

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Розробка системи термічної обробки нанорозмірних плівкових зразків»

Виконала: студентка 2 курсу, групи НФ-63

Мальцева М. В.

спеціальність:

105 – «Прикладна фізика та наноматеріали»

освітня програма:

Прикладна фізика енергетичних систем

Керівник: доц. Сухов Р. В.

Рецензент:

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти(освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність: 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма: Прикладна фізика енергетичних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
підпис

« _____ » _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра студентів

Мальцевої Марії Вікторівни

1. Тема роботи «Розробка системи термічної обробки нанорозмірних плівкових зразків»,
керівник роботи доцент Сухов Руслан Володимирович,
затверджені наказом по університету від 27 вересня 2024 № 4201-5/3081.
2. Строк подання студентом роботи 29 листопада 2024 року
3. Перелік питань, які потрібно розглянути:
 - 1) проаналізувати характеристики наявних на ринку комерційних систем такого роду та їхню доступність для вітчизняних дослідників;
 - 2) спроектувати власну систему;

- 3) спроектувати апаратну частину власного комплексу та підібрати сучасну елементну базу;
- 4) створити апаратну частину комплексу;
- 5) написати програму мікроконтролера та програмне забезпечення оператора;
- 6) створити прототип системи;
- 7) протестувати створений програмно-апаратний комплекс в ході фізичного експерименту.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи(висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання «10» жовтня 2024 р.

Студент

_____ Марія МАЛЬЦЕВА
підпис

Керівник роботи

_____ Руслан СУХОВ
підпис

РЕФЕРАТ

Мальцева Марія Вікторівна «Розробка системи термічної обробки нанорозмірних плівкових зразків».

Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. - Х.: Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна, 2024. - с.

Основною ціллю роботи є розробка системи для термічної обробки тонких плівок у середині колони просвітлювального електронного мікроскопа. Розроблений пристрій пройшов успішну апробацію та продемонстрував ефективність використання інформаційних технологій для автоматизованого керування перебігом фізичного експерименту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАНОФІЗИКА, ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС.

ABSTRACT

Maltseva Mariia "Development of a system for thermal treatment of nano-sized film samples".

Master's degree thesis in applied physics. - Kh.: V.N. Karazin Kharkiv National University, 2024. - p.

The main goal of the work is to develop a system for thermal treatment of thin films in the middle of a scanning electron microscope column. The developed device has been successfully tested and demonstrated the effectiveness of using information technologies for automated control of the course of a physical experiment.

**KEYWORDS: NANOPHYSICS, PHASE TRANSITIONS,
MICROCONTROLLER, HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX.**

Зміст

РЕФЕРАТ.....	4
ABSTRACT	5
ВСТУП.....	8
Розділ 1. Мікроскопія	10
1.1 Мікроскопи.....	10
1.2 Як працюють системи нагріву у мікроскопах.....	11
1.3 Типи нагрівальних елементів	12
1.3.1 Резистивні нагрівачі	12
1.3.2 Інфрачервоні нагрівачі	13
1.3.3 Мікрохвильові нагрівачі.....	14
1.4 Трансмісійний електронний мікроскоп.....	15
1.4.1 Принцип роботи трансмісійного електронного мікроскопа	15
1.4.2 Плюси у використанні трансмісійного електронного мікроскопа	16
1.4.3 Мінуси використання трансмісійного електронного мікроскопа	17
Розділ 2. Огляд методів та методик	17
2.1 Методи та методики, які застосовують для розробки програмно-апаратної системи нагріву нанорозмірних плівкових зразків	17
2.1.1 Методика моделювання теплових процесів.....	17
2.1.2 Методи управління та регулювання температурою	18
2.1.3 Методика розробки апаратної частини нагрівальної системи.....	19
2.1.4 Методика калібрування та валідації температури.....	20
2.1.5 Методи збору та аналізу даних.....	20
2.1.6 Симуляційні та експериментальні методи.....	21
2.2 Мікроконтролери	22
2.3 Мова програмування C	24
2.4 Аналого-цифровий перетворювач	28
2.5 Шум в АЦП.....	30
2.6 Цифрова фільтрація	31
3. Система in-situ нагріву тонко плівкових зразків	38
3.1. Основні проектні рішення	38
3.2. Апаратна та програмна частини.....	39
3.3. Апробація розробленої системи	41
Висновки:.....	42
Список літератури:	43

Перелік скорочень та аббревіатур:

АЦП - аналого-цифровий перетворювач;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ТЕМ- трансмісійний електронний мікроскоп;

СЕМ- скануючий електронний мікроскоп;

FEM-метод скінченних елементів;

FDM-метод скінченних різниць;

ПЕМ-просвітлювальний електронний мікроскоп;

ПК- персональний комп'ютер;

ОП- операційний підсилювач;

КІХ- кінцево-імпульсна характеристика;

НІХ-нескінченно-імпульсна характеристика;

ВСТУП

Із розвитком досліджень в області нанофізики настав стрімкий прогрес у нанотехнологіях та збільшення їх використання у різних галузях науки та техніки.

Наноматеріали такі, як ниткоподібні структури, наночастинки, квантові точки та інші об'ємні наноструктурні матеріали, мають унікальні властивості, відмінні від властивостей речовини у макроскопічному стані. Зменшення характерного розміру структурних елементів дозволяє прогнозовано змінювати фізичні параметри речовини, що, в свою чергу, відкриває нові горизонти для створення нових матеріалів та пристроїв з раніше недосяжними характеристиками.

Сьогодні нанотехнології вже багаторазово показали свою ефективність та перспективність, тому їхня актуальність є очевидною і не потребує додаткових пояснень. Саме дослідженням в області нанофізики та нанотехнологій зобов'язані сучасні успіхи в області альтернативної енергетики (покращення ефективності сонячних батарей, водневих паливних елементів), електроніки (новітні електронні пристрої на ефекті квантових точок), екології (створення нових екологічних матеріалів, зменшення відходів, очищення води та повітря) тощо.

Розвитку та впровадженню нанотехнологій передують дослідження в галузі нанофізики. Робота із нанооб'єктами передбачає певну культуру досліджень, наприклад високий вакуум, щоб атмосфера залишкових газів не заважала досліджувати ті ефекти, які нас цікавлять.

Метою даної дипломної роботи є розробка системи термічної обробки нанорозмірних плівкових зразків безпосередньо у колоні електронного мікроскопа.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. проаналізувати характеристики наявних на ринку комерційних систем такого роду та їхню доступність для вітчизняних дослідників;
2. спроектувати власну систему;
3. спроектувати апаратну частину власного комплексу та підібрати сучасну елементну базу;
4. створити апаратну частину комплексу;
5. написати програму мікроконтролера та програмне забезпечення оператора;
6. створити прототип системи;
7. протестувати створений програмно-апаратний комплекс в ході фізичного експерименту.

Об’єкт дослідження – це методики in-situ досліджень нанорозмірних плівок.

Предмет дослідження – технологія in-situ нагріву тонкоплівкових зразків у колонні електронного мікроскопу.

Структура й обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 44 сторінки, із них основного тексту 33 сторінок, 13 рисунків за текстом, список використаних джерел із 23 найменувань на 2 сторінках.

Розділ 1. Мікроскопія

1.1 Мікроскопи

Мікроскоп - це оптичний прилад, який використовується для збільшення та детального дослідження об'єктів, які неможливо роздивитись людським оком. Існує велика кількість видів мікроскопів. Кожен з них має певні особливості, які застосовуються для певних досліджень. Оптичні або світлові мікроскопи, використовують у медицині, біології, для дослідження клітин, тканин, бактерій. Флуоресцентні мікроскопи, через додавання флуоресцентних барвників або маркерів, які вводять на зразок, дає можливість для досліджень ДНК, РНК та білків. Тому крім біології та медицини їх ще застосовують у молекулярній біології. Основним принципом роботи конфокальних мікроскопів є лазерне освітлення. Яке дає велику контрастність та можливість створення тривимірних реконструкцій зразків, їх широко експлуатують у матеріалознавстві. Атомно-силові мікроскопи експлуатують у нанотехнологіях, дослідженнях молекулярних взаємодій, матеріалознавстві, через створення зображення на атомному рівні, та спромога досліджувати зразки не тільки у вакуумі, а у рідкому середовищі також.

Для дослідження фазових переходів при нагріванні використовують електронні мікроскопи. Їх загальна конструкція дуже схожа на оптичний мікроскоп. Але у таких мікроскопах світло замінюється електронами, а скляні лінзи замінюються електромагнітними або електростатичними лінзами. Також у деякі електронні мікроскопи додають нагрівальні елементи для дослідження зразків при підвищених температурах. Таким чином можна спостерігати та вивчати термічні властивості матеріалів, фазові перетворення та інші процеси, які відбуваються при термообробці зразків.

1.2 Як працюють системи нагріву у мікроскопах

Системи нагрівання мікроскопа: це засоби для створення контрольованого середовища під час досліджень зразків. Матеріали під час нагрівання проявляють властивості, які не притаманні їм у макроскопічному стані. Цей інструмент допомагає вченим отримувати нові знання про матеріали, що відібражається у зміні їх структури та поведінки зразка загалом під дією температур, проводячи такі дослідження, як фазові переходи, хімічні реакції або механічні деформації зразків.

У електронних мікроскопах ключовою складовою, особливо у трансмісійно електронному мікроскопі, є система нагріву, яка забезпечує контроль температури, з високою точністю, експериментального об'єкта. Під час проведення експериментів важливо звернути увагу на точність нагріву, через можливість отримання пошкодження зразків через можливість некоректної стабілізації температури, яка має сильний вплив на наноматеріали.

Нагрівальний елемент є серцем системи нагріву. Є декілька типів нагрівальних елементів, принципом яких слугує перетворення електричної енергії у тепло, використовуючи при цьому матеріали, які не вразливі до високих температур та можуть пропускати її, а саме вольфрам чи легований бором лантану. Отримують нагрів зразків за допомогою резистивних, інфрачервоних та мікрохвильових нагрівачів. Окрім нагрівального елементу необхідно мати охолоджувальну систему для стабілізації та неконтрольованого перегріву усієї системи. Такими системами може виступати рідинні чи повітряні.

Наступним елементом у нагрівальній системі складають датчики та регулятори температури, вони відповідають за контроль та налаштування ступеня нагріву. При проведенні експерименту важливо, щоб матеріал нагрівся рівномірно, тому в електронних мікроскопах є механізм зміщення, який дає можливість пересувати зразок по осі, під дією високих температур. Інфрачервоне екранування та керамічні матеріали, зокрема алюмінієвий оксид

чи силікатні волокна служать для ізоляції системи від теплових втрат та створюють умови для енергоефективного нагрівання.

Термопари та термістори забезпечують зворотний зв'язок із системою регуляторів, які спрямовують газ у порівнянні з потоком повітря, підтримуючи температуру постійною.

1.3 Типи нагрівальних елементів

1.3.1 Резистивні нагрівачі

У цьому нагрівачі для отримання тепла використовують властивість електричного опору. Беручи матеріали, які мають велику електропровідність та багато рухомих електронів. Гарним прикладом таких матеріалів слугують вольфрам та нікель, які підходять до цих критерій. Такі нагрівачі мають широке застосування у ТЕМ, через роботу із високими температурами та зручність у використанні.

Компоненти резистивних нагрівачів

Перше із чим потрібно визначитись, це матеріал, який буде взято для виготовлення дроту нагрівача. Тут враховують можливі значення температури під час досліду. Для дуже великих температур, як раніше було зазначено, зручно та практично використовувати дроти із вольфраму та нікелю, через їх властивості. Але потрібно врахувати тепловтрати, які неодмінно будуть присутні. Тому використовують ізоляційні системи, які можуть зменшити втрати, та збільшити продуктивність процесу нагріву. У нижній частині печі використовуються ізоляційні матеріали для капсулювання нагрівача таким чином, щоб утворене тепло здебільшого передавалося зразку. Ще одним компонентом у резистивних нагрівачів є датчики температури. Моніторинг температури всередині зразка в реальному часі активний за допомогою таких функцій, як термопара або термістори, вбудовані в резистивні нагрівачі. Ці

датчики подають миттєві сигнали, щоб переконатися, що нагрівач має необхідну температуру.

Через свою практичність та ефективність, нагрівачі, які працюють із властивостями опору, мають широке застосування у ТЕМ, СЕМ та інших. Вони можуть показувати зміну у поведінки в реальному часі, тому вони добре підходять для дослідження наноматеріалів.

Ця можливість *in situ* є перевагою для отримання корисної інформації про поведінку матеріалу в різноманітних температурних умовах.

1.3.2 Інфрачервоні нагрівачі

Особливість інфрачервоних нагрівачів є безконтактність. Зразок нагрівається завдяки випромінюванню інфрачервоного світла, до певної температури. Інфрачервоні нагрівачі не впливають на роботу ТЕМ, а саме через те, що такі хвилі знаходяться поза межами видимого світла в електромагнітному спектрі. Через такий теплообмін зменшується ризик механічного впливу на зразок.

Особливості використання інфрачервоних нагрівачів

Нагрівання зразка відбувається шляхом випромінювання, а не через теплопровідність чи конвенції, це робить такий нагрів контрольованим способом теплообміну. Такі нагрівачі моментально, за дуже маленький проміжок часу нагрівають або охолоджують зразок. Ще однією особливістю є теплообмін з конкретною частиною матеріалу, що важливо для локалізованих досліджень. До недоліків таких нагрівачів, можна віднести їх високу чутливість до налаштувань. При неправильному налаштуванні може відбуватися нерівномірний нагрів зразків, що призведе до некоректних результатів. Також до недоліків можна віднести ризик окиснення, яке відбувається при певному нагріву. Тому використовуються вакуум або інертну атмосферу під час досліду.

Тому їх використовуються для дослідження фазових переходів, аналізу хімічних реакцій, термічній обробці наноматеріалів та інших досліджень наноматеріалів.

1.3.3 Мікрохвильові нагрівачі

Мікрохвильовий нагрів працює за принципом генерації електромагнітних хвиль у мікрохвильовому діапазоні частот (часто 2,45 ГГц).

У цих нагрівачів тепло виділяється завдяки тертям молекул, які контанкуючи з електромагнітними хвилями, що генерує нагрівач, взаємодіє. Для швидкого та ефективного нагрівання використовують речовини, що мають схольність до кращого поглинання мікрохвильової енергії та за маленький проміжок часу можуть досягати високих температур. Такі речовини загалом мають полярні молекули, які саме відповідають за це.

До складу таких нагрівачів входить генератор мікрохвиль, основним принципом роботи якого є генерація хвиль за конкретними частотами. Отримані мікрохвилі перенаправляють саме на зразок, паралельно хвилеводи направляють їх, що енергія розподілилась однаково на зразок. Окрім цього, система має датчики, які слідкують за коректністю роботи системи, для уникнення перегріву, так як подача відбувається з великою швидкістю.

До особливостей та переваг, як і у інфрачервоних нагрівачів, можна віднести локалізований та швидкий нагрів зразків. Цей спосіб нагріву є без фізичного контакту з матеріалами (зразками), що дає можливість зменшити ризики пошкодження та забезпечити збереження цілісності зразка, що є важливим для тендітних та крихких матеріалів.

Крім переваг є суттєві недоліки у використанні мікрохвильових нагрівачів. Один із них це те, що не всі матеріали поглинають мікрохвилі. Деякі матеріали можуть або повільно нагріватися або взагалі не піддаються

теплообміну. Та іноді через неоднорідне поглинання мікрохвиль зразки можуть нагріватися нерівномірно, і тоді стає складно отримати однорідного теплообміну.

Мікрохвильові нагрівачі стали невід'ємною складовою у вивченні фазових переходів, термічної стабільності та інших спектрів досліджень хімічних реакцій.

1.4 Трансмісійний електронний мікроскоп

Сьогодні ТЕМ є, мабуть, найефективнішим і універсальним інструментом для характеристики матеріалів у просторових масштабах від атомного масштабу (від < 1 нм до 100 нм) до мікронного масштабу та далі.

Його використовують для досліджень структур речовини, його кристалічні дефекти, тканин рослин і тварин, бактерій та вірусів. Порівнюючи із оптичним мікроскопом він має збільшену роздільну здатність, що дає змогу роздивитися окремі атомні площини або колони атомів.

1.4.1 Принцип роботи трансмісійного електронного мікроскопа

Процес роботи ТЕМ подібний до роботи оптичного мікроскопа. Електрони проникають через тонкий зразок, а потім зображуються відповідними лінзами.

До складу ТЕМ входить електронна гармата, дві та більше конденсорних лінз, які призначені для фокусування електронів на зразок. Для нерухомості або певній коригуванні встановлено столик для зразків, та відповідає за просторову роздільну здатність зображення. Щоб отримати збільшене зображення ТЕМ має щонайменше три лінзи, які саме відповідають за створення збільшеного зображення з просторовою роздільною здатністю. Типова схема трансмісійного електронного мікроскопа зображено на рис.1.4.1.

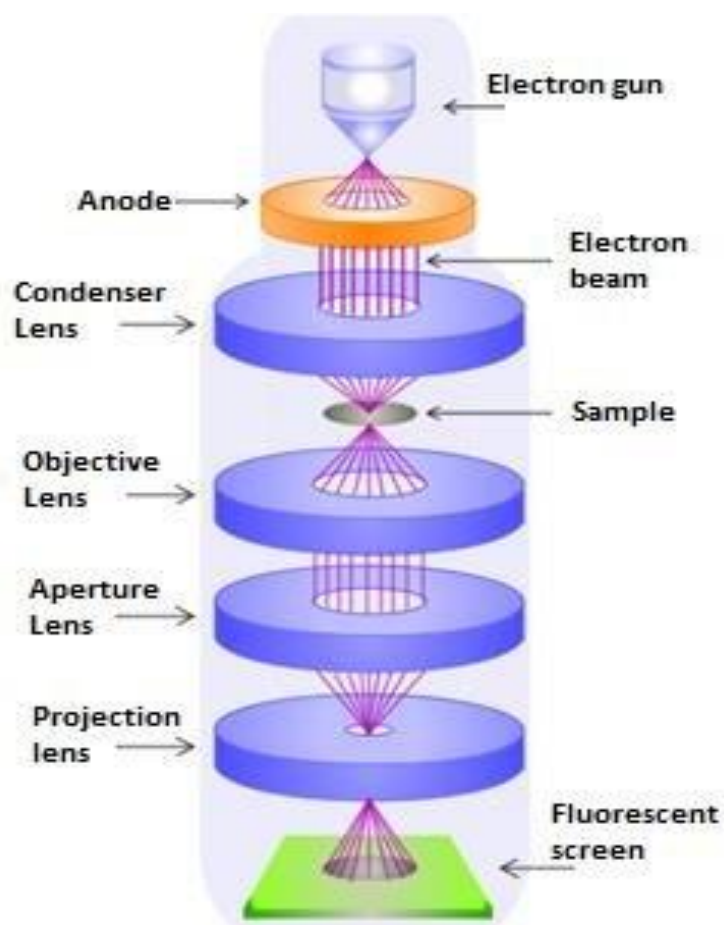


Рис. 1.4.1 Схема будови трансмісійного електронного мікроскопа

1.4.2 Плюси у використанні трансмісійного електронного мікроскопа

Одна з важливих плюсів це отримання зображення зразка з найбільшою роздільною здатність, яка досягає 0.1 нм. Ця перевага дає можливість для вивчення внутрішніх особливостей матеріалу. А саме: деталізації структури матеріалу, нанокластери, дефекти та аналіз внутрішньої структури матеріалу (зразка). Дає можливість побачити дифракційні картини, які показують фазовий склад матеріалу, можливість визначити кристалічну структуру та орієнтацію кристалів. Що сприяє прогресу у дослідженнях кристалічних та напівкристалічних матеріалів.

1.4.3 Мінуси використання трансмісійного електронного мікроскопа

Обслуговувати такий мікроскоп буде затратно. Зразки, які використовуються для дослідження проходять складний етап підготовки, який вимагає точних навичок. Розміри такого зразка повинні бути точно розрахованими, через обмеження товщини та розміщуватись не рухомо через можливість пошкодження, тому стабільність є одним із важливий критеріїв. Окрім обмеження товщини та стабільність зразка, важливо, щоб зразок був повністю сухим, так як робота буде відбуватись у вакуумному середовищі.

Розділ 2. Огляд методів та методик

2.1 Методи та методики, які застосовують для розробки програмно-апаратної системи нагріву нанорозмірних плівкових зразків

Існує багато методів та методик для забезпечення точного та рівномірного нагріву, деталізації та аналізу теплообміну при розробці програмно-апаратної системи нагріву нанорозмірних плівкових зразків.

2.1.1 Методика моделювання теплових процесів

Основна функція цієї методики полягає в аналізі та визначенні наперед, як буде розподілятися температура у зразку та нагрівачі. Насамперед, потрібно вирішити теплове рівняння, тому використовують два методи для розрахунків, а саме метод скінченних елементів (FEM) та метод скінченних різниць (FDM).

Метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM)

Його використовують для конструювання моделей, які описують фізичні явища, які відбуваються від час дослідження. Він дозволяє дослідити теплообмін у значно більших за розміром та формою об'єктів, через розбиття їх на маленькі сегменти (або квадрати та трикутники) та опису їх поведінки через математичні рівняння. Отримані рівняння об'єднують в одну систему

рівнянь, яка дає опис усього об'єкта дослідження. Після чисельного вирішення цих рівнянь, можна отримати точні значення величин, наприклад, температури чи напруги у будь-яких вузлах сітки, та побудувати графік значень величин, які потрібні для аналізу поведінки системи. Через ці характеристики, його використовують, коли дослідження проводять із речовинами, які мають складну форму та структуру. Наприклад, цей метод підійде для розрахунку аналізу напружень у мостах та будівлях.

Метод скінченних різниць (Finite Difference Method, FDM)

Цей метод вирішення рівнянь, схожий на FEM, але застосовують у випадках, коли не можна узяти отримані значення, тому використовують наближені вирази різниці значень функції в сусідніх точках сітки. Отриману систему рівнянь вирішують для кожного сегменту. Тут можна використати методи ітерацій або прямі методи розв'язку систем лінійних рівнянь, що дає змогу проаналізувати наближені значення отримані після розрахунку. Цей метод підходить коли не можна отримати точні значення та розрахунку через використання звичайних методів.

Для відображення 3-D моделей застосовують програмні забезпечення, такі як COMSOL Multiphysics або ANSYS, які моделюють поведінку об'єкта, та детально показують усі критерії та дані, що потрібні для дослідження.

2.1.2 Методи управління та регулювання температурою

Через важливість подачі температури стабільно, потрібно використати методи, які зменшать ризики та нададуть можливість контролю. Таким методом є встановлення ППД – регулятора. Він складається з пропорційної, інтегральної та диференційних частинах, кожна з яких відповідає за певних сегмент роботи.

Пропорційна частина відповідає за уникнення помилок та корекцію між температурами. Інтегральна частина включає у себе суму похибок, яка може виникнути при нагріванні зразка та наблизити до потрібної температури, навіть

коли розбіжність маленька. Основною задачею диференційної частини у контролі та коректировці похибок, щоб запобігти неконтрольованому перегріву чи великі скачки температури.

Наступний метод це - програмовані профілі нагріву. Популярність цей метод має, коли речовина є складною та коливання температури може вплинути на результат експерименту. Такий метод використовує мікроконтролери. Щоб отримати інформацію про дослідження застосовують платформи Arduino та STM32, які дають детальний аналіз даних які стосуються експеримента.

Метод програмованих профілів нагріву підійде до складних матеріалів, які можуть швидко охолоджуватись чи бути вразливими.

Щоб отримати детальну інформацію та модель поведінки речовини під час експерименту, вживають метод модельно-орієнтованого керування, використовуючи програмні середовища COMSOL та ANSYS.

Оптимізаційні методи спрямовані на покращення стабільності нагріву та оптимізації енергоспоживання, покращуючи результативність роботи системи нагріву.

2.1.3 Методика розробки апаратної частини нагрівальної системи

Важливою частиною у цьому методі є вибір мети та специфікацій для системи. Після задання основних параметрів (потужності нагріву, тип об'єкта та середовища та інші) потрібно обрати тип нагрівального елемента, виходячи з потужності та швидкості нагрівання об'єкта. Визначитись із системою теплоізоляції та спроектувати систему, яка дасть можливість координувати температуру та одержувати дані з сенсорів. Наступним етапом є проектування системи контролю температури, де потрібно обрати датчики температури, ПІД-регулятори та скоригувати параметри. Для безпеки та уникнення пошкодження матеріалів, потрібно обрати охолоджувальну систему, може бути із

застосування повітря чи інших рідин. Підібрати речовину та кріплення, з якого буде виготовлених механічний пристрій. Тут потрібно брати речовину, яка термостійка та може захистити від втрати теплової енергії. Витримувати таку температуру можуть матеріали виготовлені із кераміки чи певних металів. Після вибору усіх складових для дослідження, потрібно налаштувати інтерфейс для контролерів та сенсорів, які будуть взаємодіяти із головним комп'ютером. Та останнім етапом є діагностика системи, наскільки коректні та реальні може бути значення, та перевірити на стабільність температуру нагріву зразка.

2.1.4 Методика калібрування та валідації температури

Цей метод допомагає продіагностувати та коректність даних, які дають датчики температури та регулятори. Для цього поруч із датчиками, встановлюють термометр чи термопару. Зібрану інформацію даних отриманих з термопари або термометрів аналізують, порівнюючи із даними, які отримали датчики. Якщо при порівнянні отриманні значення на обох сенсорів відрізняються, то додатково вносять корективи до алгоритмів, таким чином зменшуючи похибку при виконанні дослідження.

При валідації температури необхідно проаналізувати на коректну роботу нагріву, а саме як довго тримається задана температура, чи на усьому зразку має однакове значення та за скільки часу вона може досягати конкретного значення.

2.1.5 Методи збору та аналізу даних

До методів збору даних відносяться: отримання інформації про різні параметри з сенсорів, перевірка точності даних при зміні параметрів системи, введення інформації, яку отримують датчики, діагностика на достовірність результатів під час проведення дослідження та демонстрація результатів

експерименту із застосуванням інноваційних технологій, зокрема MATLAB, Python (NumPy, Pandas).

Метод аналізу даних пов'язан із методами, що рахує середні результати, який зв'язок між собою мають величини і тд. Чудовим інструментом для вирішення цієї задачі є COMSOL Multiphysics та ANSYS. З використанням цих програм можна отримати велику кількість даних пов'язаних зі зміною поведінкою та структурою зразка, що відбувалась під час дослідів.

2.1.6 Симуляційні та експериментальні методи

Якщо певний дослід не можливо виконати застосовуючи вище перераховані методи, тоді застосовують симуляційні методи.

Для цього використовують додатки COMSOL, ANSYS або MATLAB. Вони симулюють поведінку матеріалу, враховуючи велику кількість параметрів, які можуть впливати на зразок під час проведення експерименту. Таким чином, більша кількість параметрів може бути прорахована програмними забезпеченнями, що зменшує витрати на його проведення та може врахувати ті змінні, які на перший погляд могли не врахувати. Під час проведення експериментальної частини дослідження, особливу увагу потрібно приділити коректності роботи сенсорів та стабільності температури.

Також проаналізувати теплопровідну та теплоізоляційну здатність матеріалу, для опису поведінки речовини під дією тепла.

Наступним кроком є вивчення властивостей зразка за допомогою електронних мікроскопів та реалізація ряду перевірок для отримання реалістичних та коректних даних.

2.2 Мікроконтролери

Мікроконтролери - це маленькі інтегральні схеми, які використовуються для керування різними пристроями. Мікроконтролери складаються з центрального процесора, пам'яті (оперативна та постійна) та периферії. До периферії входить: входи та виходи, аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), різні таймери, цифрово-аналогові перетворювачі (ПЦАП) та інші інтерфейси для зв'язку з іншими пристроями, саме вони грають велику роль у вартості мікроконтролерів. Тобто, це як маленький комп'ютер, який робить будь-який прилад "розумним" та "роботизованим".

Їх особливість полягає у точності виконанні завчасно запрограмованої конкретної задачі. Це дозволяє зробити їх маленькими за розмірами та зменшити енергозатратність. Мікроконтролери можна побачити у повсякденному житті у пральній машині, автомобілях, кавоварці, холодильнику та інших приладах.

Класифікувати мікроконтролери можна за розрядністю та за архітектурою процесора. Більш прості та менш потужні це 8-бітні мікроконтролери. З привілеїв у них менша вартість та менша енергозатратність. Наприклад, мікроконтролер Intel 8051.

Він був розроблений ще у 1980-х роках, і по сей день різні виробники роблять клоновані версії, тому він і наразі залишається широко відомим. Ще одним із популярних мікроконтролерів є Microchip PIC включаючи серії PIC10, PIC12, PIC16, PIC18. Відрізняються вони між собою кількістю виводів, доступної пам'яті та периферією. У промисловій галузі поширені Renesas R8C. Їх відмінність полягає у стабільності під час впливу високих температур.

Для більш складних задач використовують 16-бітні мікроконтролери, вони більш потужні та можуть містити у собі більший об'єм пам'яті ніж 8-бітні. Наприклад, Microchip PIC24, напрочуд від усіх попередніх серій Microchip PIC

(PIC10, PIC12, PIC16, PIC18), мають більш широкий спектр можливостей. Це дає перевагу у точності обробки сигналів та керування процесами. Texas Instruments виготовив серію MSP430. Привілеї таких мікроконтролерів, це робота з низьким енергоспоживанням тому, вони ідеально підходять для портативних приладів.

Якщо потрібно, щоб процесор мав більшу пам'ять та виконував більш складні команди використовують 32-бітні мікроконтролери. Порівняно з 8 - бітними та 16 - бітними мікроконтролерами, вони можуть працювати з більшими обсягом даних, але вартість такого приладу становитиме більше, ніж менш потужні мікроконтролери. Але такі мікроконтролери також є оптимізованими для енергоспоживання, по при високу продуктивність та значну кількість периферій. До більш поширених 32 – бітних мікроконтролерів можна віднести ARM Cortex-M. Через вирішення складних задач та маленьке енергоспоживання його використовують у медичних приладах, робототехніці, автомобільних електронних системах і тд. На рисунку 2.2.1 та 2.2.2 зображено приклад 32-бітного мікроконтролера stm32f407vgt6 та 8-бітного мікроконтролера Intel 8051.



Рис.2.2.1. Мікроконтролер stm32f407vgt6



Рис.2.2.2. Мікроконтролер Intel 8051

2.3 Мова програмування C

Вперше ця мова програмування з'явилася у 1972 році, засновником її був Деніс Рітчі, він розробив її для застосування із операційною системою UNIX. З того часу вона стало однією із поширених мов програмування та наразі має безліч версій. Її функція полягає у розробки системного програмного забезпечення.

Основні цілі:

- Проста реалізація, із застосуванням не складного компілятора
- Можливість роботи напряму з оперативною пам'яттю
- Обходитись без значної динамічної підтримки, при цьому генерувати мінімальну кількість команд процесора

Обробка даних являється основною задачею усіх програмних забезпечень, але через різний тип даних, вони по-різному опрацьовуються та зберігається. При виборі типу даних потрібно звернути увагу на те, яку множину можливих значень після компіляції хочете отримати. 'Різниця також є у тому, як саме ці данні зберігаються у пам'яті, які операції з ними можна робити, та які функції властиві цьому типу даних. Це дає змогу компілятору перевіряти допустимі варіанти конструкцій програми.

До основних типів даних відносяться, так звані арифметичні, зокрема:

- `int` – цілі величини
- `char` – символльні величини
- `bool` – логічні величини
- `float` – дійсні величини
- `double` – дійсні величини з подвійною точністю

- short – короткі цілі величини

Для проведення різних операцій з даними, існують різні оператори, до яких відносяться:

1. Арифметичні оператори. Якщо потрібно додати, відняти, помножити або поділити величини, використовують «+», «-», «*», «/».
2. Оператори порівняння: «==», «!=», «<», «<=», «>=», «>», застосовують коли потрібно показати, що величини дорівнюють, не дорівнюють, менше, менше або дорівнює, більше або дорівнює та більше відповідно.
3. До логічних операторів відносяться: логічне заперечення(не) «!»; логічне І «&&»; логічне або «||».
4. Побітові оператори: побітове не «~»; побітове І «&»; побітове або «|», побітові виключаючи або «^»; побітовий зсув вліво «<<»; побітовий зсув вправо «>>»

Також окрім основних операторів, існують складені оператори присвоєння та інші оператори.

Для вибору конкретних змінних, із певними характеристиками використовують умовні конструкції «if», «else if» та «else». Вони допомагають прописати умови для значень змінних, які потрібно використати для певних операцій. Якщо існують велика кількість значень, які підходять за цими параметрами, можна використати «switch», яка перевірить на кількість значень певну змінну.

При потребі повторів операцій зі змінними, тобто циклів застосовують «for» та «while». Вона допомагає налаштувати цикл, та вказати до якого певного значення змінної потрібно його повторювати.

Якщо потрібно обробити специфічних задач та зробити програмний код компактним використовують функції. Для цього потрібно оголосити цю функцію, визначити її та викликати функцію. Для великої кількості значення, необхідно застосувати масиви. Це полегшить роботи через збереження інформації всіх змінних у конкретному місці. Потрібно спочатку оголосити масив, потім наповнити її значеннями змінних та викликати певну змінну з масиву. Але усі змінні при цьому мають однаковий тип змінних, наприклад усі `int` чи `double`.

Для об'єднання різних типів змінних в одну, застосовують структури. Їх можна оголосити та користуватися певними змінними у конкретних частинах коду. У якості змінних можуть виступати не тільки основні типи даних, а і функції, масиви, вказівники та самі структури, що робить їх зручним у використанні, збереження великої кількості різних типів даних та полегшення структуризації програмного коду.

Щоб зменшити об'єми використаної оперативної пам'яті є вказівники. Основною задачею яких є посилання на певну змінну, структуру, масив чи елемент у масиві, функції та інші. Вказівники видаляють певні значення, якщо їх уже не будуть використовувати далі у коді, та можуть навіть замінити їх на інші елементи, для того щоб не оголошувати нові конструкції. Це економить пам'ять та не перезавантажує код. Вказівники працюють напряму із оперативною пам'яттю.

Спочатку ця мова програмування була створена для розробки операційних систем. Велика частина програмних забезпечень та операційних систем розроблені цією мовою. Її також використовують при написанні програмних забезпечень для мікроконтролерів та мікропроцесорів.

Широке застосування має і у розробці ігор, для опису руху об'єктів, анімації та інших фізичних процесів. Застосовують цю мову для обробки та

реалізації великої кількості бази даних, обробки зображень, роботи з декількома процесорами.

Плюси:

- Програмний код можна написати швидко, при цьому не використовуючи великої кількості пам'яті
- Програмувати код можна навіть коли немає великої кількості пам'яті та можливостей
- Можливість писати великі коди використовуючи допоміжний конструкцій
- Має багато бібліотек та інструментів та не складне у вивченні та використанні.

Мінуси:

- Відсутність автономного керування пам'яттю, тож потребує концентрації та уваги особи, яка програмує, бо незначна помилка може викликати збій програми.
- Також відсутність об'єктно-орієнтованого програмування, тобто інноваційних конструкцій, які вже присутні у більш молодих мов програмування.
- Не зручно у використанні для програмування високорівневих програм, тому що потрібно контролювати усі процеси власноруч.
- Доступ до оперативної пам'яті надається напряму, тому можуть виникнути питання, що до безпеки системи.

- Інші мови програмування мають більшу кількість бібліотек ніж мова програмування C.

2.4 Аналого-цифровий перетворювач

Шляхом перетворення аналогового вхідного сигналу у цифровий код, цифрові пристрої, такі як мікроконтролери, комп'ютер або спеціалізовані обчислювальні системи, можуть обробляти аналого-сигнальну інформацію, яку отримують через датчики.

Спочатку аналоговий сигнал вимірюють через певний проміжок часу, його фіксують, якщо узяти менший інтервал вхідний сигнал буде точніше, утворюючи певні дискретні рівні. Їх прирівнюють до цілого числа, таким чином отримують цифровий код.

Усі аналого-цифрові перетворювачі мають певні характеристики, за якими класифікують їх, та використовують при різних дослідках, тому що вони мають різну ефективність та точність.

Перше, як і мікроконтролери різняться їх розрядністю, але АЦП можуть бути 8 бітні, 12 бітні та 16 бітні. Різняться вони між собою тим, що чим більше бітність АЦП, на тим більшу кількість дискретних рівнів, вони можуть поділити вхідний сигнал. 8 бітні на 256 рівнів, 12 біт на 4096 рівнів, та 16 бітні на 65536 рівнів. Зі збільшення бітності також збільшується роздільна здатність.

Для перетворення на цифровий виконується така послідовність:

1. Семплювання – це процес дискретизації, у якому фіксуються значення при певному фіксованому проміжку часу.
2. Квантування – це процес перетворення дискретних величин у певні дискретні рівні.
3. Кодування – це процес зумовлений надання бінарного коду «1» та «0» конкретному рівню.

Саме цю оцифровану величину отримує мікроконтролер чи інші цифрові системи.

На рисунку 2.4(1) зображено процес перетворення аналогового сигналу у цифровий сигнал.

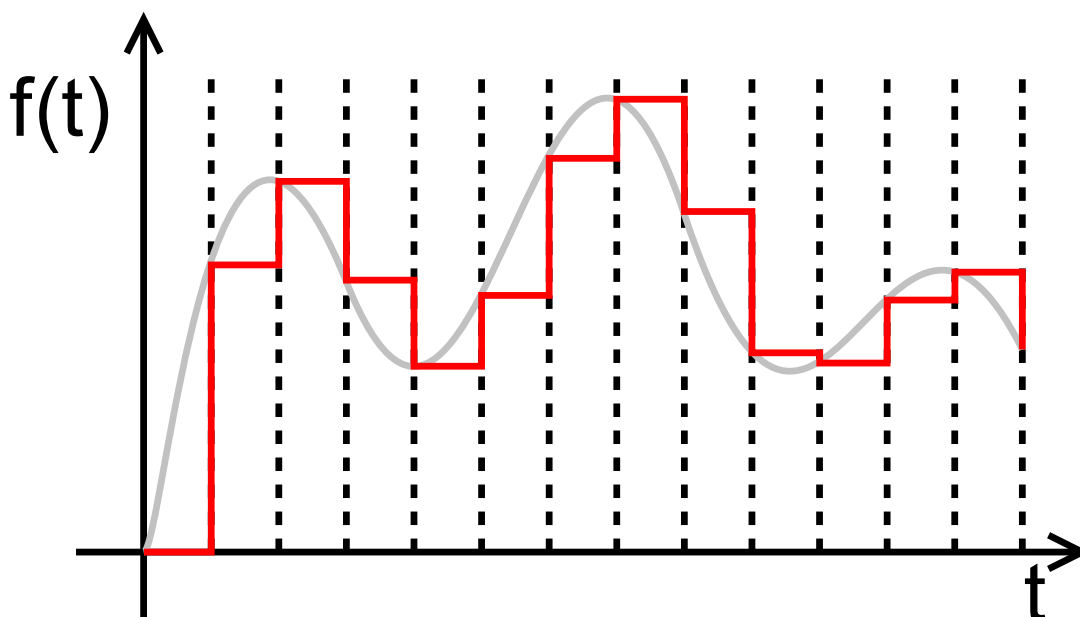


Рис. 2.4(1). Процес перетворення аналогового сигналу у цифровий.

Потім відбувається процес квантування. Він полягає у розбиванні дискретних функцій на певні числові рівні. Кроком квантування називають різницю між двома детермінованими значеннями, при цьому квантування може бути рівномірне та нерівномірне. Потім кожному дискретному значенню, потрібно поставити код. Для цього використовують бінарний код. На рисунку 2.4(2) зображено типи АЦП.

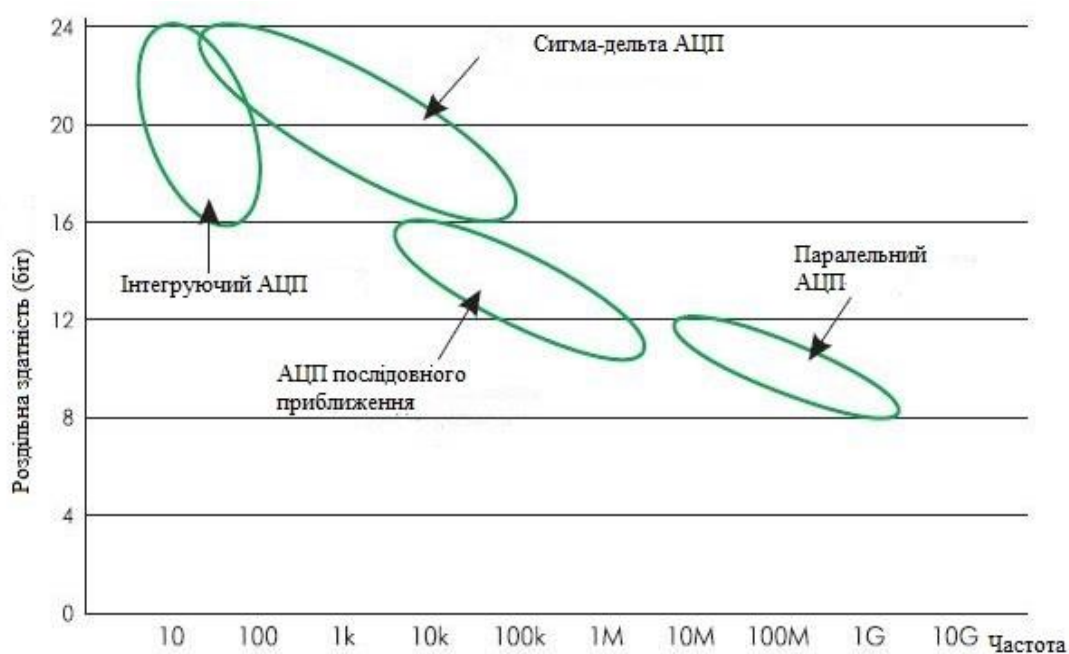


Рис.2.4(2). Типи АЦП

2.5 Шум в АЦП

Через вплив фізичних та електронних процесів може виникати шум в АЦП. Це сприяє перешкоджанню отримання точного вхідного сигналу, та його якість. Такий шум може виникати під час квантування, при процесі розділення на дискретні рівні, але для зменшення такого шуму використовують більшу бітність для АЦП. Також треба врахувати похибку, яка може бути під час округлення сигналу до найближчого рівня. Її розраховують за допомогою формули:

$$Q = \frac{\Delta}{\sqrt{12}}$$

де, Δ — крок квантового рівня.

Також може виникати тепловий шум, через теплові коливання електроннів у провідниках. Визначити такий шум можна за використання формули:

$$V_n = \sqrt{4kTRB}$$

де k — стала Больцмана, T — температура в Кельвінах, R — опір, B — ширина смуги частот. Такий шум прямопропорційний температурі та опору. Але такий шум не зменшити через використання АЦП із більшою бітністю, він присутній завжди та має рівномірний спектр по частотах.

Наступний шум виникає через коливання моменту часу дискретизації, та називається шум джиттера. На похибку сприяє затримки у вибірці, особливо на високих частотах. Причиною можуть бути апаратні обмеження, електромагнітні перешкоди, тепловий шум або неточність генераторів тактової частоти. Через нестабільність та шумові сигнали в джерелі живлення, можуть виникати шуми, які впливають на коректність роботи внутрішньої системи АЦП, зміщення рівнів опорної напруги та некоректних даних перетворення.

Також шуми можуть утворюватись через інші електромагнітні поля, які утворюються від пристроїв, що знаходяться поблизу, а саме антени, радіопристрої чи приводи. Міжканальні перешкоди також можуть викликати

шум та перешкоди. Загалом велика кількість факторів впливає на його появу, навіть неякісні матеріали, які використовуються при роботі.

Тому, щоб знизити ризик появи шумів, потрібно детально перевіряти якість деталей, таких як низькошумові джерела живлення та опорної напруги, конденсатори та резистори. Встановлюють фільтри, вони застосовуються для зменшення коливання і шуму в ланцюгах живлення. Треба скрупульозно підібрати усі частини апаратної системи. Також для зменшення впливу зовнішніх факторів, застосовують екранування, роюлячи металеві захисні конструкції, які зменшують перешкоди такі як, електромагнітні поля.

Важливим кроком для аналізу функціонування АЦП є оцінка шуму. Це допомагає зрозуміти та оцінити рівень шуму, який впливає на точність роботи. На першому етапі слід перевірити шум всередині системи, без подання сигналів. Такий шум називають «шумовою підлогою». Рівень цього шуму показує наскільки слабкі сигнали він може приймати. Отриманий шум розбивають на спектри, які через частоту можуть розказати, у якому приладі або компоненті переважають шуми, і після цього зменшити його або поставити додатково фільтри.

Далі порівнюють сигнал із шумом, щоб зрозуміти на скільки він буде більше за шум. Чим вищий він тим сигнал буде точнішим, для виміру користуються одиницею вимірювання рівня гнучкості, децибели. Такий аналіз роблять у якийсь певний інтервал часу, тому що шуми можуть бути показані на осцилографі у вигляді моментального імпульсу.

Систему слід перевірити на коректну роботу, чи правильно все було підібрано та протестувати систему, щоб зрозуміти де саме виникають шуми та перешкоди. Це може бути спричинено як внутрішніми компонентами, так і зовнішніми.

2.6 Цифрова фільтрація

Один із процесів мінімізації перешкоджень та шумів є обробка цифрових сигналів, або відокремлення певних частот. Такий процес називається

цифровою фільтрацією. Для цього застосовують математичні алгоритми які запрограмовані у програмному середовищі чи побудованих на базі мікроконтролерів та інших.

Цифрові фільтри поділяються на декілька типів, а саме:

- Фільтри низьких частот (Low-Pass Filters, LPF)
- Фільтри високих частот (High-Pass Filters, HPF)
- Смугові фільтри (Band-Pass Filters)
- Загороджувальні фільтри (Band-Stop Filters)

Фільтри низьких частот

Ці електронні фільтри розраховані на пропускання частот до конкретної порогової частоти, при цьому не дозволяючи проходити частотам вище до заданої. Такі фільтри бувають аналогові, цифрові та фільтри з активними компонентами. Аналогові фільтри низьких частот застосовують активні та неактивні елементи. Такими виступають резистори та конденсатори. На рисунку 2.6.1 зображено характерну схему із застосуванням RC-фільтра.

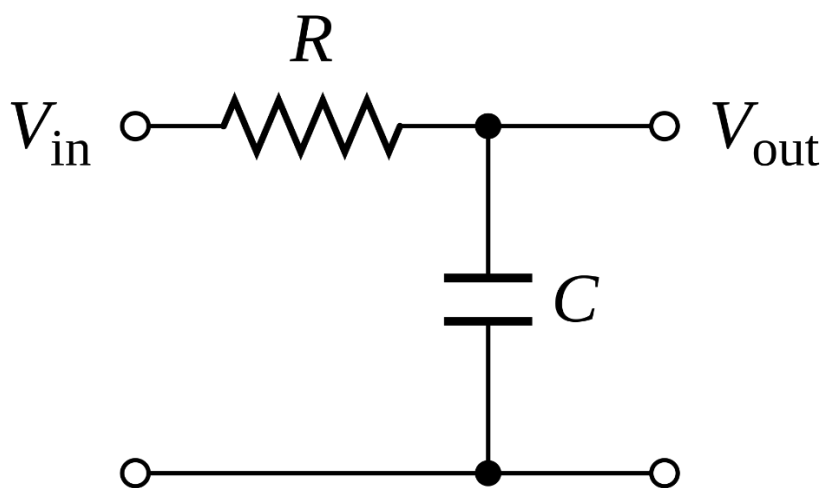


Рис. 2.6.1 Схема з використанням RC-фільтра для фільтра низьких частот

Конденсатор та резистор у цьому випадку з'єднанні послідовно. У такому випадку V_{in} (вхідний сигнал) використовується для послідовних комбінацій резистора та конденсатора, а V_{out} (вихідний сигнал) приймається тільки через конденсатор.

Для посилення фільтрації використовують фільтри з активними компонентами, а саме ОП. На рисунку 2.6.2 зображено приклад схеми такого фільтра.

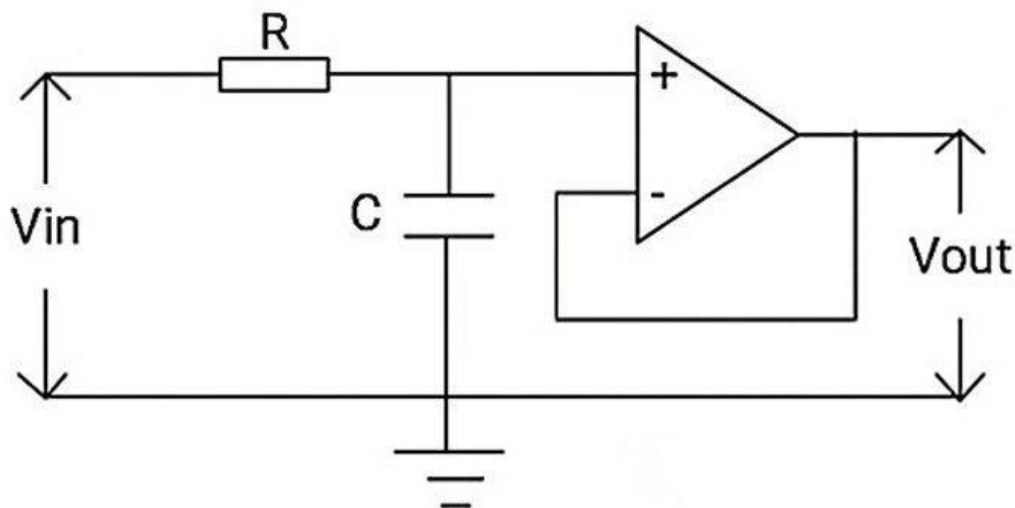


Рис. 2.6.2 Схема з використанням операційного підсилювача у фільтрі низьких частот

Їх застосовують для підсилення сигналу та його моніторингу. Вони коригують властивості частот та підсилюють напругу в рамках зворотнього зв'язку.

Використовують фільтри низьких частот у аудіотехніці, радіотехніці та електроніки, де потрібно мінімізувати вплив високочастотних перешкод.

Фільтри високих частот

Це фільтри, які відсіюють низькочастотні перешкоди, пропускаючи тільки ті які вище за порогову частоту.

Схема на рисунку 2.6.3 для аналогових фільтр високих частот дуже схожа на схему для фільтрів низьких частот. Різняться схеми розташування резистора та конденсатора. Це зроблено для того, щоб конденсатор блокував V_{in} входні сигнали, поки частота не дійде до значень порогової частоти, яку пропускає конденсатор.

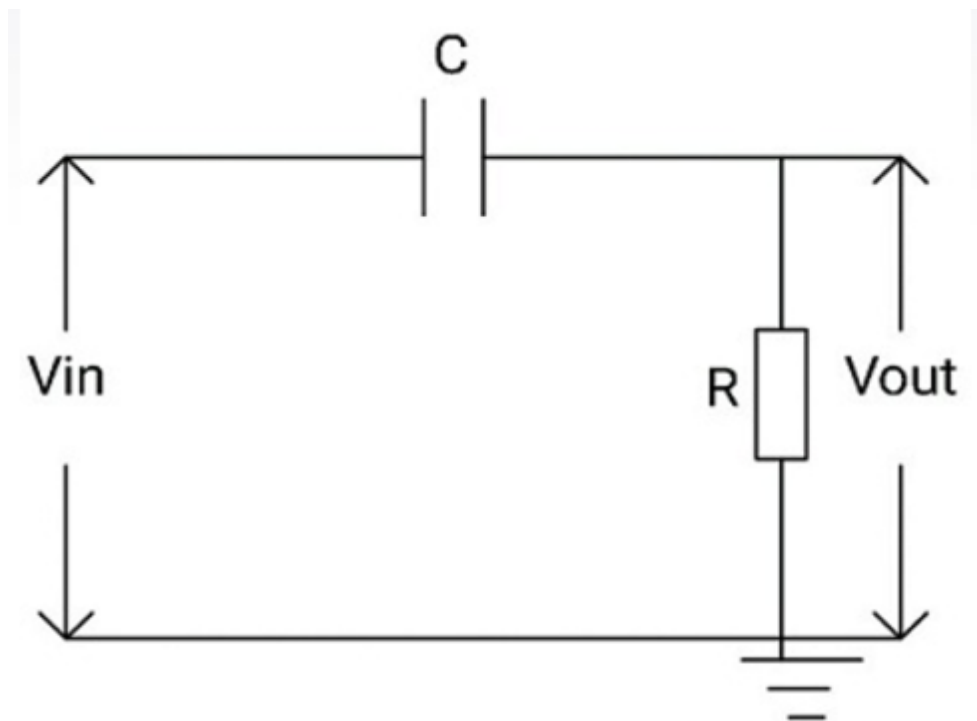


Рис. 2.6.3 Схема аналогових фільтрів високих частот

Так само, і фільтри високих частот із використанням ОП. На рисунку 2.6.4 зображено схему з використанням ОП для фільтрів високих частот.

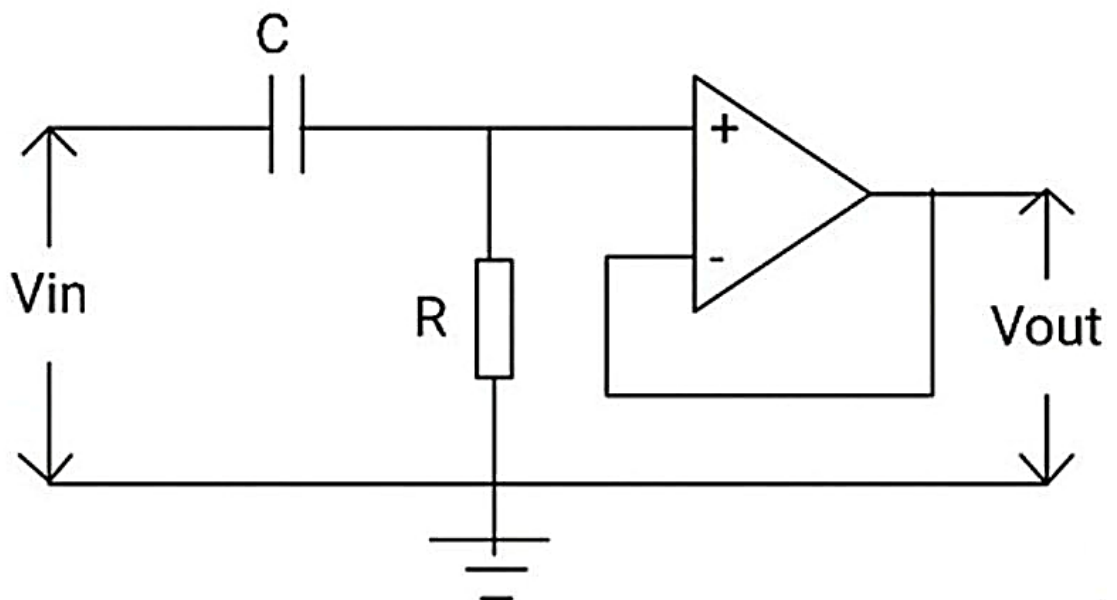


Рис. 2.6.4 Схема активних фільтрів високих частот

Використовують для фільтрації високочастотних сигналів.

Смугові фільтри

Його застосовують коли потрібно приглушити якісь конкретні частоти або їх діапазон, які не бажані при досліді. У цьому випадку використовують наприклад два резистори та два конденсатора, приклад такої схеми зображено на рисунку 2.6.5.

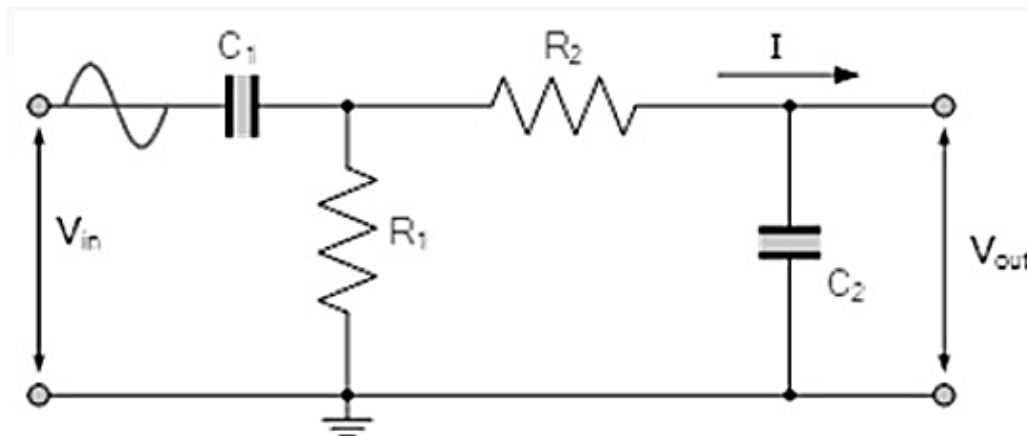


Рис. 2.6.5 Схема смугового фільтра

Через наявність двох резисторів та конденсаторів, смуговий фільтр має певний діапазон частот, які він може пропускати. Цей діапазон називають пропускнуою здатністю. Це можливо через те, що один із конденсаторів розміщений у колі з високими частотами, а інший навпаки.

Загороджувальні фільтри

Як і смугові фільтри мають певний діапазон частот, які послаблюються. Але загороджувальні фільтри пропускають частоти нижче та вище заданого діапазону, не пропускаючи середні частоти. Смугові фільтри навпаки пропускають середні частоти та послаблюючи нижчі та вищі частоти, заданого діапазону.

Методи реалізації цифрових фільтрів

При виборі метода реалізації цифрових фільтрів потрібно звернути увагу на тип фільтру, який використовується та критерій обробки сигналу.

Одним із методів є кінцево-імпульсна характеристика (КИХ). Вона показує, як системи відповідає на одиничний імпульс, яка була подана як

можлива вхідна дія. Таким чином отримуючи певний результат зміненої вихідної дії.

Особливості КІХ:

- До особливостей можна зазначити те, що така система має певний розмір. Через певний інтервал часу система буде показувати нулі;
- Результат отриманого однакового вхідного сигналу через проміжок часу не буде змінюватися;
- Ще одна особливість це лінійність. Тобто, при подання двох вхідних сигналів, результатом буде сума реакцій на кожний сигнал;
- Для проектування фільтрів дуже зручно використовувати КІХ, так як вона показує детальні результати перетворення сигналів;

Наступним методом являється метод нескінченно-імпульсна характеристика (НІХ). Це система, яка має нескінченне значення при одиничному імпульсі.

Особливості НІХ:

- При подання вхідних сигналів, система має нескінченне значення;
- Система може реагувати та продовжувати показувати сигнал, через повернення вхідного сигналу;
- Не потребує великої кількості обчислень для отримання результатів та використаних параметрів;

2.7 Процес цифрової фільтрації

У цьому процесі, програмну реалізацію математичного алгоритму вхідний сигнал є цифровим, а вихідний сигнал перетворюється на інший цифровий сигнал.

До процесу цифрової фільтрації входять такі кроки:

1. За потребою, перетворити аналоговий сигнал у цифровий, з використанням АЦП;

2. Підібрати тип фільтра, осовуючись на потребах у зміні певних частотних діапазонів;
3. Визначитись із коефіцієнтами, опираючись на вибраний тип фільтра;
4. Застосовуючи КІХ або НІХ обчислити вихідний сигнал;
5. Отримання значень відфільтрованого сигналу;

До різновидів цифрових фільтрів належать кінцево-імпульсні фільтри, нескінченно-імпульсні фільтри та адаптивні фільтри. Адаптивні фільтри відрізняються адаптацією коефіцієнтів при обробці сигналів. Ці фільтри призначені для покращення якості сигналу та створення модель системи.

Плюси використання цифровий фільтрів:

- Цифрові фільтри, навідміну від інших не мають впливу шумів, тому можуть якісніше фільтрувати сигнали.
- Не вимагають багато робити із налаштуванням та є більш гнучкими для фільтрації.
- Мають перевагу у обробці складніших сигналів, порівнянно з аналоговими методами.

Мінуси використання:

- Вони можуть вимагати додаткових обчислень, що може затримувати процес;
- Для обробки потрібно більше ресурсів;

3. Система in-situ нагріву тонко плівкових зразків

3.1. Основні проектні рішення

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблений програмно-апаратний комплекс для прецизійного нагріву нанорозмірних плівкових зразків до необхідної температури. Використані інженерні рішення дозволяють проводити термічну обробку зразків безпосередньо колоні просвітлювального електронного мікроскопу (ПЕМ). На рисунку 3.1 наведено фотографію тримача зразків для ПЕМ з інтегрованою системою нагріву:



Рис.3.1. Нагрівальний столик тримача

Розроблена система складається з апаратної та програмної частин. До апаратної частини відноситься блок живлення на базі керуючого мікроконтролера (включно із програмою мікроконтролера). До програмної частини відноситься застосунок для ПК.

3.2. Апаратна та програмна частини

Апаратна частина являє собою спеціалізований інтелектуальний блок живлення, завданням якого є нагрів зразків за заздалегідь заданим алгоритм. Цифрова частина блоку живлення виконана на базі мікроконтролера stm32f407vgt6. Електронна схема логічної частини блока живлення наведена на рисунку 3.2.

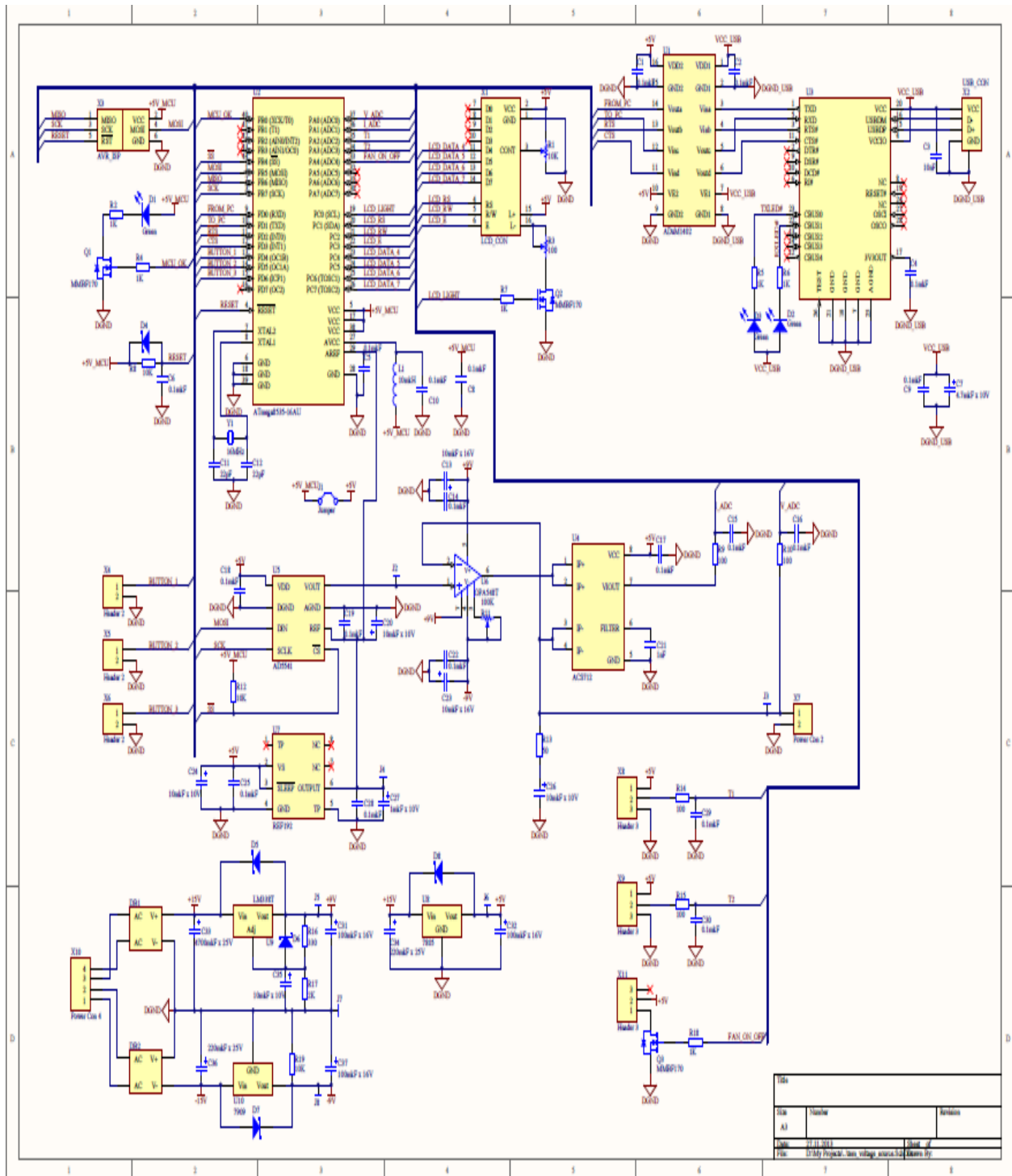


Рис. 3.2. Електронна схема мікроконтролерної частини блоку живлення

Програма мікроконтролера має пошарову архітектуру:

- BSP (board specific package)
- HAL (ST HAL library)
- Device (рівень абстракції, на якому за рахунок HAL рівня відбувається комунікація та управління периферичними пристроями як вбудованими мікроконтролер, так і під'єднаними до нього ззовні)
- Driver (рівень абстракції, на якому із використанням Device шару реалізована логіка, яку безпосередньо використовує шар Business logic)
- Business logic (рівень абстракції, на якому реалізована логіка роботи виробу, згідно із вимогами до нього)

Програма мікроконтролера написана мовою С у середовищі STM32CubeIDE (рисунк 3.3).

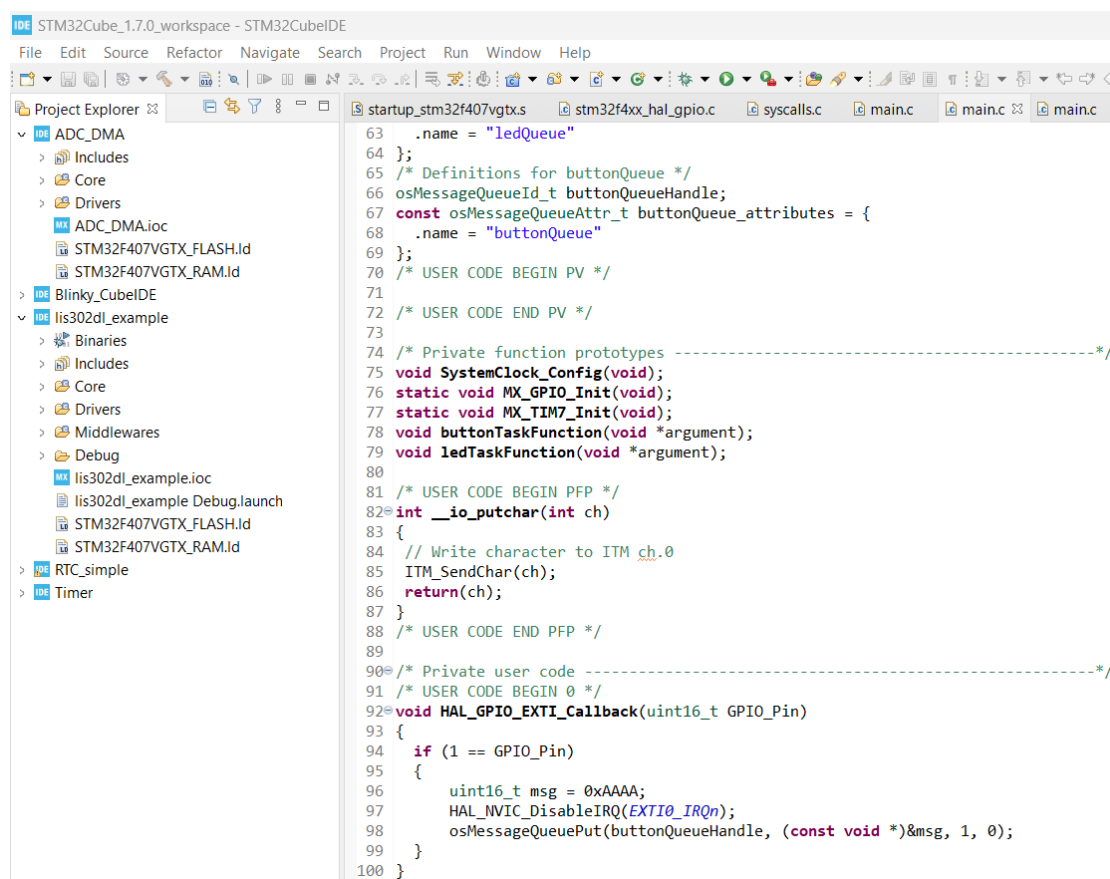


Рис. 3.3. Типовий інтерфейс середовища розробки програми мікроконтролера

3.3. Апробація розробленої системи

Розроблений програмно-апаратний комплекс пройшов успішну апробацію ході фізичного експерименту із дослідження морфологічних та фазових змін у нанорозмірних плівкових системах в ході їхньої термічної обробки. Експеримент проводився у міжфакультетській лабораторії тонких плівок. Типовий об'єкт фізичних досліджень зображений на рис. 3.4.

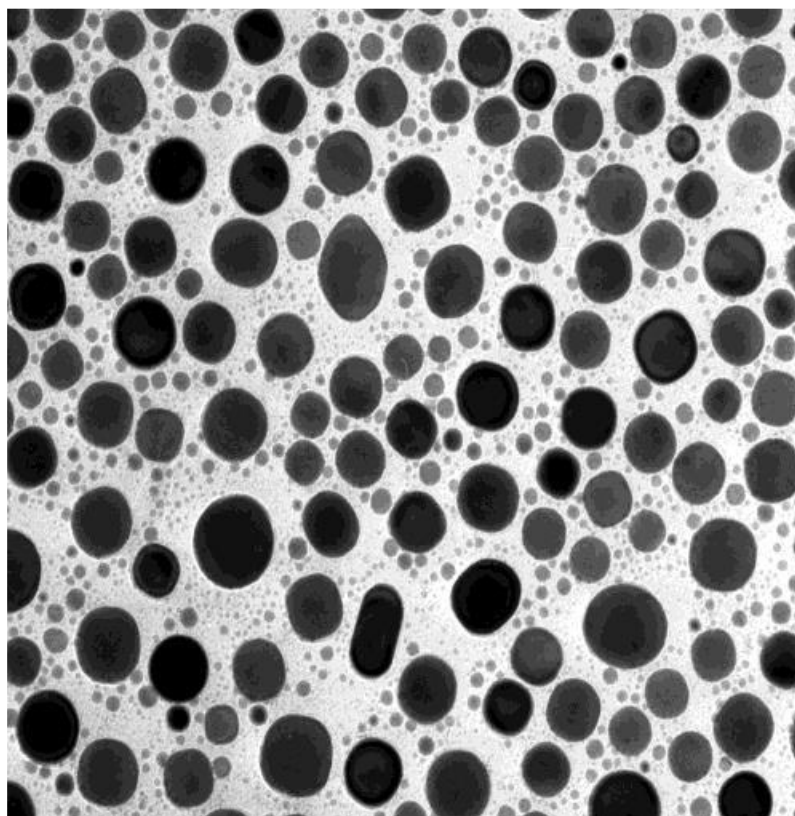


Рис. 3.4. Плівка олова товщиною 50 нм, розплавлена на аморфній вуглецевій підкладці

Розроблена система надає досліднику можливість безпосередньо спостерігати за динамікою процесів, що відбуваються у плівкових системах під час нагріву. Отримані результати не суперечать сучасним термодинамічним уявленням щодо розмірної залежності фізичних властивостей нанооб'єктів у фазових переходах першого роду.

Висновки:

1. В ході виконання кваліфікаційної роботи спроектований та виготовлений прототип програмно-апаратного комплексу для миттєвого нагріву тонкоплівкових зразків у інтервалі температур від кімнатної до 1000 °С з точністю $\pm 5^{\circ}\text{C}$ безпосередньо в колоні ПЕМ.
2. Для нагріву зразків розроблений інтелектуальний блок живлення на базі мікроконтролерної техніки.
3. Система пройшла успішну апробацію в ході фізичного експерименту.

Список літератури:

1. Що таке фільтр високих частот: робота та його застосування.
URL: <<https://uk.fmuser.net/content/?21023.html>>
2. Аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі.
URL:<<https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=32487&chapterid=530>>
3. Що таке смуговий фільтр: схема та її робота.
URL: <<https://uk.fmuser.net/content/?20972.html>>
4. Що таке смуговий фільтр. URL:< <https://ua.ahkcpower.com/news/what-is-band-stop-filter-68355234.html>>
5. Аналого цифровий перетворювач URL:<https://vue.gov.ua/Аналого-цифровий_перетворювач >
6. Мова програмування C.URL:< <https://vseosvita.ua/library/embed/0100dxjc-2ab7.docx.html> >
7. Загальні відомості про мікроконтролери. URL:<
https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/16%2C05/other/tema_10__mikrokontroleri.pdf>
8. Фільтр низьких частот URL: <<https://uk.fmuser.net/content/?6857.html>>
9. Цифрова фільтрація сигналів URL:
<https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp'yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t2/17..htm>
- 10.Сенько, В. І., Панасенко, М. В., Сенько, Є. В. та ін. Електроніка і мікросхемотехніка: у 4 т. Т. 2: Аналогові та імпульсні пристрої. Харків. (2002).
- 11.Прищеп, М. М., & Погребняк, В. П. Мікроелектроніка: в 3 ч. Ч. 2: Елементи мікросхемотехніки. Київ. (2006).
- 12.Крушевський, Ю. В., & Гаврілов, Д. В. «Основи радіоелектроніки. Частина 2». Вінниця: ВНТУ. (2008).

13. Barton, C., & Naylor, D. C «Programming for the Absolute Beginner. Thomson Course Technology». (2006).
14. Egerton, R. F. «Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM». (2016).
15. Pennycook, S. J., & Nellist, P. D. «Scanning Transmission Electron Microscopy: Imaging and Analysis. Springer». (2011).
16. Williams, D. B., & Carter, C. B. «Transmission Electron Microscopy».
17. Koch, C. C. «Nanostructured Materials: Processing, Properties, and Applications». William Andrew. (2006).
18. Egerton, R. F. Introduction to Electron Microscopy.
19. Smith, Steven W. «The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing».
20. Smith, Steven W. «Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists».
21. Lyons, Richard G. «Understanding Digital Signal Processing». (2004).
22. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. Discrete-Time Signal Processing. Pearson Education. (2010).
23. Antoniou, A. Digital Signal Processing: Signals, Systems, and Filters. McGraw-Hill. (2005).