ коливань контуру ланки перетворювача від електричної ємності на певній ділянці частот можна показати так:

$$f_{\text{лан}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.46)$$

При ймовірнісних щільностях складових похибок, які спричиняються величинами, що входять у вираз (2.46), розподіляються за нормальним законом, то вираз для відносної похибки пристрою можна подати так:

$$\delta_f = \frac{\Delta f_{\text{лан}}}{f_{\text{лан}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\sqrt{L}}{\sqrt{L}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sqrt{C}}{\sqrt{C}}\right)^2} \cdot 100\%. \quad (2.47)$$

Як показали дослідження, складові загальної похибки не перевищують: $\delta_L = (\Delta\sqrt{L}/\sqrt{L}) \cdot 100\% \leq 3,6\%$, $\delta_C = (\Delta\sqrt{C}/\sqrt{C}) \cdot 100\% \leq 4,2\%$, а сама загальна відносна похибка $\delta_f = (\Delta f_{\text{лан}}/f_{\text{лан}}) \cdot 100\% \leq 5,53\%$, фактично можна прийняти $\delta_f = (\Delta f_{\text{лан}}/f_{\text{лан}}) \cdot 100\% \leq 6\%$.

Проведемо моделювання роботи коливального контуру вимірювального перетворювача при температурі $T = 25^\circ\text{C}$ та порівняємо результати з розрахунками за отриманими залежностями.

Покажемо моделювання (рис.2.6) та симуляцію роботи (рис.2.7 – рис.2.11) вимірювального контуру вологості із зменшенням частоти коливань

в ньому при збільшенні ємності сенсора. Зазначене враховувалося при порівнянні отриманих значень моделі контуру, та значень, які були отримані за рахунок математичних розрахунків (рис.2.12).

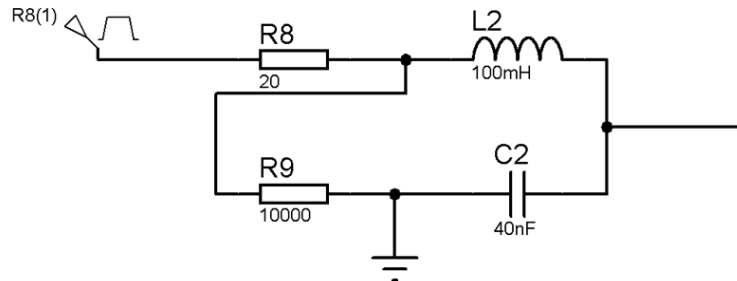


Рисунок 2.6 – Коливальний контур моделі

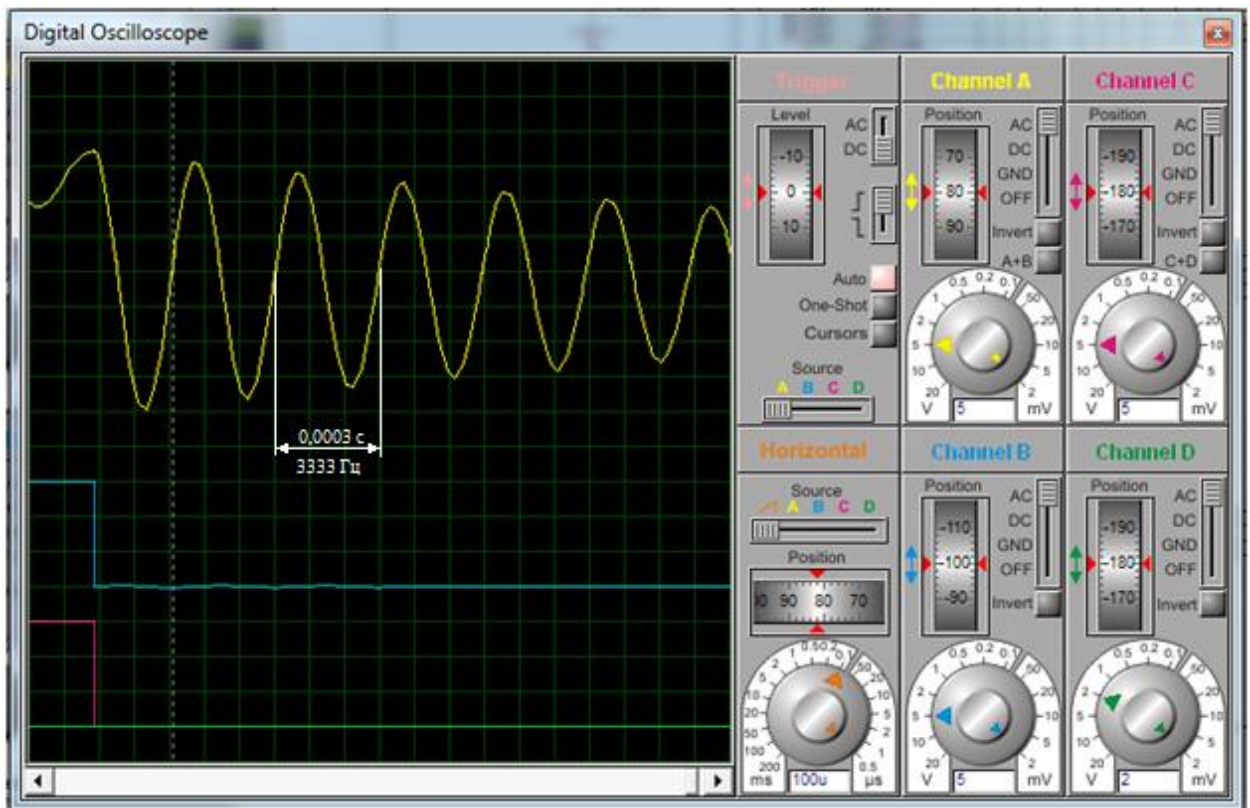


Рисунок 2.7 – Коливання з частотою 3333 Гц, що створювалися у вимірjuвальному контурі вологості при ємності 20 пФ

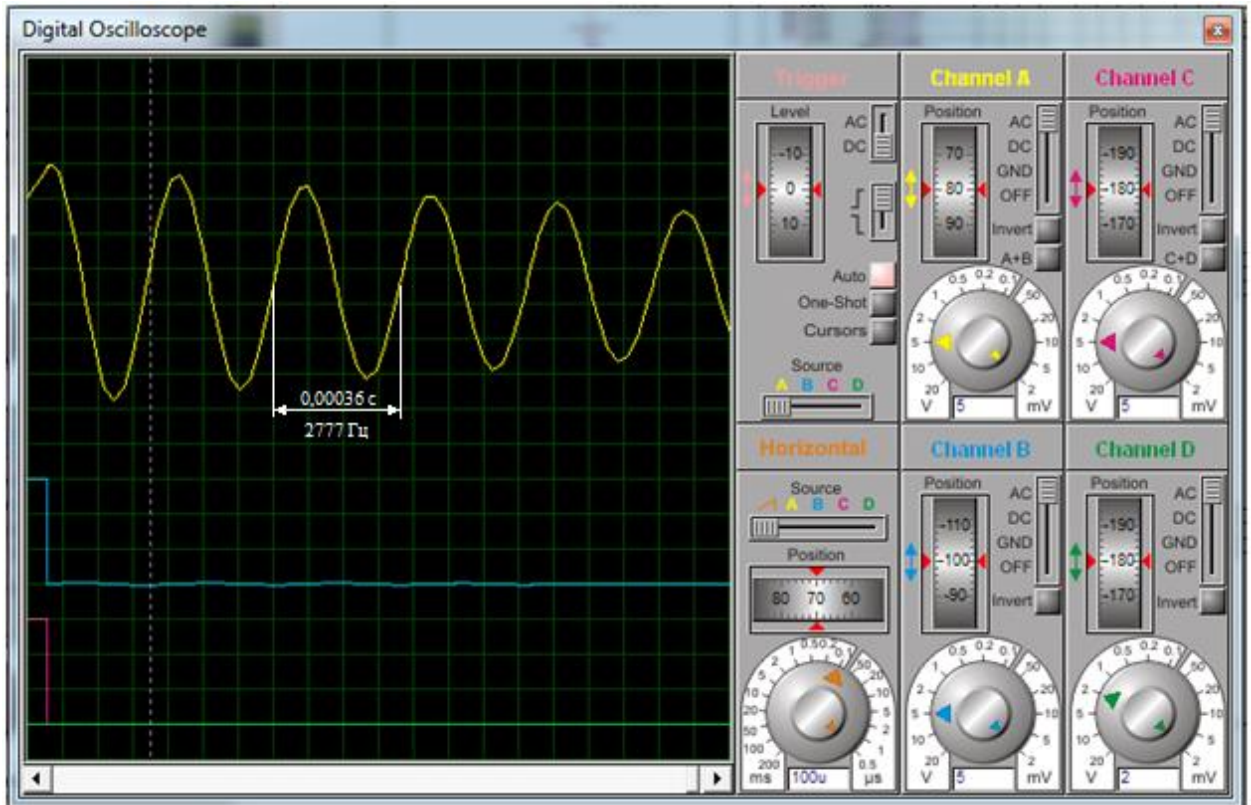


Рисунок 2.8 – Коливання з частотою 2777 Гц, що створювалися у вимірювальному контурі вологості при ємності 30 пФ

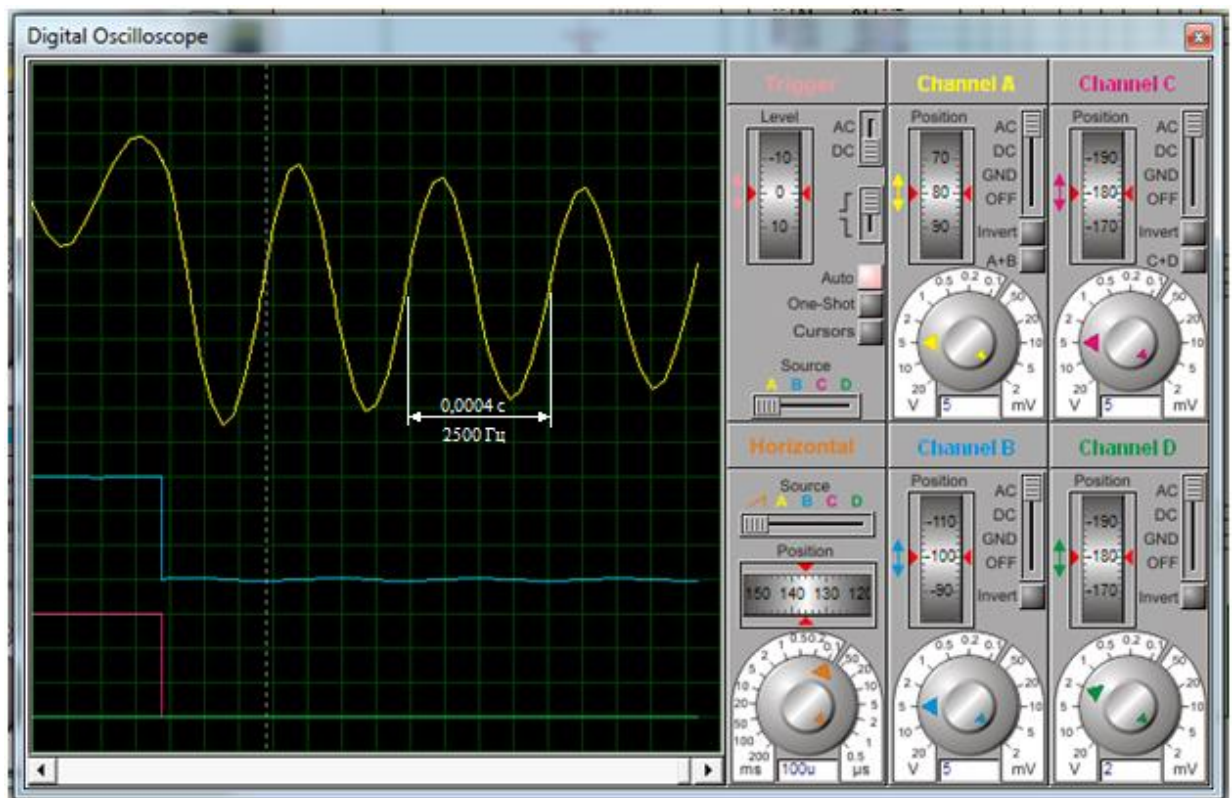


Рисунок 2.9 – Коливання з частотою 2500 Гц, що створювалися у вимірювальному контурі вологості при ємності 40 пФ

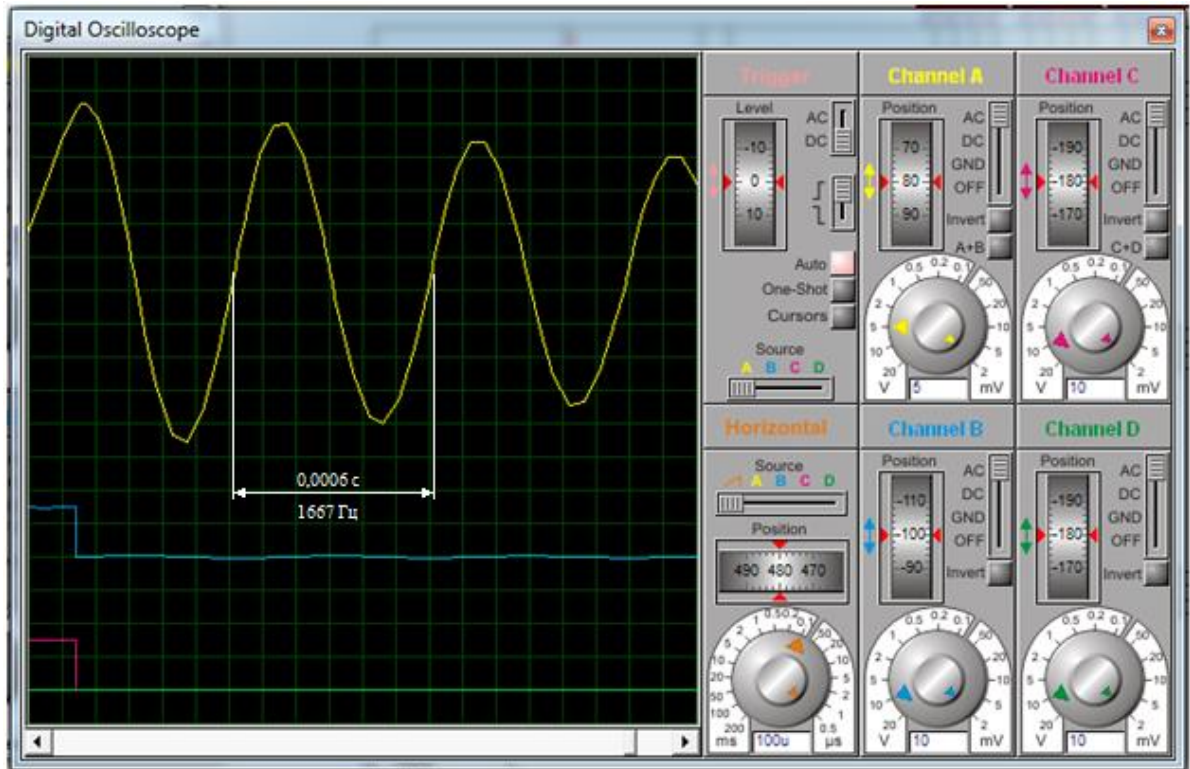


Рисунок 2.10 – Коливання з частотою 1667 Гц, що створювалися у вимірювальному контурі вологості при ємності 80 пФ

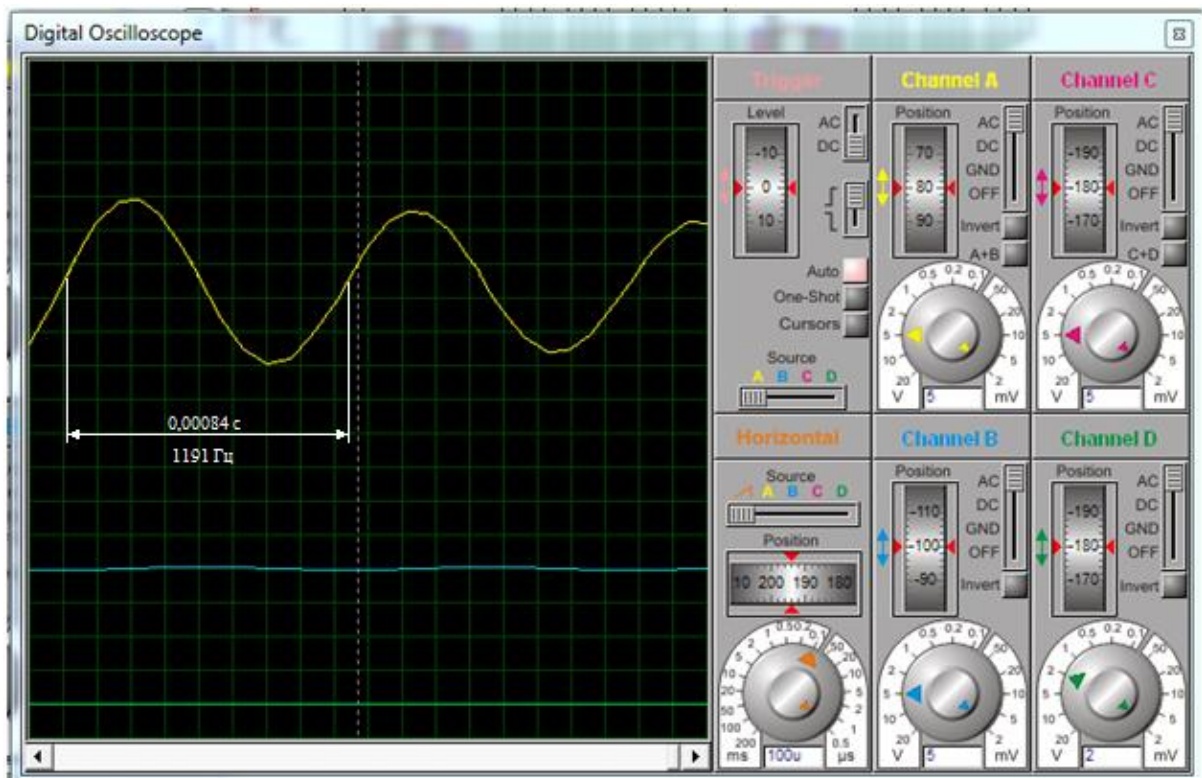


Рисунок 2.11 – Коливання з частотою 1191 Гц, що створювалися у вимірювальному контурі вологості при ємності 160 пФ

**Порівняння результатів моделювання роботи коливального контуру
вимірювального перетворювача вологості з розрахунками в MathCAD**

$$f := 2500 \text{ Гц} \quad L := 0.100 \text{ Гн} \quad i := \sqrt{-1} \quad C := 0.000000040 \text{ Ф}$$

$$R2 := 10000 \text{ Ом} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad \omega = 15707.963267949 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$R1 := 20 \text{ Ом}$$

$$\frac{\left[R1 + \frac{\left[R2 \cdot \left(i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C} \right) \right]}{\left[R2 + i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)} \right]} \right]}{\left[\frac{R2 \cdot \left[i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)} \right]}{R2 + i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)}} \right]} = 1.002 + 0.963711254010247i$$

$$\frac{\left[\frac{\left[R2 \cdot \left(i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C} \right) \right]}{\left[R2 + i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)} \right]} \right]}{\left[\frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)} \right]} = 0.013039503731052 + 0.000027061017866i$$

$$1 - \omega^2 \cdot L \cdot C = 0.013039559891064$$

$$\frac{\left(i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C} \right)}{\frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)}} = 0.013039559891064$$

$$\omega := \sqrt{(1 - 0.013039559891064) \cdot \frac{1}{L \cdot C}} = 15707.963267949$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{L \cdot C} \right) - \frac{0.013039559891064}{(L \cdot C)}} = 2500$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = 2516.46060522435$$

$$R1 + \frac{\left[R2 \cdot \left(i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C} \right) \right]}{\left[R2 + i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)} \right]} = 20.0430689475842 - 20.7530147426214i$$

$$\left[\frac{\left(R2 \cdot \omega \cdot L - R2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)}{R2^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2} \right] + R1 = 20.0430689475842$$

$$\left[\frac{\left(R2 \cdot \omega \cdot L - R2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \cdot R2 \cdot i}{R2^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2} \right] = -20.7530147426214i$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{i \cdot R2 \cdot \omega \cdot L + \frac{R2}{(i \cdot \omega \cdot C)}}{\left[\frac{R2}{(i \cdot \omega \cdot C)} \right] + \left(\frac{L}{C} \right) - \frac{1}{\omega^2 \cdot C^2}}} = 2500.00007136242$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{i \cdot \left(R2 \cdot \omega \cdot L - R2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \cdot (-\omega^3 \cdot C^4)}{i \cdot \left[R2 \cdot C^3 \cdot \omega^2 + (L \cdot \omega^3 \cdot C^3 - \omega \cdot C^2) \right]}} = 2499.96565516125$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{i \cdot \left(R2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} - R2 \cdot \omega \cdot L \right) \cdot (\omega^3 \cdot C^4)}{i \cdot \left[R2 \cdot C^3 \cdot \omega^2 + (L \cdot \omega^3 \cdot C^3 - \omega \cdot C^2) \right]}} = 2499.96565516125$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\left(R2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} - R2 \cdot \omega \cdot L \right) \cdot (\omega^2 \cdot C^3)}{(R2 \cdot C^2 \cdot \omega + L \cdot \omega^2 \cdot C^2 - C)}} = 2499.96565516125$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R2 \cdot \omega \cdot C^2 - R2 \cdot \omega^3 \cdot L \cdot C^3}{(R2 \cdot C^2 \cdot \omega + L \cdot \omega^2 \cdot C^2 - C)}} = 2499.96565516125$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R2 \cdot \omega \cdot C - R2 \cdot \omega^3 \cdot L \cdot C^2}{R2 \cdot C \cdot \omega + L \cdot \omega^2 \cdot C - 1}} = 2499.96565516125$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R2 \cdot \left(i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C} \right)}{\left[R2 + i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)} \right] \cdot \frac{1}{(i \cdot \omega \cdot C)}}}} = 2500.00007136242$$

$$\omega^2 \cdot L \cdot C = 0.987$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R2 - R2 \cdot \omega^2 \cdot L \cdot C}{R2 + L \cdot \omega}} = 2502.24096577992$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1 - \omega^2 \cdot L \cdot C}{1 + L \cdot \frac{\omega}{R2}}} = 2502.24096577992$$

$$f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1 - \omega^2 \cdot L \cdot C}{\omega^2 \cdot L \cdot C}} = 2499.78179970063$$

$$C := 0.000000020, 0.000000021 \dots 0.000000160$$

$$3558.81271708589 - 3333 = 225.813 \quad \frac{225.813 \cdot 100}{3333} = 6.775$$

$$2905.75841566274 - 2777 = 128.758 \quad \frac{128.758 \cdot 100}{2777} = 4.637$$

$$2516.46060522435 - 2500 = 16.461 \quad \frac{16.461 \cdot 100}{2500} = 0.658$$

$$1779.40635854294 - 1667 = 112.406 \quad \frac{112.406 \cdot 100}{1667} = 6.743$$

$$1258.23030261218 - 1191 = 67.23 \quad \frac{67.23 \cdot 100}{1064} = 6.319$$

$$L \cdot C \cdot (2 \cdot \pi \cdot 2500)^2$$

0.493
0.518
0.543
0.568
0.592
0.617
0.642
0.666
0.691
0.716
0.74
0.765
0.79
0.814
0.839
0.864

$$f(C) := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad f_m := \begin{pmatrix} 3333 \\ 2777 \\ 2500 \\ 1667 \\ 1191 \end{pmatrix} \quad C_m := \begin{pmatrix} 0.000000020 \\ 0.000000030 \\ 0.000000040 \\ 0.000000080 \\ 0.000000160 \end{pmatrix} \quad d_m := \begin{pmatrix} 6.775 \\ 4.637 \\ 0.658 \\ 6.743 \\ 6.319 \end{pmatrix}$$

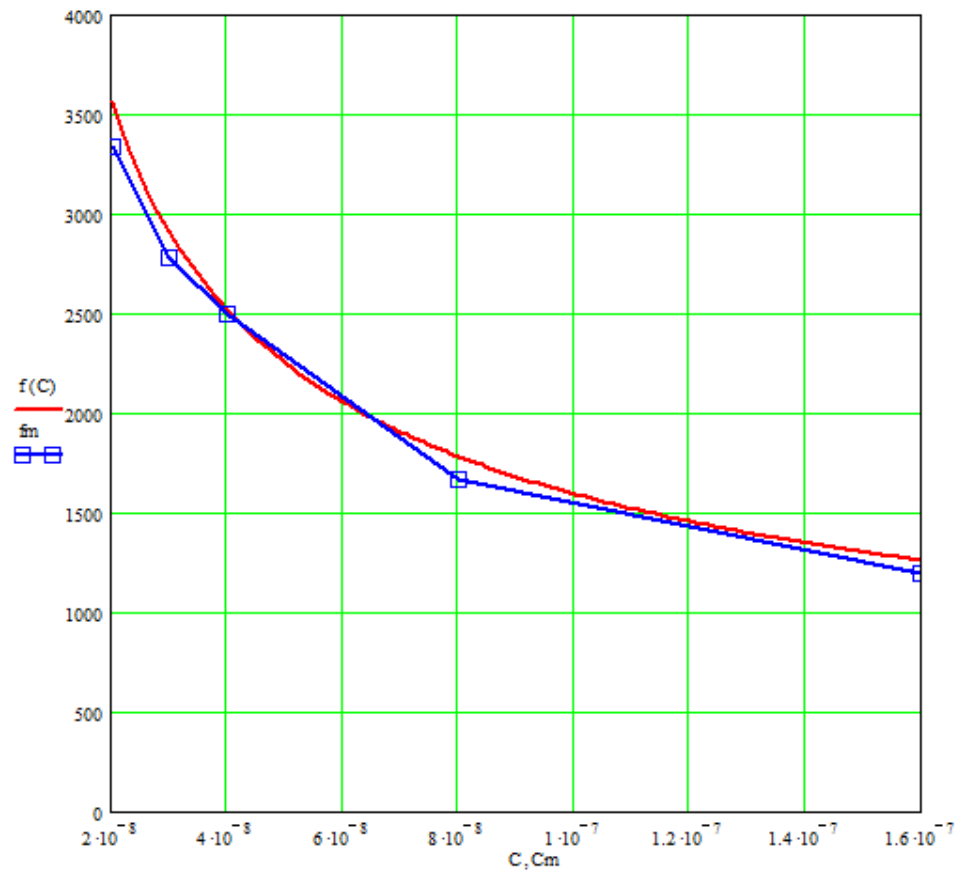


Рисунок 2.12 – Залежність зміни частоти $f_{\text{лан}}$ (розрахунок $f(C)$ та f_m модель), Гц від ємності C , Φ

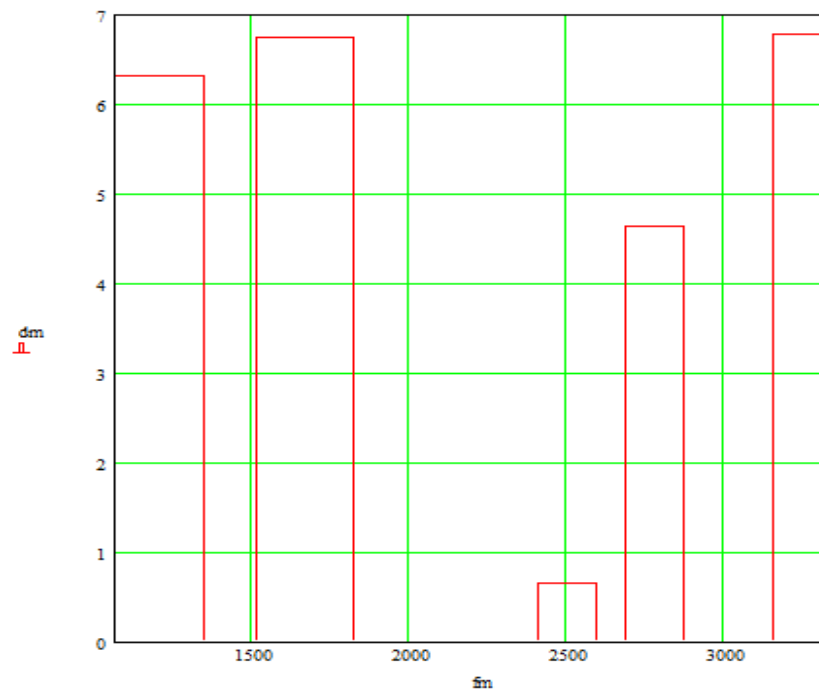


Рисунок 2.13 – Залежність відхилення d_m , % розрахунків частоти контуру $f(C)$, Гц за наближеною залежністю від частоти f_m , Гц моделі контуру

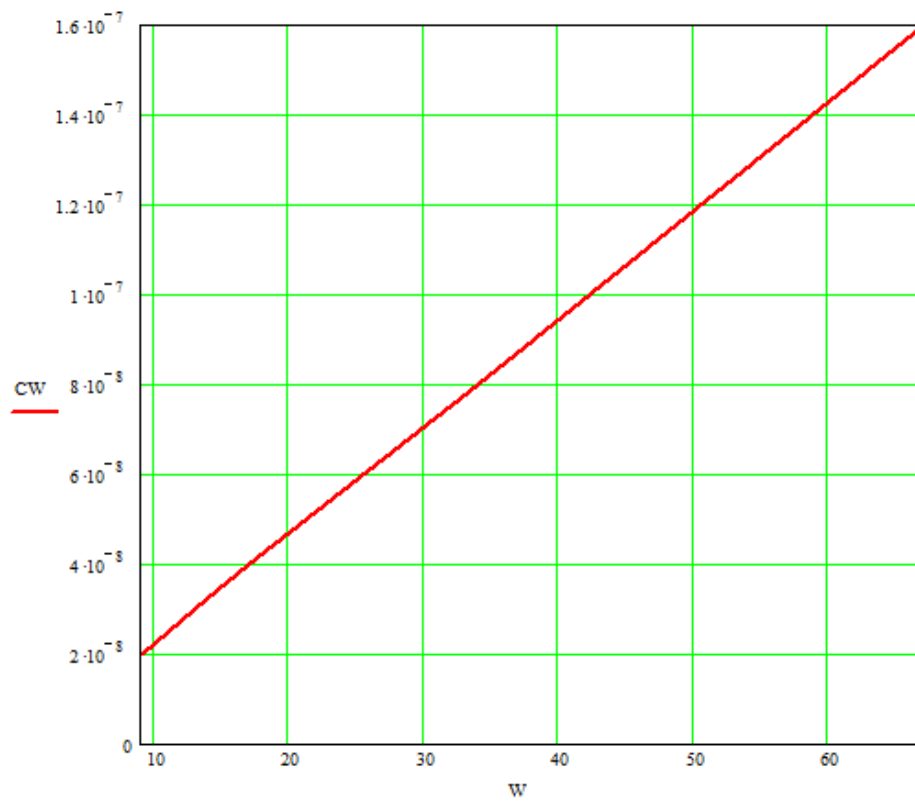


Рисунок 2.14 – Залежність ємності C, Φ від вологості $W, \%$ при температурі $T = 25^{\circ}C$

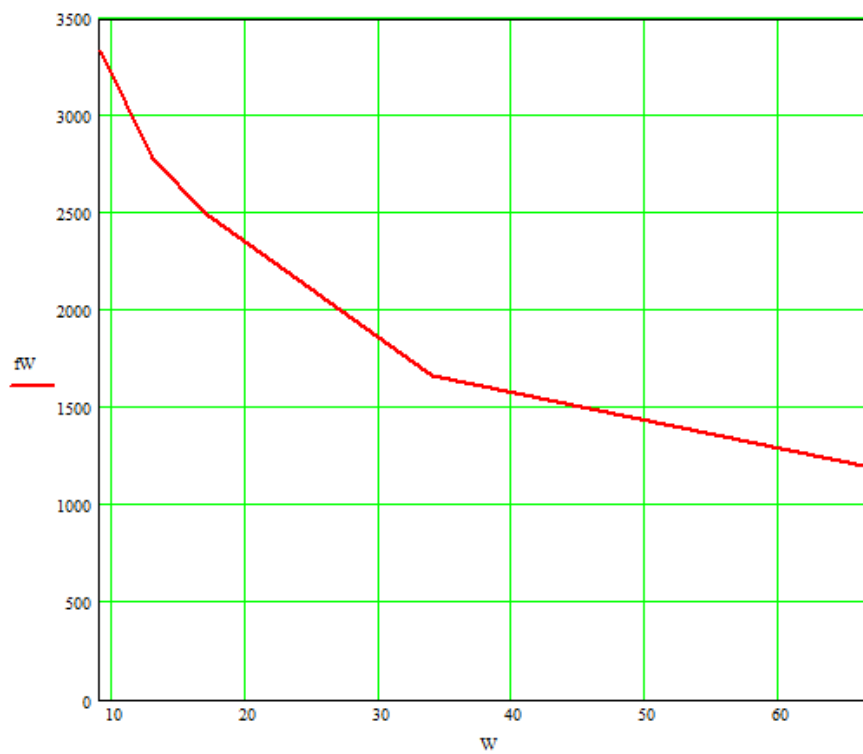


Рисунок 2.15 – Залежність частоти контуру $f_{\text{лан}}, \text{Гц}$ від вологості $W, \%$ при температурі $T = 25^{\circ}C$

Розрахунок в системі MathCAD надає змогу проаналізувати залежність інформативних параметрів перетворювачів від параметрів температури та вологості повітря у виробничих приміщеннях. Ці залежності можна застосовувати при розробці найкращих структур вимірювальних каналів приладу із застосуванням обраних методів отримання вимірювальної інформації.

Висновки до розділу 2

Проаналізувавши залежність зміни електричного опору термістора від зміни температури або залежність зміни напруги на термісторі та провівши розрахунок основних параметрів схеми включення первинного перетворювача (включення у мостову схему вимірювання температури чи в мостову схему вимірювання напруги) можна розробити вимірювальний канал приладу для отримання інформації про температуру повітряного середовища із оптимальною структурою.

Було також проаналізовано роботу коливального вимірювального контуру вологості (ланки вимірювального каналу) та отримано залежності зміни його частоти $f_{\text{лан}}$, Гц від ємності первинного перетворювача C , Φ .

Наведено залежність ємності первинного перетворювача C , Φ від вологості повітря W , % при температурі $T = 25^\circ\text{C}$.

Також було проаналізовано залежність частоти коливального контуру $f_{\text{лан}}$, Гц від вологості повітря W , % при температурі $T = 25^\circ\text{C}$ для подальшої розробки оптимальної структури вимірювального каналу приладу.

Розділ 3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ПРИБАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

3.1 Розробка структурної та електричної схем вимірювального каналу температури повітряного середовища

Вимірювальний прилад, який необхідно розробити, розділимо умовно на дві частини. До першої частини буде входити вимірювальний канал (ВК) температури, а до другої його частини буде входити ВК вологості. На рис.3.1 наведено структурну схему ВК температури.

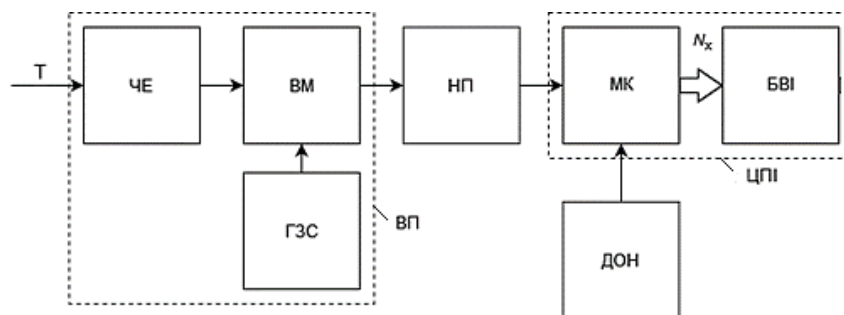


Рисунок 3.1 – Структурна схема ВК приладу для температури

На схемі позначено: ЧЕ – чутливий елемент; ВМ – вимірювальний міст; ГЗС – генератор змінного струму; ВП – вимірювальний перетворювач; НП – нормуючий перетворювач; ДОН – джерело опорної напруги; МК – мікроконтролер; БВІ – блок відображення інформації; ЦПІ – цифровий перетворювач інформації.

Перетворення відбувається наступним чином: на ВМ подається синусоїдальний сигнал з ГЗС, в залежності від температури змінюється опір ЧЕ, унаслідок чого змінюється вимірювана на мості напруга. Напруга випрямляється та підсилюється за необхідності для встановлення нормованого діапазону вимірюваної величини. Потім отримана напруга перетворюється в цифровий код за допомогою внутрішнього модуля аналого-цифрового перетворювача (АЦП) МК та налаштування ДОН, після програмне забезпечення МК обраховує температуру та відображає її на БВІ. На рис.3.2 показана електрична схема ВК температури.

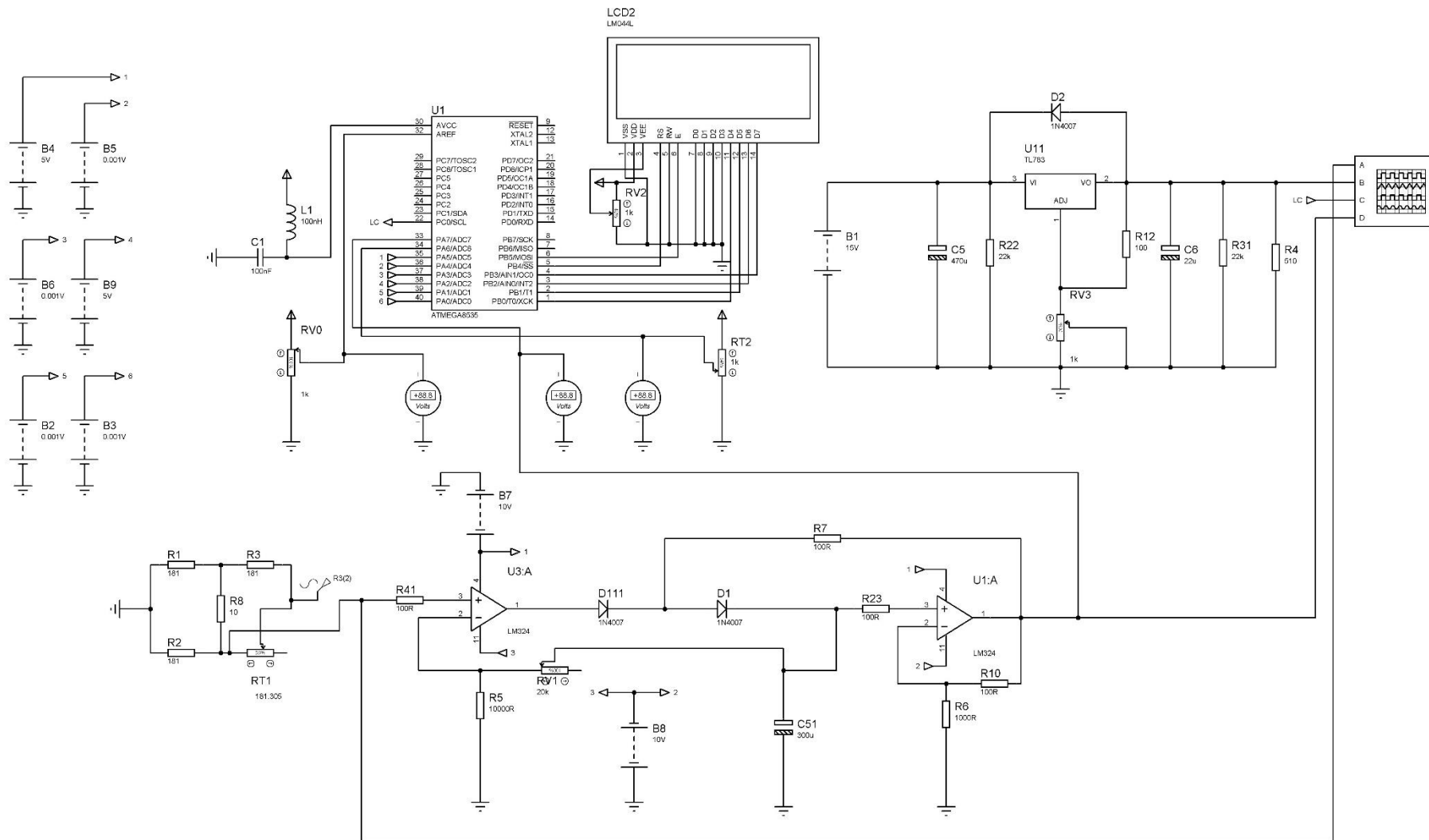


Рисунок 3.2 – Розроблена електрична схема ВК приладу для отримання інформації про температуру повітря

Тестовий код для можливості симулювати роботу приладу із застосуванням МК був написаний у відповідному програмному середовищі (рис.3.3) та показаний нижче.

Симуляція роботи приладу для отримання інформації про температуру та вологість повітря у виробничих приміщеннях показана на рис.3.4.

Тестовий код для розробленого вимірювального приладу

```
sbit LCD_RS at PORTB4_bit;  
sbit LCD_EN at PORTB5_bit;  
sbit LCD_D4 at PORTB0_bit;  
sbit LCD_D5 at PORTB1_bit;  
sbit LCD_D6 at PORTB2_bit;  
sbit LCD_D7 at PORTB3_bit;  
sbit LCD_RS_Direction at DDB4_bit;  
sbit LCD_EN_Direction at DDB5_bit;  
sbit LCD_D4_Direction at DDB0_bit;  
sbit LCD_D5_Direction at DDB1_bit;  
sbit LCD_D6_Direction at DDB2_bit;  
sbit LCD_D7_Direction at DDB3_bit;  
  
unsigned int adc_rd1;  
unsigned int adc_rd2;  
unsigned int adc_rd3;  
unsigned int adc_rd4;  
unsigned int adc_rd5;  
unsigned int adc_rd6;
```

```
unsigned int adc_rd7;  
unsigned int adc_rd8;  
unsigned char ch;  
char *text;  
long temper1;  
long temper2;  
long temper3;  
long Hum0;  
long H1;  
long H2;  
long H3;  
long H4;  
long H5;  
long H6;  
long Humid;
```

```
void main() {
```

```
    DDRA = 0x00;  
    PORTA = 0x00;  
    DDRB = 0xFF;  
    PORTB = 0x00;  
    PORTC = 0x00;  
    DDRC = 0x0F;  
    PORTC = 0x00;
```

```
Lcd_Init();  
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);  
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);  
text = "Temp1 =";  
Lcd_Out(1,1,text);  
text = "Temp2 =";  
Lcd_Out(2,1,text);  
text = "Temp. =";  
Lcd_Out(3,1,text);  
text = "Humid =";  
Lcd_Out(4,1,text);  
  
while (1) {  
    unsigned char a,b,c,d;  
    adc_rd1 = ADC_Read(0x07);  
    temper1 = (long)adc_rd1 * 5000;  
    adc_rd2 = ADC_Read(0x06);  
    Hum0 = (long)adc_rd2 * 1000 * 60;  
    temper2 = (long)adc_rd2 * 5000;  
    temper1 = 800000 - temper1;  
    temper1 = temper1 * 17;  
    temper1 = temper1 - 2200000;  
    temper2 = temper2/3.23;
```

```
temper3 = (temper1 + temper2)/2;  
adc_rd3 = ADC_Read(0x05);  
H1 = (long)adc_rd3 * 100;  
adc_rd4 = ADC_Read(0x04);  
H2 = (long)adc_rd4 * 100;  
adc_rd5 = ADC_Read(0x03);  
H3 = (long)adc_rd5 * 100;  
adc_rd6 = ADC_Read(0x02);  
H4 = (long)adc_rd6 * 1000;  
adc_rd7 = ADC_Read(0x01);  
H5 = (long)adc_rd7 * 1000;  
adc_rd8 = ADC_Read(0x00);  
H6 = (long)adc_rd8 * 1000;
```

```
temper1 = temper1 / 1023;  
ch = temper1 / 1000;  
Lcd_Chr(1,9,48+ch);  
ch = (temper1 / 100) % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
ch = (temper1 / 10) % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
Lcd_Chr_CP('.');  
ch = temper1 % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
Lcd_Chr_CP('C');
```

```
temper2 = temper2 / 1023;  
ch = temper2 / 1000;  
Lcd_Chr(2,9,48+ch);  
ch = (temper2 / 100) % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
ch = (temper2 / 10) % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
Lcd_Chr_CP('.');  
ch = temper2 % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
Lcd_Chr_CP('C');
```

```
temper3 = temper3 / 1023;  
ch = temper3 / 1000;  
Lcd_Chr(3,9,48+ch);  
ch = (temper3 / 100) % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
ch = (temper3 / 10) % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
Lcd_Chr_CP('.');  
ch = temper3 % 10;  
Lcd_Chr_CP(48+ch);  
Lcd_Chr_CP('C');
```

```
H1 = H1 * 1;
```

```

H2 = H2 * 2;

H3 = H3 * 4;

H4 = H4 * 1;

H5 = H5 * 2;

H6 = H6 * 4;


Humid = (H1 + H2 + H3);

Humid = Hum0 - (Humid + (H4 + H5 + H6));

Humid = Humid / 1023;

ch = Humid / 1000;

Lcd_Chr(4,9,48+ch);

ch = (Humid / 100) % 10;

Lcd_Chr_CP(48+ch);

Lcd_Chr_CP('.');

ch = (Humid / 10) % 10;

Lcd_Chr_CP(48+ch);

ch = Humid % 10;

Lcd_Chr_CP(48+ch);

Lcd_Chr_CP('%');


PORTC = 0b00000001;

Delay_ms(2);

PORTC = 0b00000000;

}

}

```

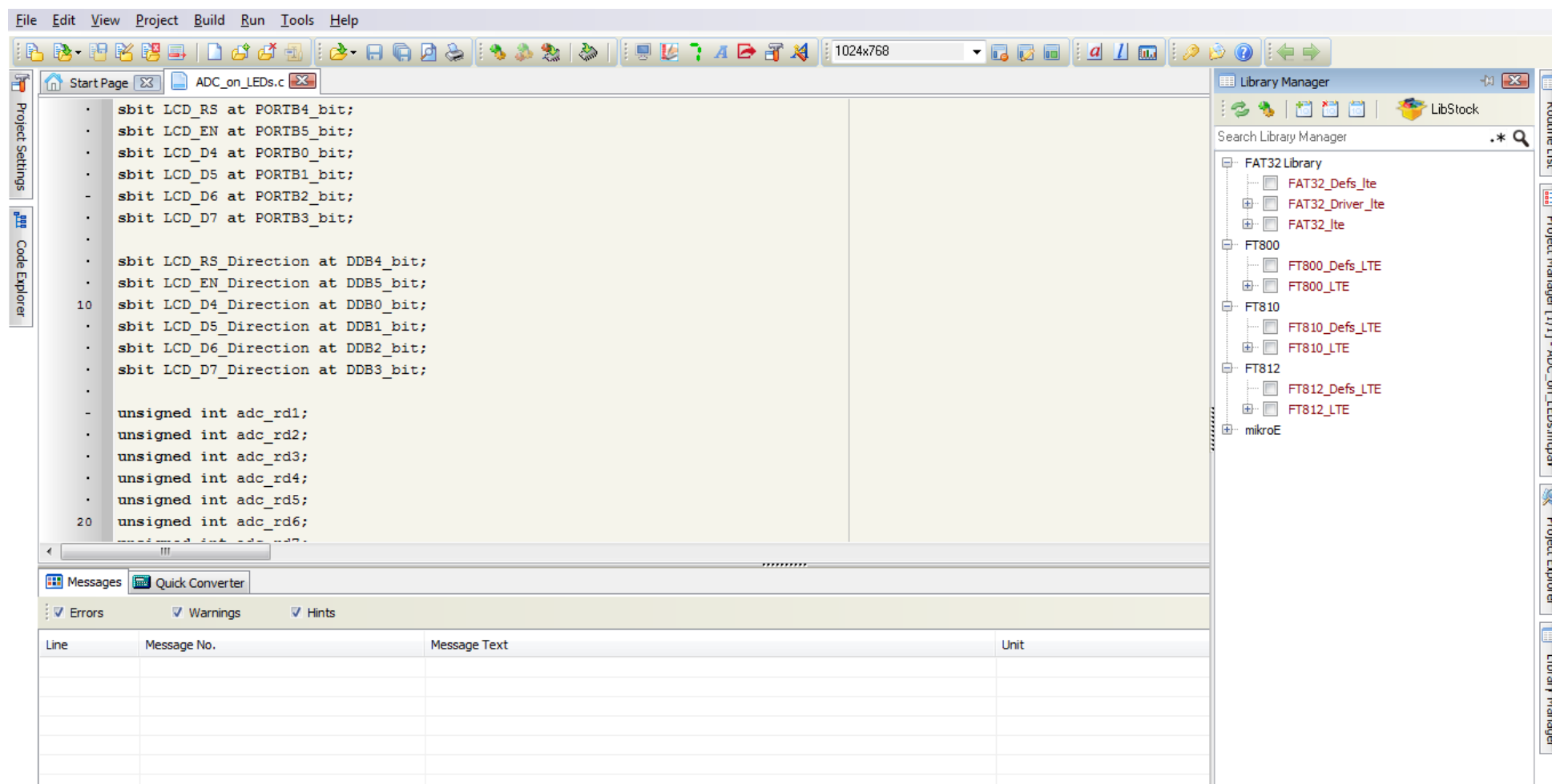


Рисунок 3.3 – Програмне середовище microC PRO for AVR для написання програмного коду МК

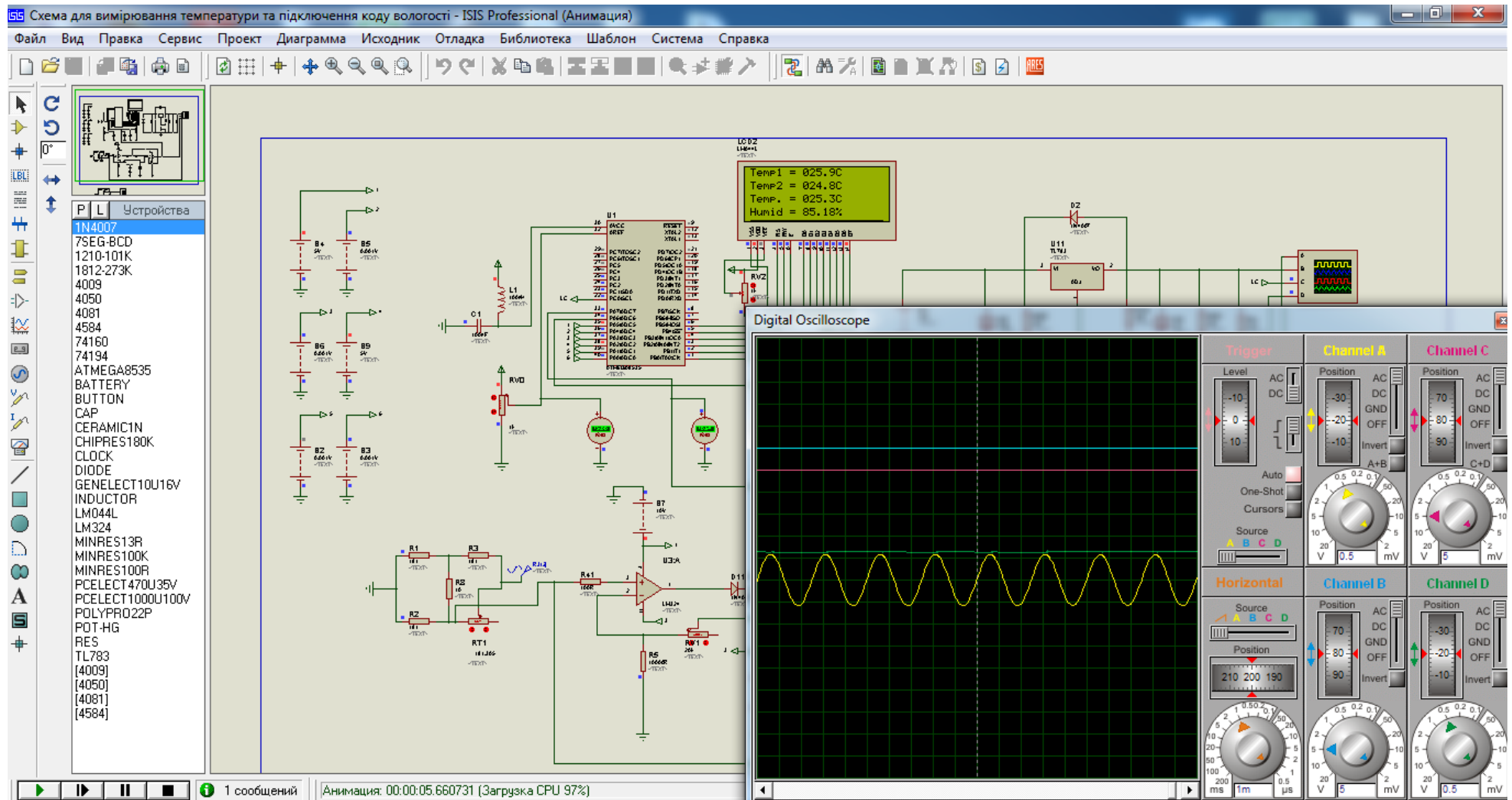


Рисунок 3.4 – Симуляція роботи розробленої електричної схеми ВК приладу для отримання інформації про температуру повітря в приміщенні

3.2 Розробка структурної та електричної схем вимірювального каналу вологості повітряного середовища

На рис.3.5 наведено структурну схему ВК приладу для вологості повітряного середовища.

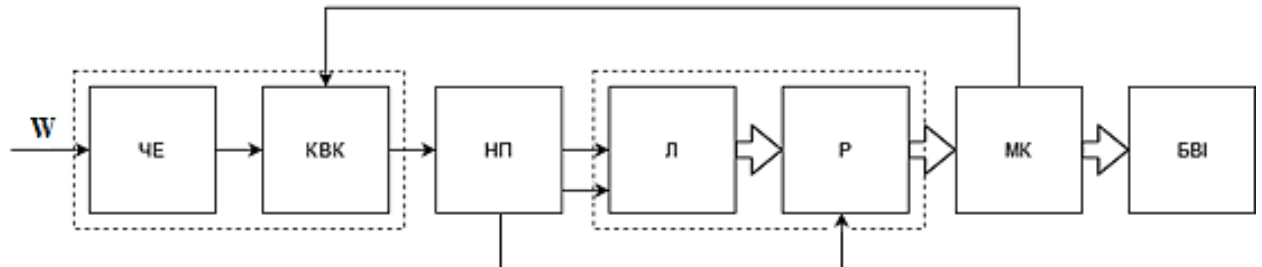


Рисунок 3.5 – Структурна схема ВК приладу для вологості

На схемі позначено: ЧЕ – чутливий елемент (ємнісний перетворювач); КВК – коливальний вимірювальний контур; НП – нормуючий пристрій; Л – лічильники імпульсів; Р – регістри; МК – мікроконтролер; БВІ – блок відображення інформації.

ВК приладу для вологості повітряного середовища працює наступним чином. МК подає на КВК короткочасовий імпульс, який створює у ньому коливання по двом фронтам імпульсу. По задньому фронті імпульсу коливання, що створюються КВК, далі проходять через НП, який перетворює ці коливання на імпульси, що потім надходять на блок Л, що далі підраховуються для кожного циклу вимірювання. Також блок НП синхронізує кожен цикл підрахунку кількості імпульсів у сформованому пакеті блоком Л (рис.3.8 – рис.3.12) із часом запису його стану блоком Р. МК зчитує код кількості імпульсів з блоку Р, та обраховує їх в частоту КВК при виміряній температурі повітряного середовища першим ВК приладу, а вже із цим врахуванням виконує перетворення значення частоти КВК в значення відносної вологості повітря у виробничому приміщенні.

На рис.3.6 та рис.3.7 показана розроблена електрична схема ВК вологості, тільки без блоків МК і БВІ. Загальна електрична схема вимірювального приладу, що застосовувалася для роботи його симуляції показана на рис.3.13.

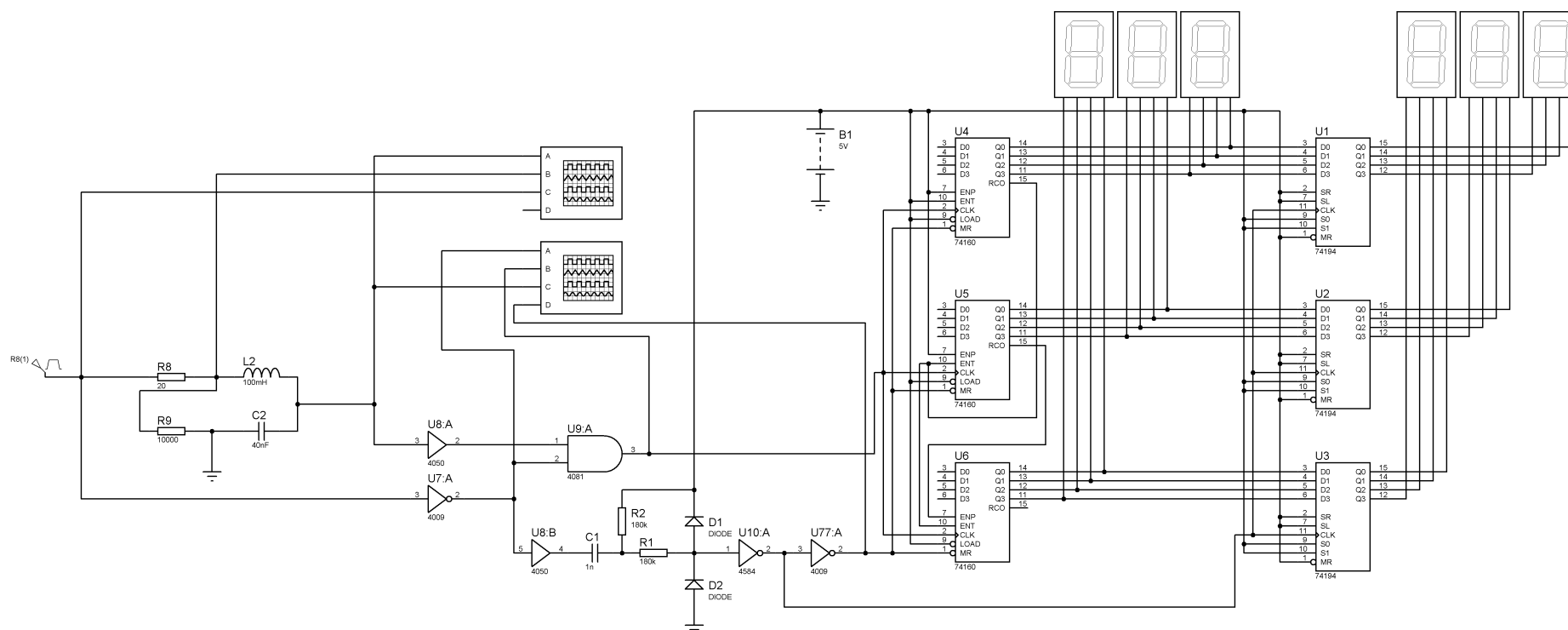


Рисунок 3.6 – Розроблена електрична схема частини ВК приладу для отримання інформації про вологість повітря у виробничих приміщеннях

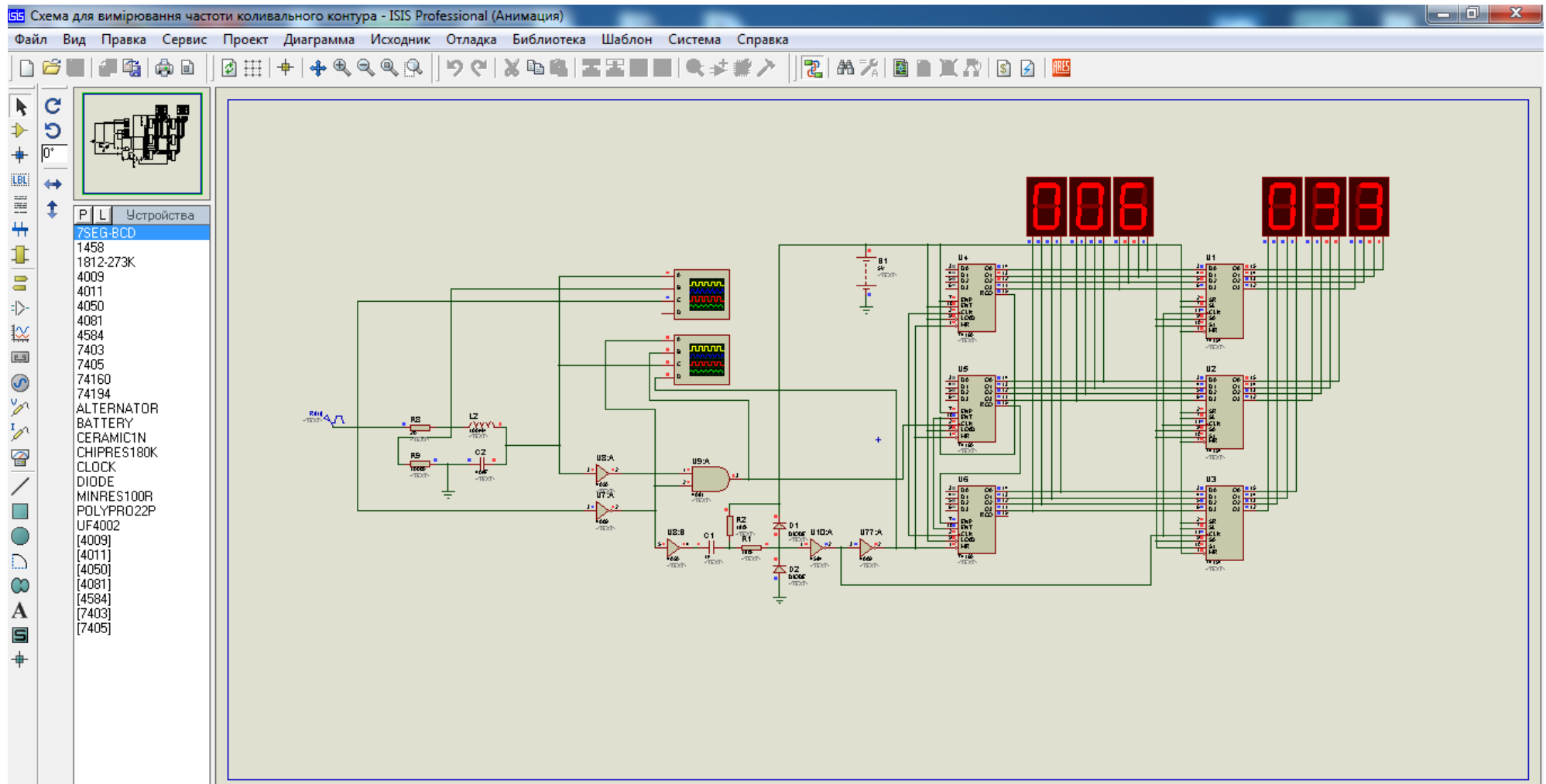


Рисунок 3.7 – Симуляція роботи розробленої електричної схеми частини ВК приладу для отримання інформації про вологість повітря у виробничих приміщеннях

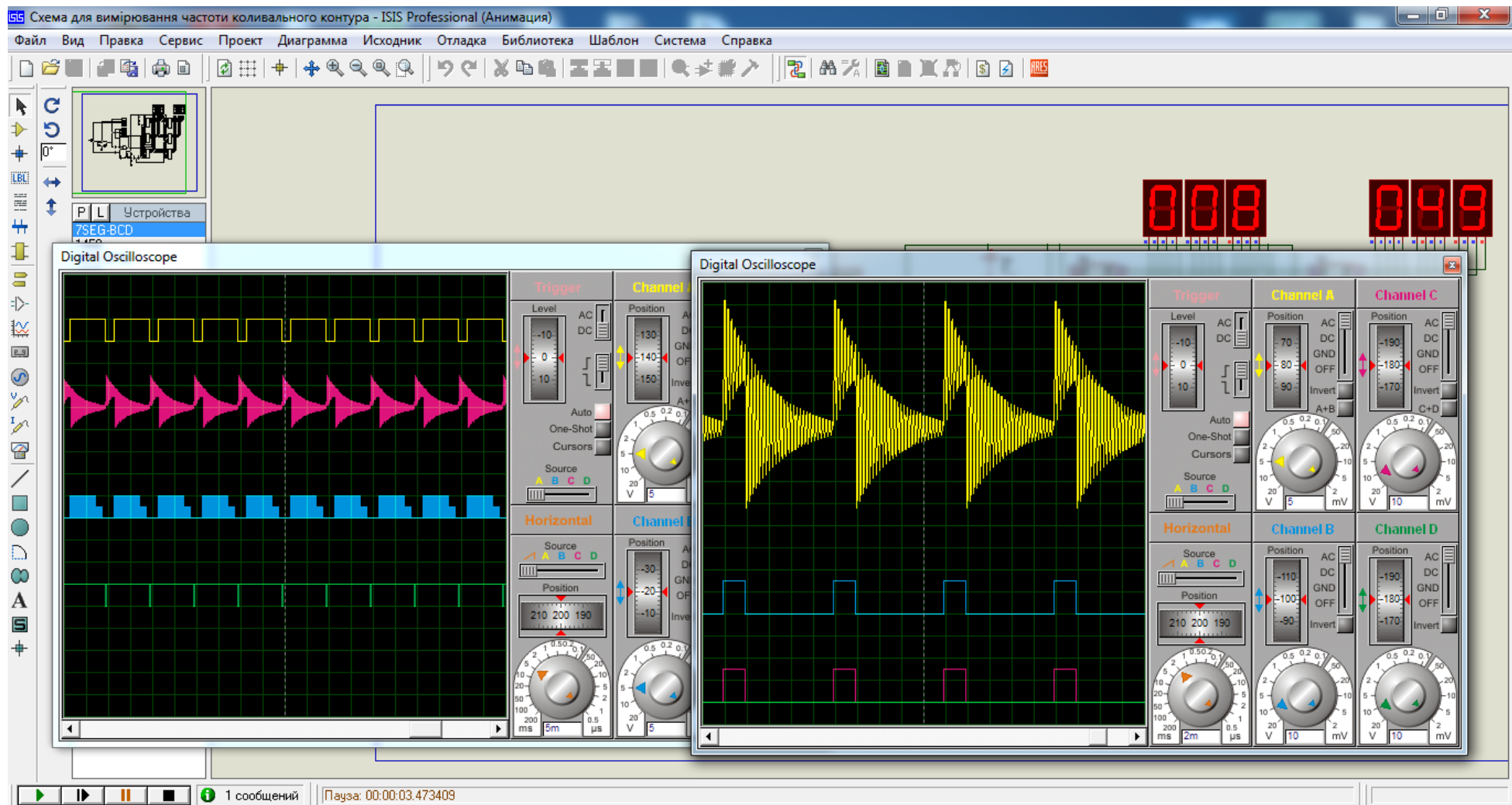


Рисунок 3.8 – Діаграми напруг схеми, що пояснюють принцип роботи ВК приладу для отримання інформації про вологість повітря у виробничих приміщеннях при частоті 3333 Гц, що задавалася при ємності 20 пФ КВК

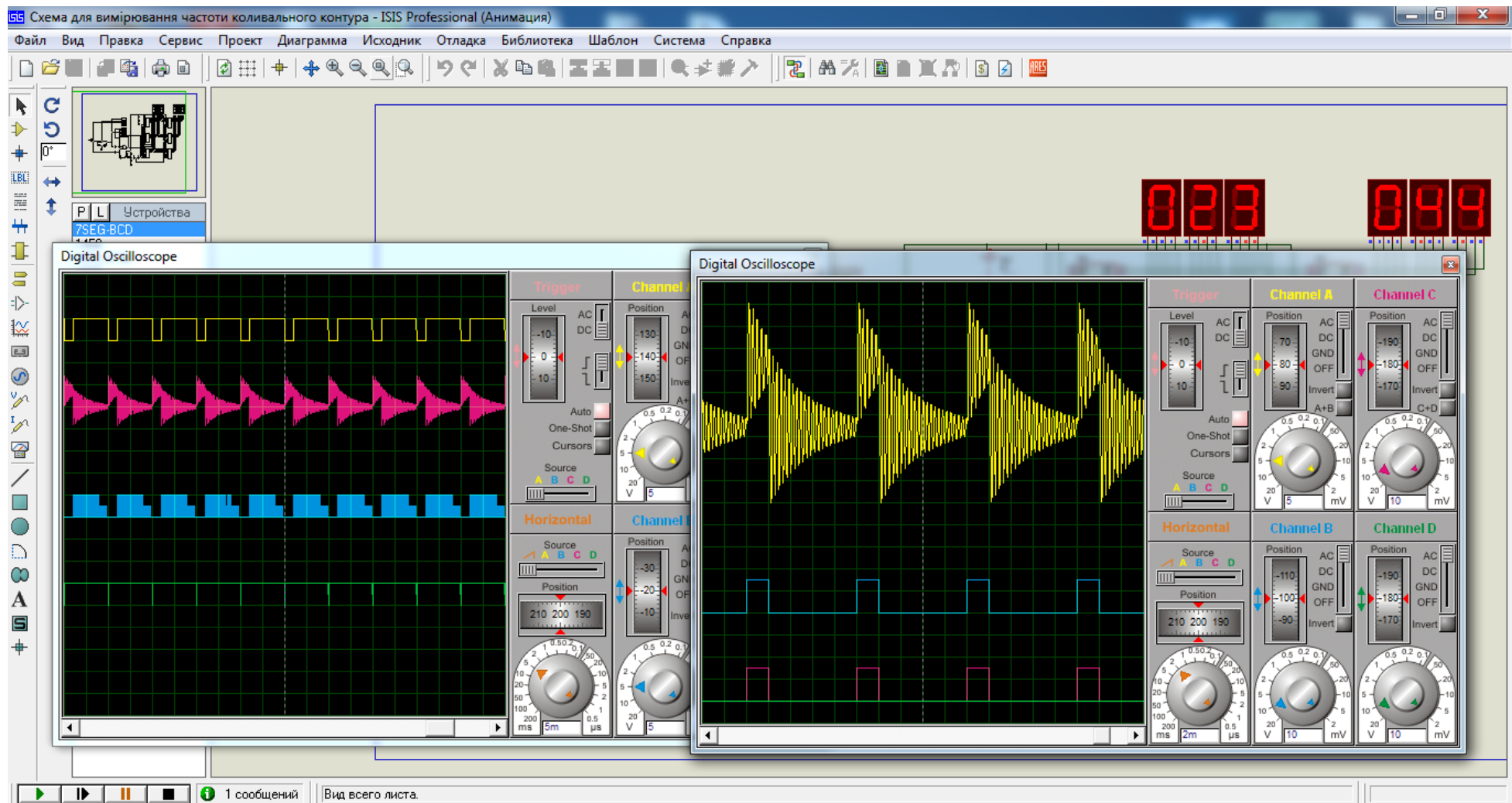


Рисунок 3.9 – Діаграми напруг схеми, що пояснюють принцип роботи ВК приладу для отримання інформації про вологість повітря у виробничих приміщеннях при частоті 2777 Гц, що задавалася при ємності 30 пФ КВК

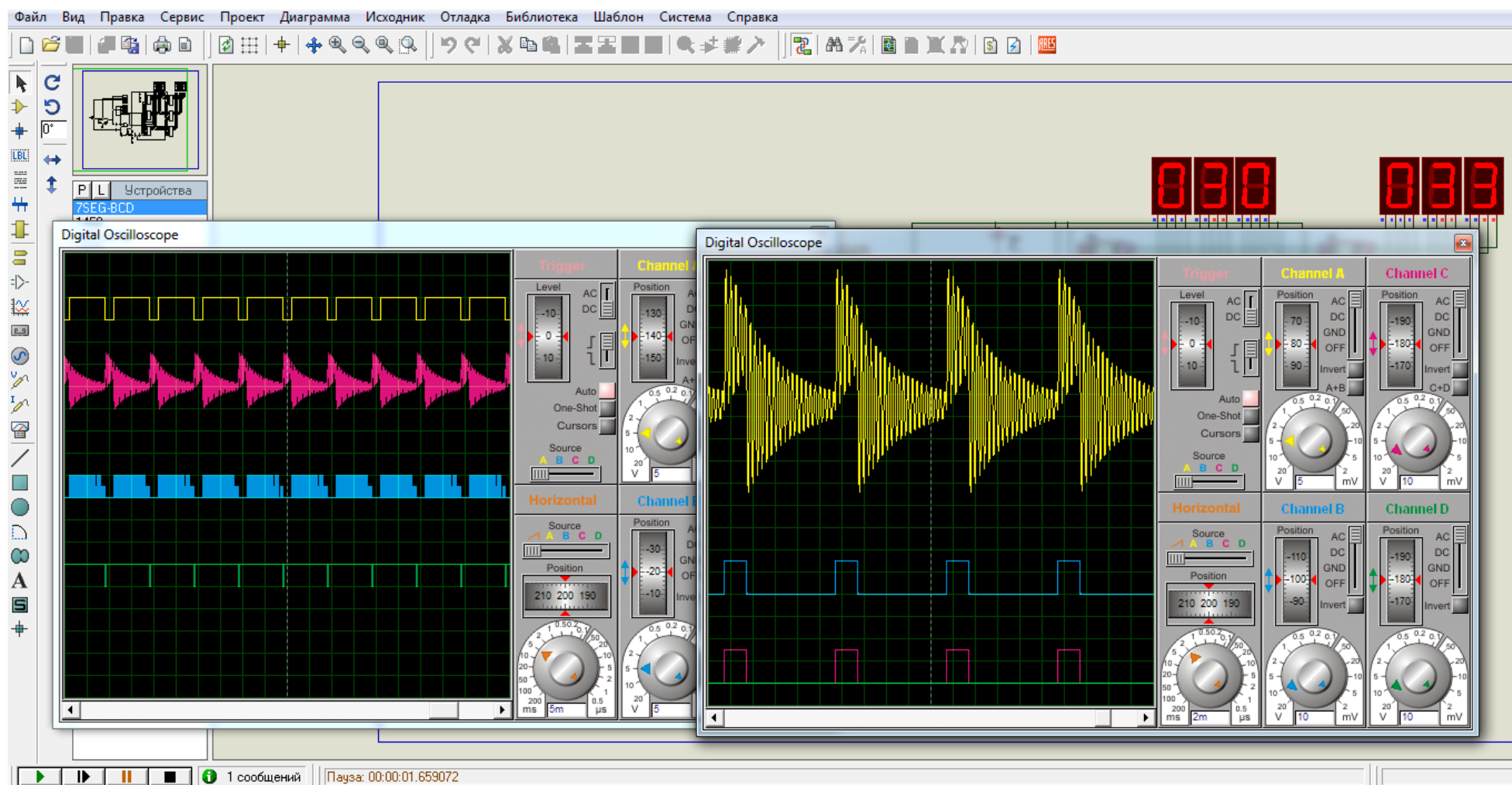


Рисунок 3.10 – Диаграми напруг схеми, що пояснюють принцип роботи ВК приладу для отримання інформації про вологість повітря у виробничих приміщеннях при частоті 2500 Гц, що задавалася при ємності 40 пФ КВК

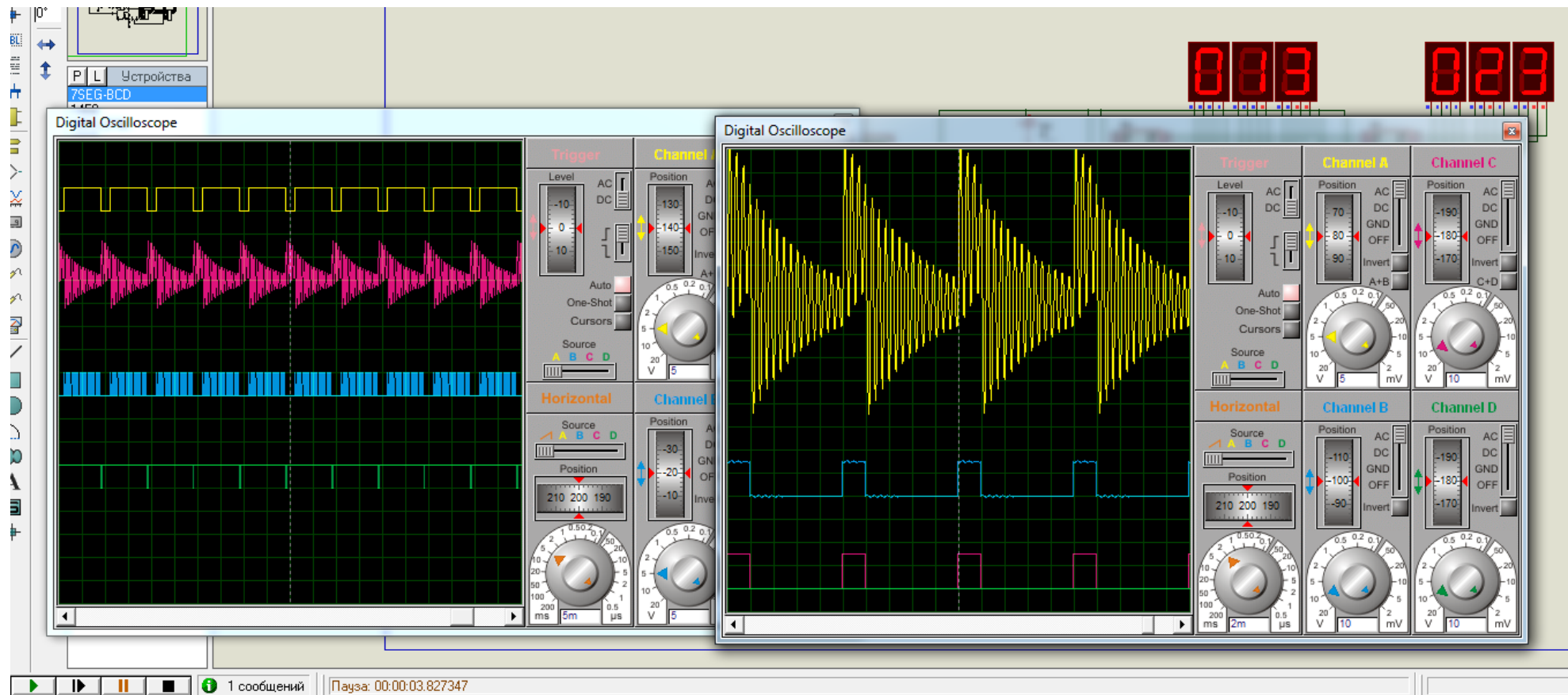


Рисунок 3.11 – Діаграми напруг схеми, що пояснюють принцип роботи ВК приладу для отримання інформації про вологість повітря у виробничих приміщеннях при частоті 1667 Гц, що задавалася при ємності 80 пФ КВК

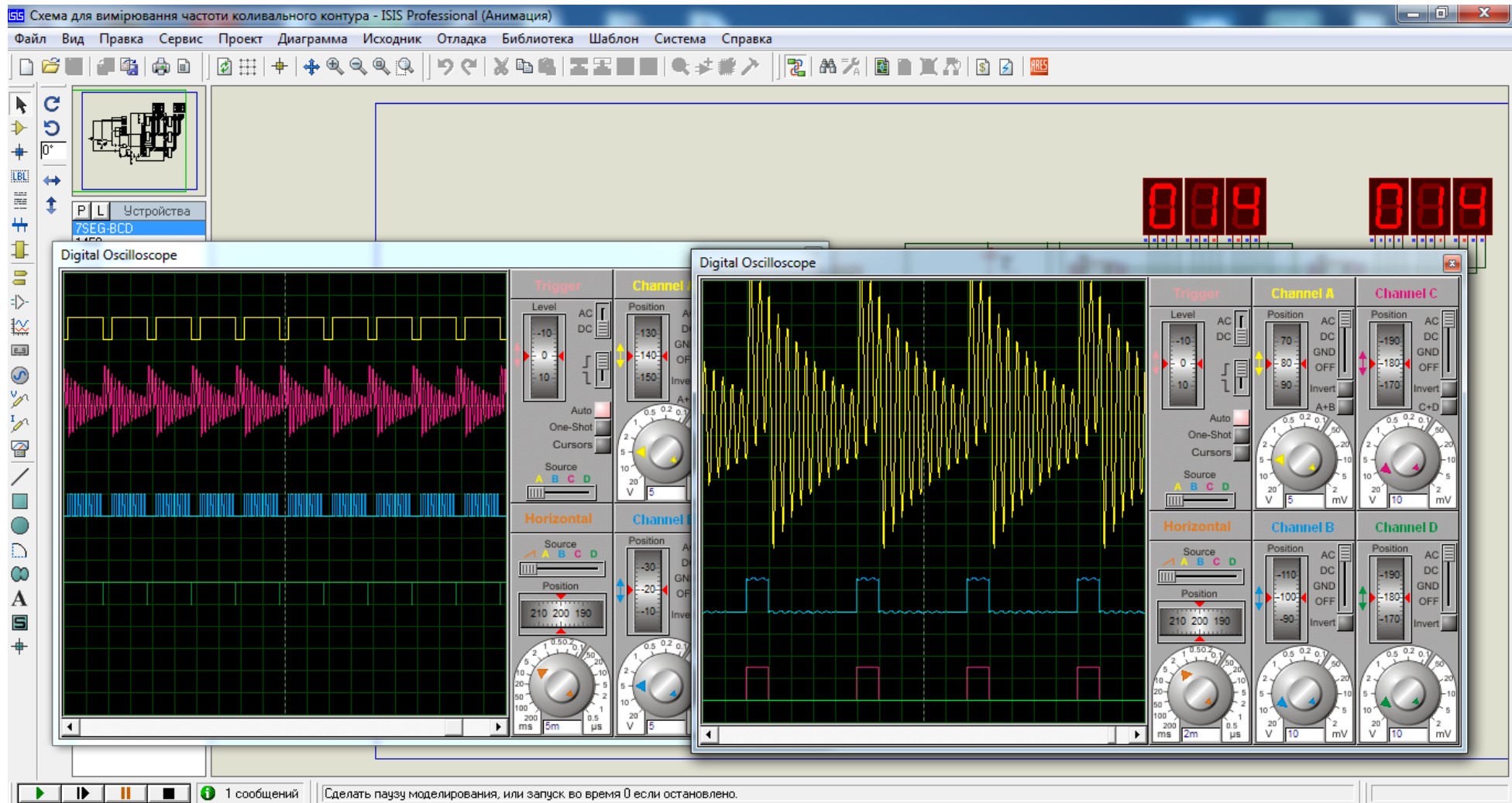


Рисунок 3.12 – Діаграми напруг схеми, що пояснюють принцип роботи ВК приладу для отримання інформації про вологість повітря у виробничих приміщеннях при частоті 1191 Гц, що задавалася при ємності 160 пФ КВК

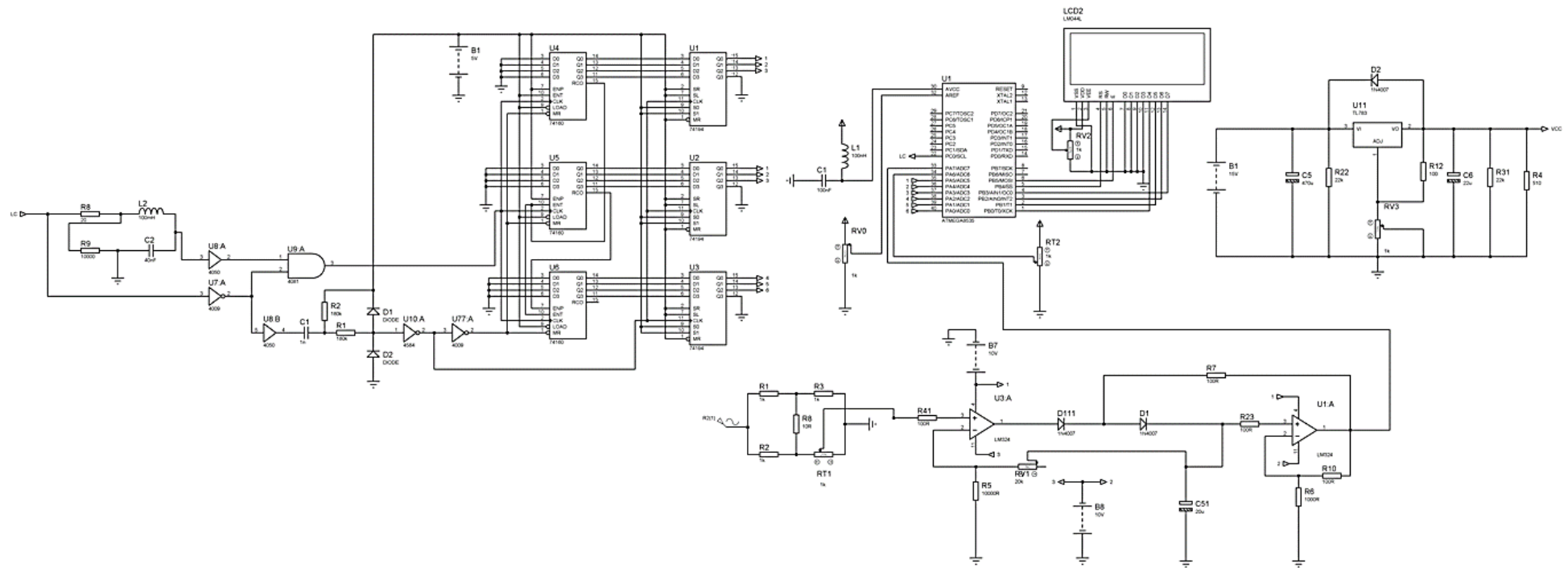


Рисунок 3.13 – Розроблена загальна електрична схема приладу для симуляції вимірювань температури та вологості повітря у виробничих приміщеннях

Висновки до розділу 3

В даному розділі були показані розроблені структури та електричні схеми двох ВК розробленого приладу, а також описаний принцип їх дії. Наведені основні налаштування приладу та показана симуляція вимірів температури та вологості повітряного середовища у виробничих приміщеннях із тестовою програмою для МК.

Була показана симуляція роботи приладу та перетворення параметрів напруги, яке відбувається через подачу на вимірювальний міст синусоїдального сигналу з генератора змінного струму, унаслідок чого змінюється вимірювана на мості напруга. Напруга випрямляється та підсилюється за необхідності, а вже за її зміною визначається температура повітря.

Також показана симуляція роботи приладу та перетворення параметрів напруг у вимірювальному каналі для отримання інформації про вологість повітряного середовища. В процесі перетворення МК подає на коливальний вимірювальний контур короткочасовий імпульс, який створює у ньому коливання по двом фронтам імпульсу. По задньому фронту імпульсу коливання, що створюються коливальним вимірювальним контуром, далі проходять і перетворюються у код. Цей параметр зчитує МК та обраховує його в частоту при виміряній температурі повітряного середовища. Після чого вже із цим врахуванням МК виконує перетворення значення частоти контуру перетворювача в значення відносної вологості повітря у виробничому приміщенні.

Розділ 4. РОЗРОБКА ПРОЄКТУ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Огляд етапів створення проєкту друкованої плати у програмному середовищі Proteus 7.7

Приклад створеної електричної принципової схеми у програмі Proteus 7.7. (модуль ISIS), за яким буде створюватися проєкт друкованої плати, показаний на рис.4.1. Опишемо основні принципи роботи із створенням електричних схем і плат до них в програмі Proteus 7.7.

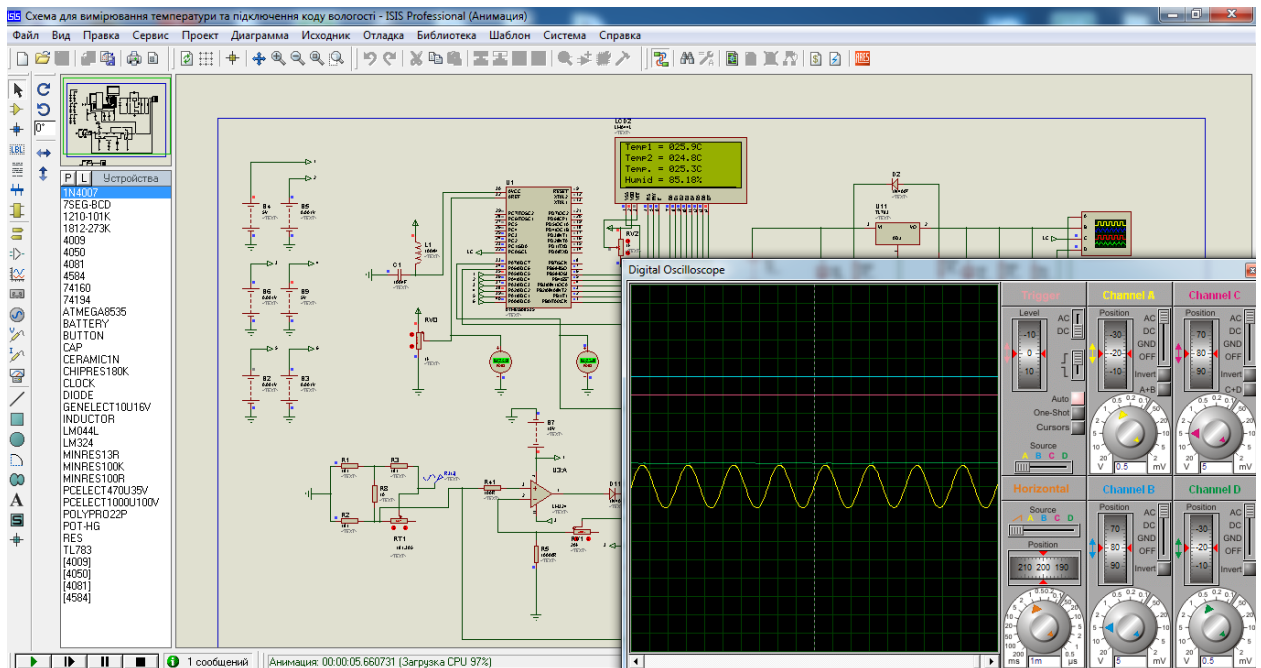


Рисунок 4.1 – Друкована плата в Proteus

Після того як в модулі ISIS програми Proteus 7.7. створюється електрична принципова схема та відлагоджується її робота, цей проєкт зберігається та відкривається в модулі ARES. Кожному елементу схеми повинен відповідати якийсь корпус. Це параметр - PCB Package. Вікно, яке відображає можливість зміни корпусу компонента зображено на рис.4.2.

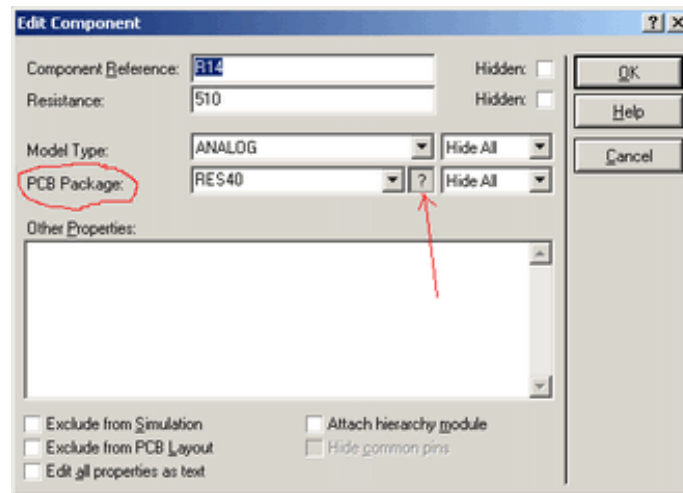


Рисунок 4.2 – Вікно для зміни корпусу

Тип корпусу можна змінити, натиснувши на кнопку «?». Для резисторів і керамічних конденсаторів тип корпусу, найчастіше, RES40 або C20, де число - це відстань між выводами, а системні одиниці в 10th = 2,5 мм (тоді RES40 => 10мм між выводами елементу).

Деяким елементам корпус спочатку не зазначається (наприклад, світлодіоди), тому доводиться вибирати його вручну за необхідністю (рис.4.3.). Корпус повинен відповідати елементам, що відображається на електричній схемі, яка проектується (для прикладу, для світлодіодів виходи промарковані як анод і катод).

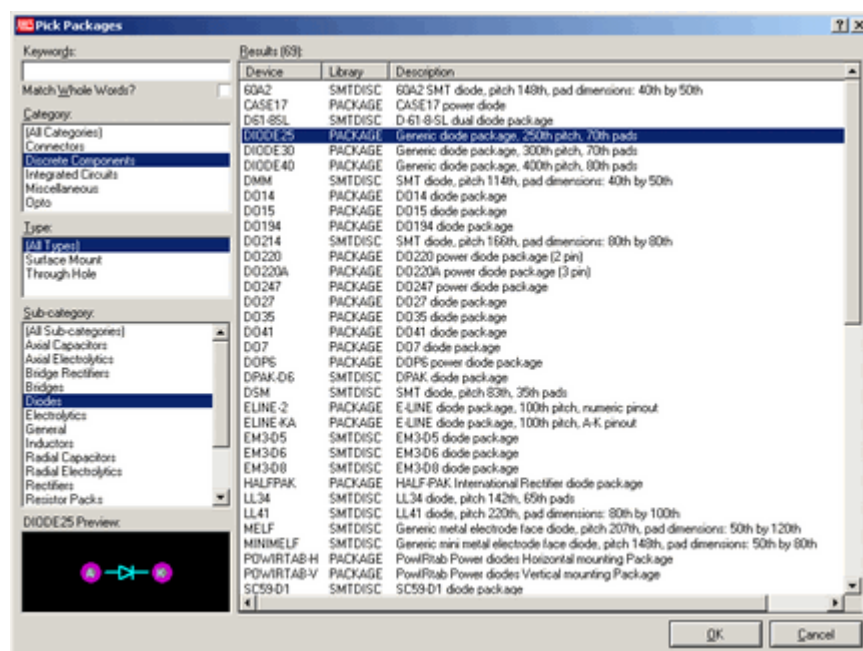


Рисунок 4.3 – Ручний вибір елементів корпусу

Деяким елементам неможливо вибрати корпус, це, наприклад світлодіодні індикатори, котушки індуктивності, кнопки. У них навіть немає такого параметра як PCB Package (рис.4.4). У такому випадку в проєкті ставиться просто роз'єм під такий елемент.

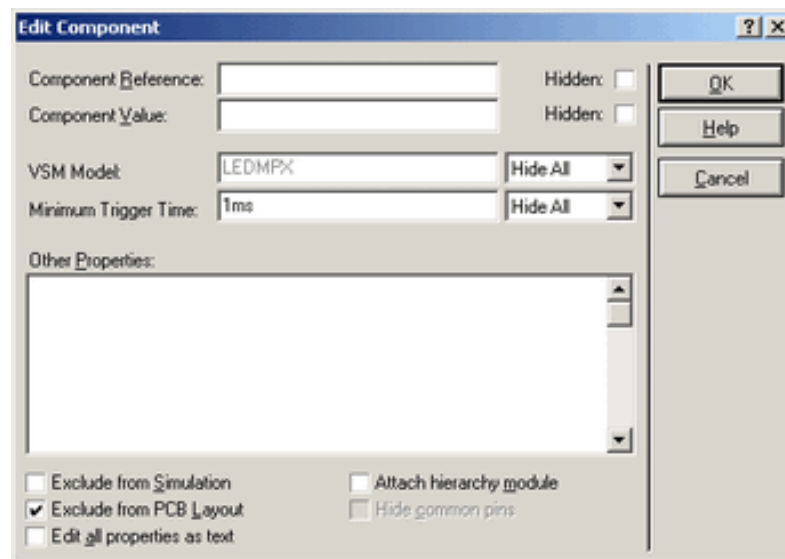


Рисунок 4.4 – Вікно для корпусу в Proteus

Якщо корпус є в стандартній бібліотеці, то його можна вибрати з використанням експортування в модуль ARES (цей спосіб підходить, наприклад, для вибору корпусу потенціометра).

Якщо ж в стандартних бібліотеках немає відповідного корпусу, то є два варіанти вирішення поставленої задачі:

- 1) взяти потрібні корпуси з нестандартних бібліотек в інтернеті;
- 2) 2-й спосіб полягає в тому (як зазначалося вище у розділі 4), що необхідно додати в схему додаткові роз'єми і з'єднати з виходами цих елементів, а потім в модулі ARES та розставляти не самі елементи, а ці роз'єми, відповідно виходам.

Загальна схема може ускладнитися, у зв'язку з появою додаткових вузлів, вхідних і вихідних та додаткових роз'ємів під індикатор, кнопки, котушки, тощо.

Наступний крок створення друкованої плати - це натиснення кнопки «ARES» (зверху справа на панелі керування) для перенесення елементів схеми в другий модуль програми Proteus 7.7. Якщо проект був не збережений, то модуль ISIS запропонує його зберегти.

Коли відкривається модуль ARES, якщо якомусь елементу не відповідає жодний корпус з бібліотеки програми, то з'являється вікно з пропозицією вибрати певний корпус із списку для цього елемента (рис.4.5).

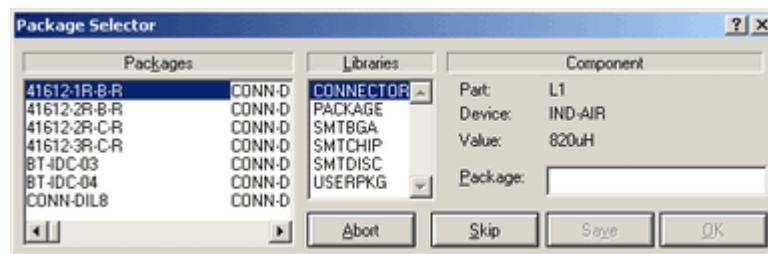


Рисунок 4.5 – Вікно ARES

Наступний етап – це обмеження розмірів друкованої плати. Це робиться на закладці шару Board Edge (рис.4.6) за допомогою інструментів 2d-графіки (найбільш зручний прямокутник).

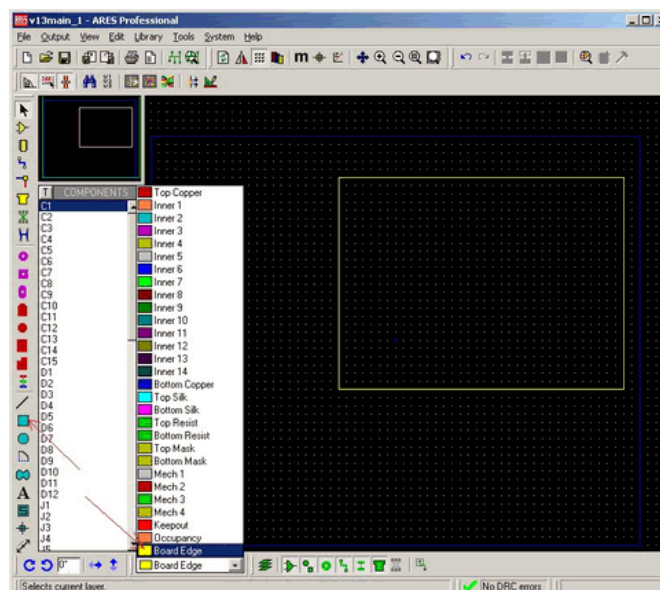


Рисунок 4.6 – Обмеження розміру плати

4.2 Розробка проєкту друкованої плати вимірювального приладу вологості та температури

Після створення меж плати, елементи на платі можна розставляти як вручну, так і автоматично.

Краще проводити розміщення елементів вручну. Якщо деякі елементи розставити заздалегідь, вони будуть нерухомі один відносно одного. Це робиться для того, щоб, наприклад, конденсатор і котушка контуру не виявилися в різних кутах плати, якщо вони поєднані між собою.

Для автоматичного розташування елементів необхідно натиснути кнопку авторозстановки «auto-placer» (рис.4.7).

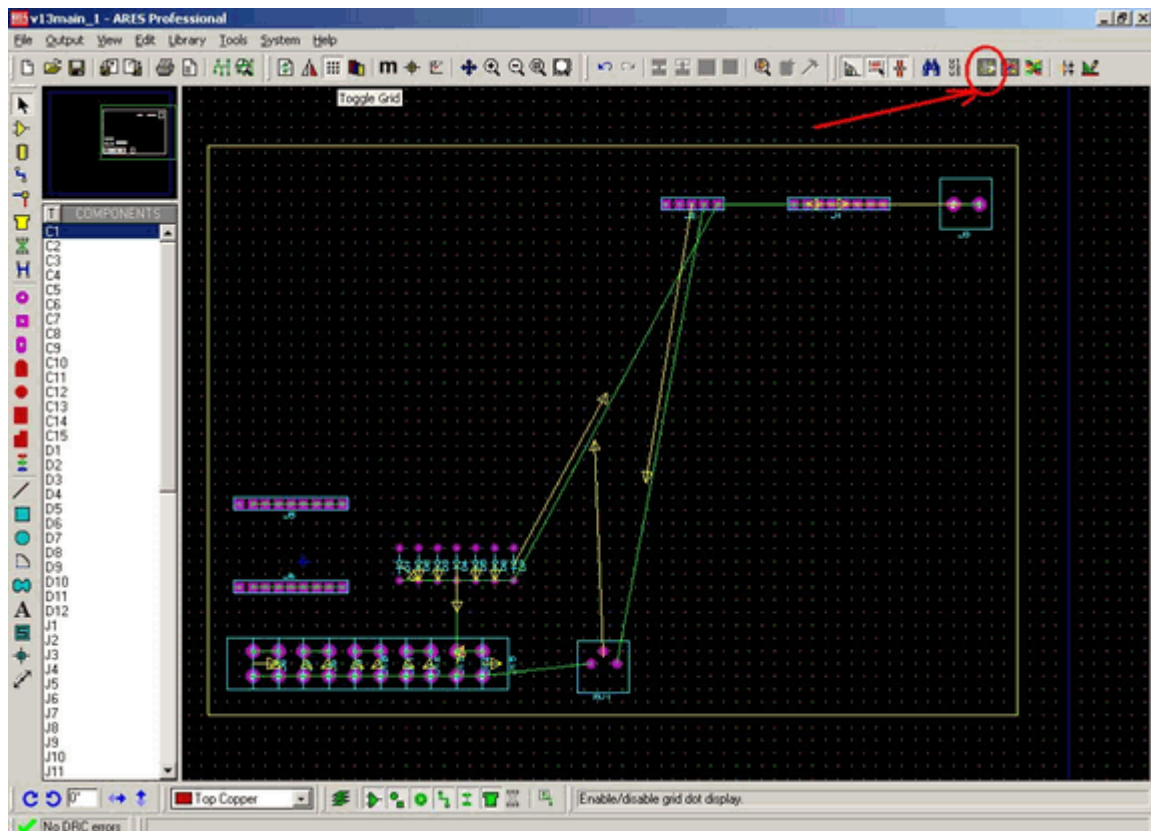


Рисунок 4.7 – Автоматична розстановка елементів

Далі, з'являється вікно, яке показано на рис.4.8:

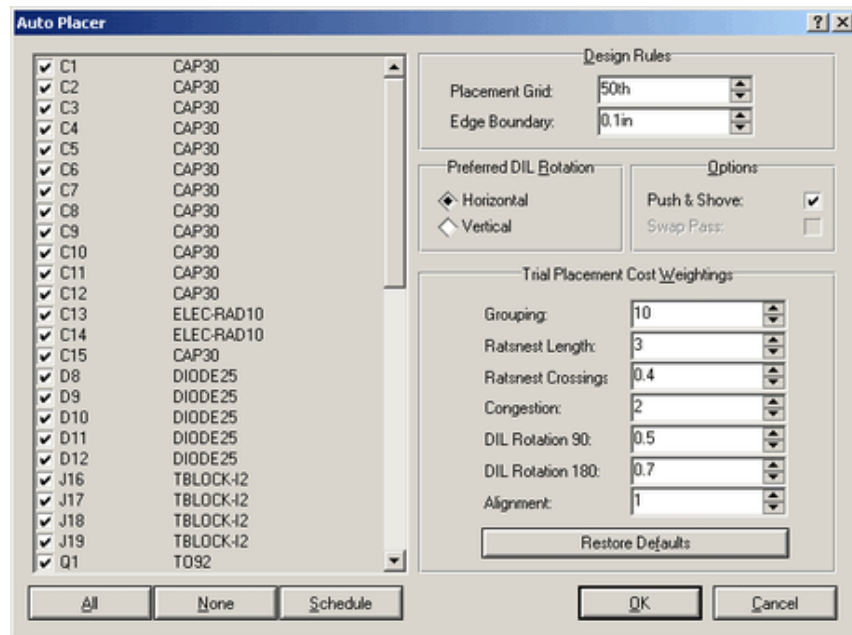


Рисунок 4.8 – Вікно для вибору елементів, які потрібно розставити

У цьому вікні вибираються елементи, які потрібно розставити, крок сітки, переважне розташування елементів, ступінь групування.

Наступним кроком для створення друкованої плати є трасування ліній зв'язку між елементами. Спершу необхідно налаштувати стратегію трасування. Для цього необхідно відкрити меню «system» > «set strategies» (рис.4.9) [17].

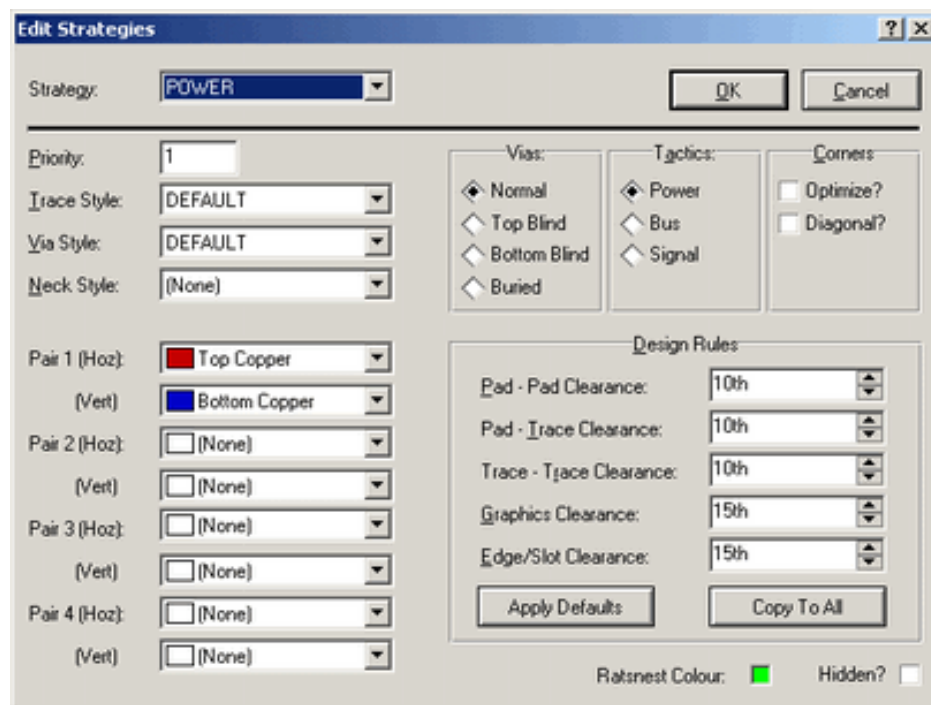


Рисунок 4.9 – Налаштування трасування плати

У верхній частині вікна можна вибрати, для яких ланцюгів буде редагуватися стратегія: сигнальних (signal) або живлення (power). В стовпчику "Pair1- Pair4" вибирається напрямок доріжок на платі (зліва направо або зверху вниз) та їх орієнтація (вертикальна або горизонтальна) на стороні "Top Copper" (стороні елементів) або "Bottom Copper" (задній стороні). Якщо одну зі сторін вимкнути (None), плата буде односторонньою для цих ланцюгів. В групі "Vias" можна вибрати, по якій стороні прокладати перемички (зверху, знизу або з обох сторін), або ж доріжки можуть проходити лише по одній стороні без перемичок. Варіанти "Tactics" визначають, як розташовувати доріжки, що живлять - як шину або як сигнал. "Corners optimize?" вказує на необхідність оптимізації кутів: якщо вимкнено, всі кути будуть по 90°; "Diagonal?" визначає можливість діагонального розташування. У розділі "Design rules" можна встановити мінімально допустимі відстані між полігонами та доріжками. Для включення трасування потрібно натиснути кнопку «Autorouter» (знаходиться праворуч від «auto-placer»). З'являється вікно, у якому необхідно змінити тільки крок сітки, ставиться зазвичай 20 або 25 (рис.4.10) [17].

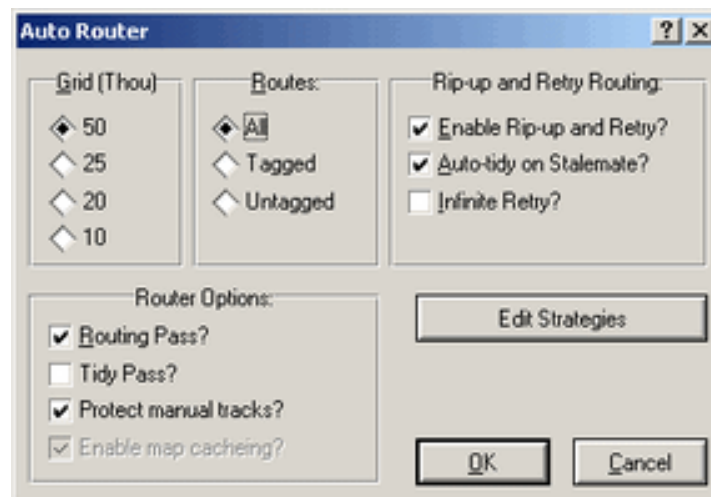


Рисунок 4.10 – Зміна кроку сітки

В результаті отримаємо проект друкованої плати як показано на рис.4.11. та на рис.4.12. Загальні структурна та електрична схеми вимірювального приладу та алгоритм процесу вимірювань наведено в додатках.

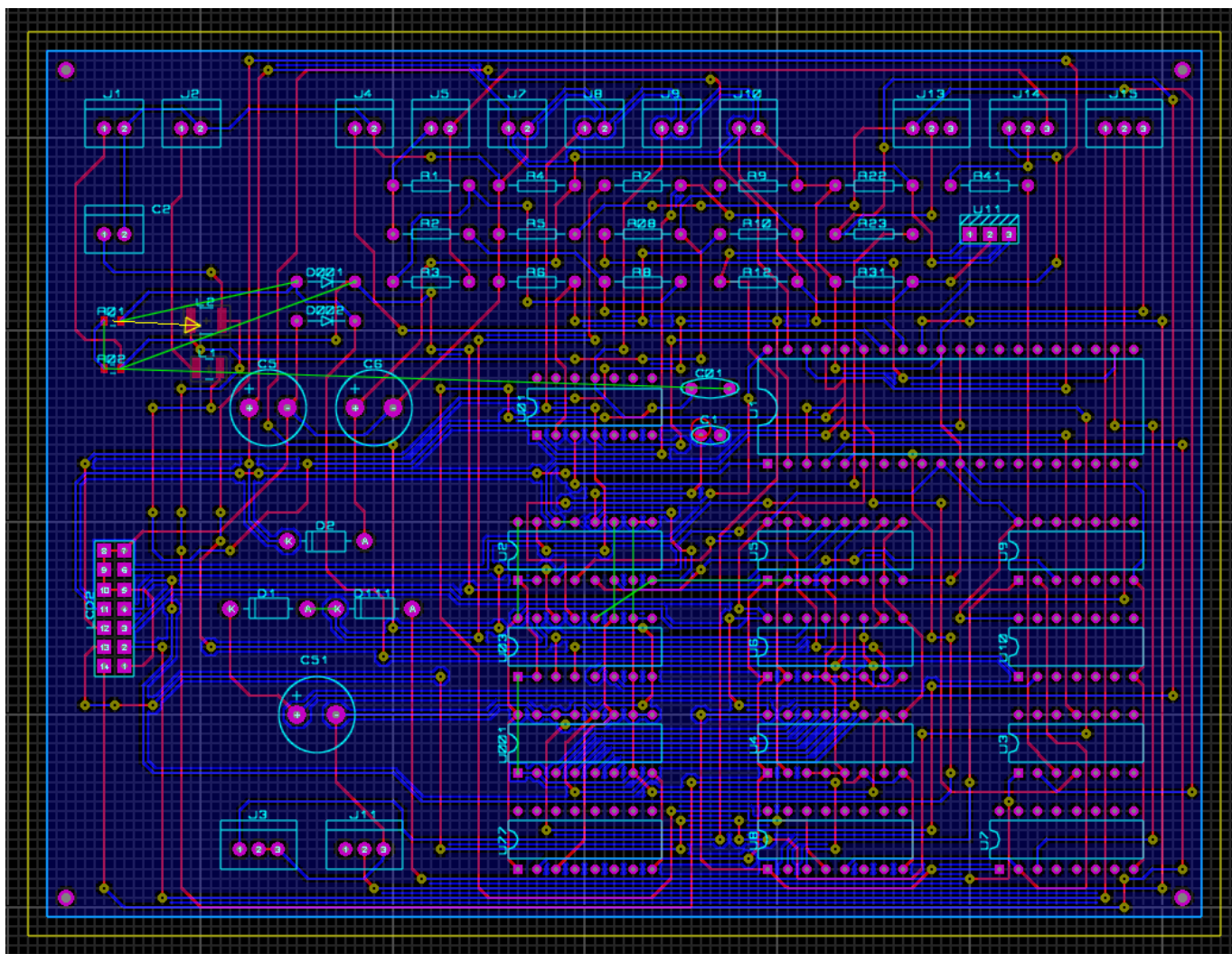


Рисунок 4.11 – Результат створення друкованої плати електронного блоку вимірювального приладу в програмі Proteus 7.7 (модуль ARES)

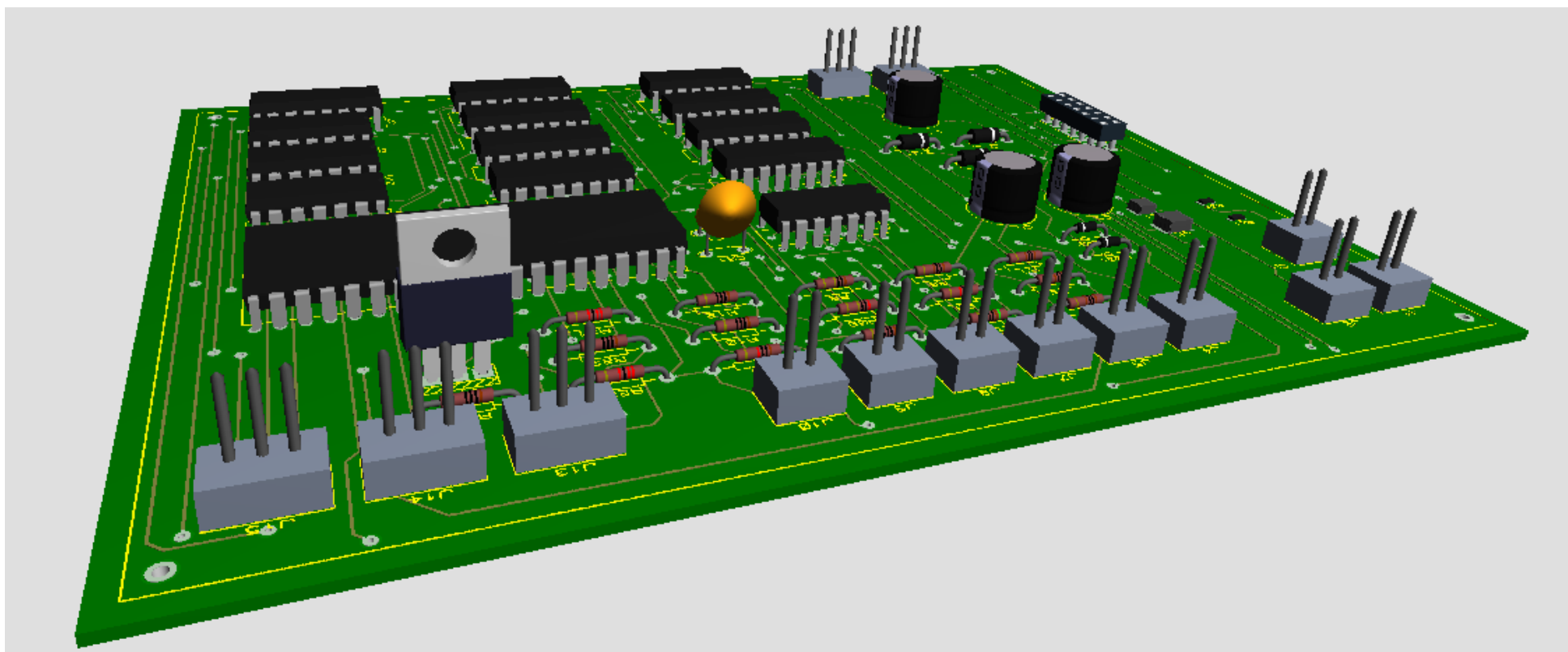


Рисунок 4.12 – Загальний 3D вид друкованої плати електронного блоку вимірювального приладу вологості та температури повітряного середовища у виробничих приміщеннях

У випадку, якщо модуль ARES не може автоматично розвести доріжки, потрібно зробити повторну розстановку елементів.

Якщо модуль ARES розвів плату, але видає попередження про помилки, це означає, що відстань між полігонами та доріжками менша, ніж допустимо. Треба перевірити місце та визначити, наскільки критично зменшення відстані. Якщо це не критично, можна залишити варіант плати, в іншому випадку потрібно переробити проект. Для роздрукування малюнка на заготовку треба вибрати відповідну площу в Output, а потім виконати друк у відповідному режимі [17].

Для того, щоб роздрукувати малюнок на заготовку для подальшого створення g-code у відповідних програмах треба відкрити меню Output > Set Output Area та виділити площу, яку треба роздрукувати. Далі в меню Output > Print, обирається сторона плати, яку необхідно надрукувати, дзеркально чи ні.

Етапи розведення плати включають наступні кроки:

- задавання розміру плати (board edge);
- розстановка елементів вузлів схеми, наприклад генератора;
- запуск автотрасувальника;
- оцінка розташування доріжок та елементів;
- якщо виявлено недоліки, елементи переставляються; інакше сусідній вузол;
- повторний запуск трасування;
- процес повторюється до тих пір, поки не буде розведено всю схему.

Це необхідно, оскільки автотрасувальнику не завжди вдається відразу розвести всю плату, а сам модуль ARES не завжди правильно розставляє елементи.

Висновки до розділу 4

В даному розділі була показана розробка проекту друкованої плати електронного блоку вимірювального приладу вологості та температури повітряного середовища у виробничих приміщеннях, а також наведено основні етапи створення проекту.

Загальні висновки

Провівши аналіз у першому розділі методів вимірювання температури і вологості, а саме: оптичних НВЧ-методів засновані на дослідженні характеристик електромагнітної хвилі; хвилеводних методів вимірювання вологості заснованих на визначенні безконтактно діелектричної проникності й питомої електропровідності різних середовищ; зондових методів заснованих на вимірюванні вологості локальних ділянок діелектричних середовищ та багатьох інших, можна виділити термоелектричний та ємнісний методи.

Розроблено в процесі виконання роботи вимірювальний канал приладу для отримання інформації про температуру повітряного середовища.

Було проаналізовано роботу коливального вимірювального контуру вологості (ланки вимірювального каналу) та отримано залежності зміни його частоти $f_{\text{лан}}$, Гц від ємності первинного перетворювача C , Φ .

Наведено залежність ємності первинного перетворювача C , Φ від вологості повітря W , % при температурі $T = 25^\circ\text{C}$.

Також було проаналізовано залежність частоти коливального контуру $f_{\text{лан}}$, Гц від вологості повітря W , % при температурі $T = 25^\circ\text{C}$ для подальшої розробки оптимальної структури вимірювального каналу приладу.

Показано розроблені структурні та електричні схеми двох вимірювальних каналів приладу, а також описаний принцип їх дії. Наведені основні налаштування приладу та показана симуляція вимірів температури та вологості повітряного середовища у виробничих приміщеннях із тестовою програмою для МК.

На завершальному етапі роботи був розроблений проєкт друкованої плати електронного блоку вимірювального приладу вологості та температури повітряного середовища у виробничих приміщеннях.

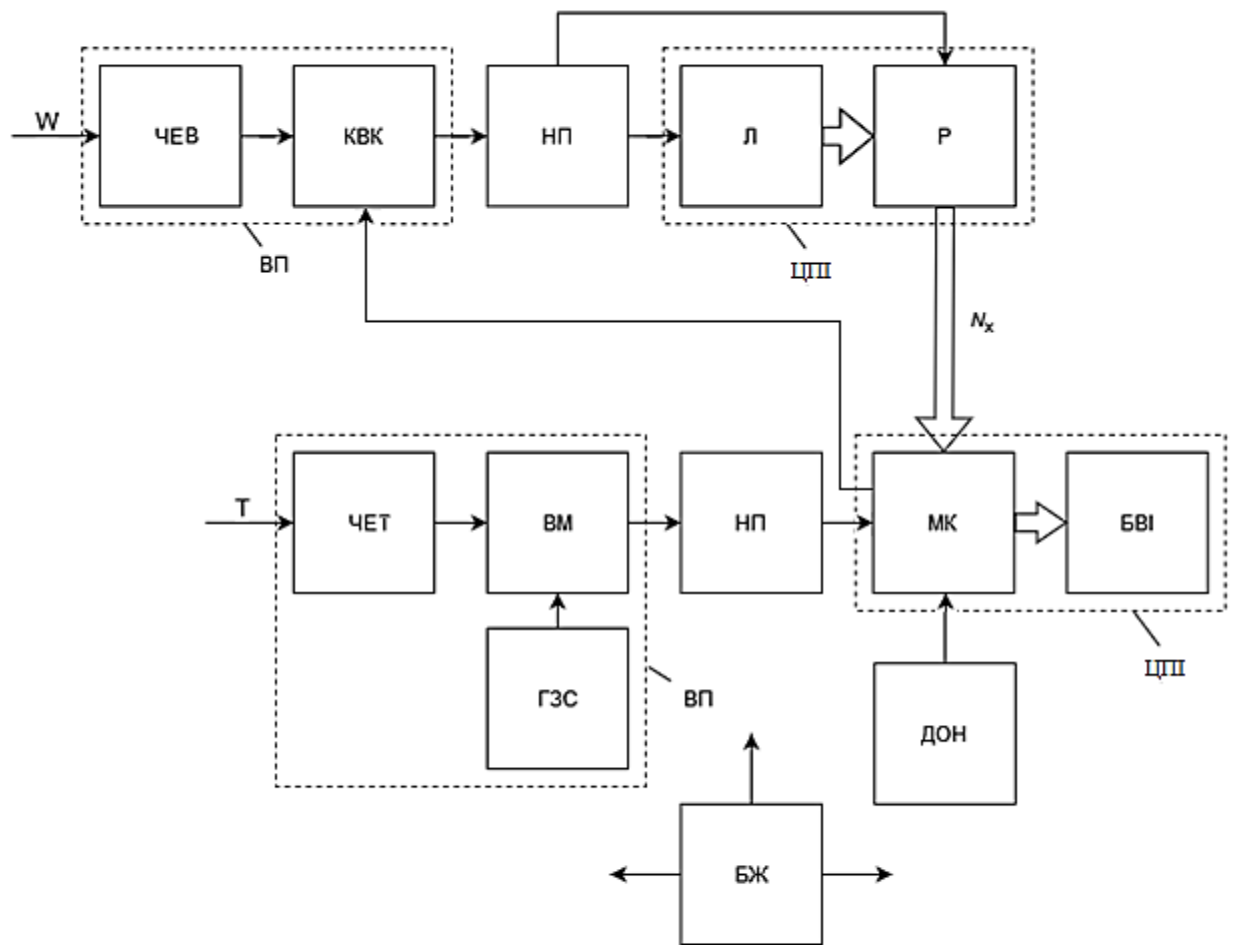
Список використаних джерел

1. Основи метрології та вимірювальної техніки: конспект лекцій «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / уклад. В.В. Пташенчук. – Луцьк : ЛНТУ, 2023. – 52 с.
2. Метрологія [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Н.М. Защепкіна. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 397 с.
3. Рішан О.Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 “Автоматизоване управління технологічними процесами” та 7.092502 “Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва” ден. та заочн. форм. навчан. – К.: НУХТ, 2007. –162 с.
4. Копелець, К. Р. Система автоматичного контролю клімату в нежитлових приміщеннях : магістерська дис.: 126 Інформаційні системи та технології / Копелець Костянтин Романович. – Київ, 2021. – 119 с.
5. Новицька, К. В. Вдосконалення методики повірки термоелектричних перетворювачів: 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Новицька Катерина Вікторівна. – Харків, 2020. – 64 с.
6. Болдирєв, А. М. Система контролю якості повітря і вологості: дипломний проєкт бакалавра: 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Болдирєв Андрій Миколайович. – Київ, 2020. – 57 с.
7. Resistive humidity sensor | How it works, Application & Advantages. Electricity - Magnetism. URL: <https://www.electricity-magnetism.org/resistive-humidity-sensor/> (дата звернення: 10.05.2024).
8. The Capacitive Humidity Sensor. Feuchtemessung, Temperaturmessung, CO2- und Differenzdruck-Messung. URL: https://www.rotronic.com/en-us/humidity_measurement-feuchtemessung-mesure_de_l_humidite/capacitive-sensors-technical-notes-mr (дата звернення: 10.05.2024).

9. Надвисокочастотний метод і засіб вимірювання вологості природного газу: монографія / Й. Й. Білінський, Д. В. Новицький, Б. П. Книш. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 109 с.
10. M. Kimura, “A new method to measure the absolute – humidity independently of the ambient temperature,” *Sens. Actuators B*, vol. 33, pp. 156-160. 1996.
11. B. Sorli, F. Pascal-Delannoy, A. Giani, A. Foucaran, and A. Boyer, “Fast humidity sensor for high range 80–95% RH,” *Sens. Actuators A: Physical*, vol. 100, pp. 24-31. 2002.
12. Y. Y. Bilynsky, “The control of natural gas dew point temperatures by water and hydrocarbons: Modern scientific research and their practical application,” *SWorld*, November, Issue №5, pp. 199-203. 2013 [Online]. Available: <http://www.sworld.com.ua/index.php/en/e-journal/the-content-of-journal/j213/20948-j21310>.
13. Г. М. Йордан, Методи та обладнання для визначення вологості, що використовуються в засобах автоматизації процесів висушування, «Квалілогія книги» Збірник наукових праць, №2 (18), с. 67-77, 2010.
14. Сатюков, А. І., Приступа, А. Л., Журко, В. П., & Бивалькевич, М. О. (2018). Результати експериментальних досліджень впливу вологості стінових будівельних матеріалів на проходження радіохвиль нвч діапазону. *Технічні науки та технології*, (1(11), 252–263. вилучено із <http://tst.stu.cn.ua/article/view/134782>
15. Єременко В.С. Аналогові та цифрові вимірювальні прилади: навч. посібник / В. С. Єременко, О. В. Монченко. К. : НАУ, 2018. – 152 с.
16. Методи та обладнання для визначення вологості, що використовуються в засобах автоматизації процесів висушування / Г. М. Йордан // Квалілогія книги. - 2010. - № 2. - С. 67-76. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kk_2010_2_14

17. Курс лекцій САПР 2020 / Житомирська політехніка. URL: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/321027/mod_resource/content/1/САПР%202020%20-2_3.pdf (дата звернення: 18.05.2024).

ДОДАТКИ



ЧЕТ – чутливий елемент температури

ВМ – вимірний міст

ГЗС – генератор змінного струму

ВП – вимірний перетворювач

НП – нормуючий перетворювач

ДОН – джерело опорної напруги

ЦПІ – цифровий перетворювач інформації

ЧЕВ – чутливий елемент вологості (ємнісний перетворювач)

КВК – колибальний вимірний контур

НП – нормуючий перетворювач

Л – лічильники імпульсів

Р – регістри

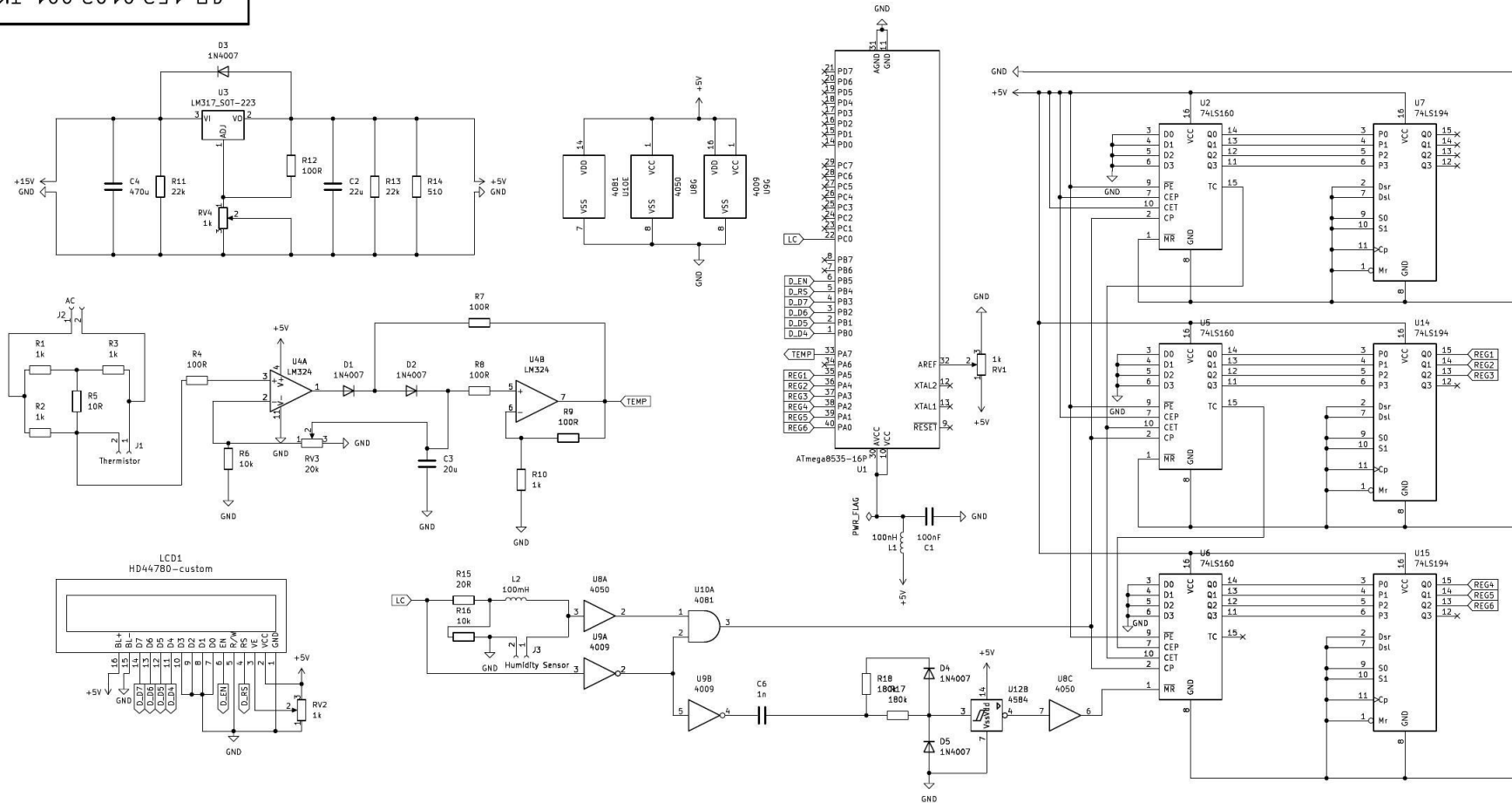
МК – мікроконтролер

БВІ – блок відображення інформації

БЖ – блок живлення

					ДП 152.0102.001 ТК1			
					Вимірник температури та вологості, схема структурна			
Зм	Л	№ доцм	Підп	Дата				
Розроб		Герасимчук А.						
Перевір		Барилко С.						
Т.контр								
Н.контр					ПБФ			
Затв.								

ДП 152.0102.001 ТК2



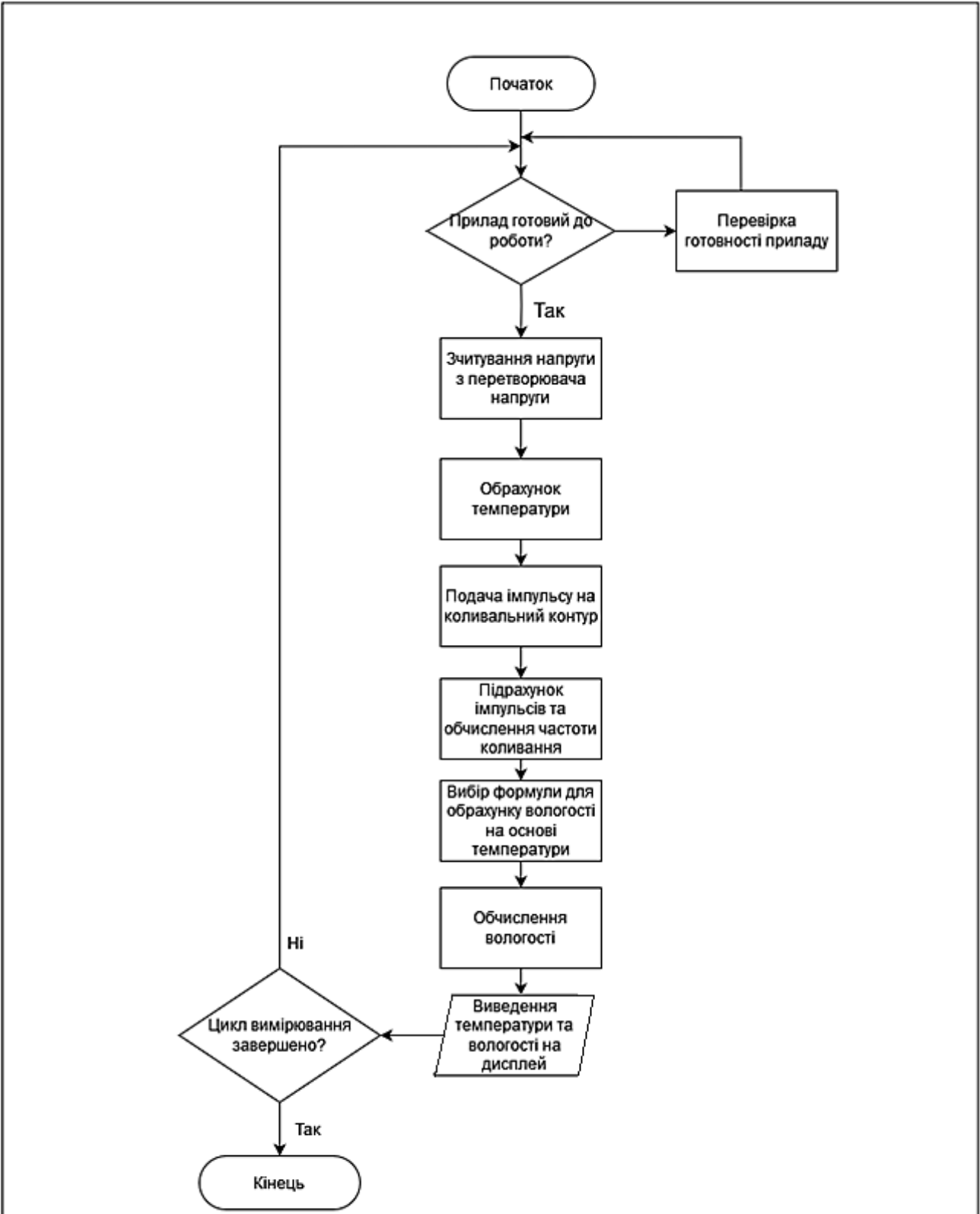
ДП 152.0102.001 ТК2

Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вимірювач температури та вологості, схема принципова	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Герасимчук						1:1
Перевір.	Барилко				Аркуш 1	Аркушів 1	
Т.контр.					ПБФ		
Н.контр.							
Затв.							

Копіював

Формат А3

Інв.№об.	Підпис і дата	Зам.інв.№	Інв.№вубл.	Підп. і дата



					ДП 152.0102.001 ТКЗ						
					Алгоритм процесу вимірювання температури та вологості	Літ.		Маса		Масштаб	
Зм	Арк	№ док.м.	Підп	Дата							
Розроб.		Герасимчук А.									
Перевір.		Барилко С.									
Т.контр.											
						Аркш 1		Аркшів 1			
Н.контр.						ПБФ					
Затв.											

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Документація		
A4			ДП 152.0102.001 ТК1	Вимірювач температури та вологості, схема структурна		
A3			ДП 152.0102.001 ТК2	Вимірювач температури та вологості, схема принципова		
A4			ДП 152.0102.001 ТК3	Алгоритм процесу вимірювання температури та вологості		
				Стандартні вироби		
				Конденсатори:		
		1		1 нФ 5В ±2%	1	C6
		2		100 нФ 50В ±5%	1	C1
		3		20 мкФ 10В ±10%	1	C3
		4		22 мкФ 10В ±10%	1	C2
		5		470 мкФ 16В ±20%	1	C4
				Діоди:		
ДП 152.0102.001 ТК СП						
Змн. Арк. № докум. Підп. Дата						
Розроб. Герасимчук						
Перев. Барилко						
Н. контр.						
Замб.						
Специфікація						
Лім. Арк. Аркцшіб						
1 3						

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		6		1N4007	5	D1-D5
				Конектори:		
		7		KF350-3.5-2P	3	J1-J3
		8				
		9		Дроселі:		
		10		100 нГн 0,5А 5%	1	L1
		11		100 мГн 3А 10%	1	L2
				Резистори:		
		12		510 Ом 0,5Вт ±10%	1	R14
		13		1 кОм 0,5Вт ±10%	4	R1-R3, R10
		14		10 кОм 0,5Вт ±10%	2	R6, R16
		15		22 кОм 0,5Вт ±10%	2	R11, R13
		16		180 кОм 0,5Вт ±10%	2	R17, R18
		17		100 Ом 0,5Вт ±10%	5	R4, R7-R9,
						R12
		18		10 Ом 0,5Вт ±10%	1	R5
		19		20 Ом 0,5Вт ±10%	1	R15
				Потенціометри:		
		20		1 кОм 0,5Вт ±10%	3	RV1, RV2,
						RV4
		21		20 кОм 0,5Вт ±10%	1	RV3
				Мікросхеми:		
		22		CD4009	1	U9

Інв. № ориг.						Арк. 2
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підп.	Дата	ДП 152.0102.001 ТК СП	

[illegible]