

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

бакалавра

на тему: **Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для визначення дисперсного складу рідини оптичними методами**

Виконав: студент 4 курсу, групи МТ-4

Спеціальності: 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Содолевський І.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент кафедри ІВТ

кандидат технічних наук, доцент

Чепюк Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: _____

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій

д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу бакалавра

Студент _____ Содолевський І.О.

1. Тема роботи: Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для
визначення оптичного складу рідин оптичними методами

Керівник роботи: доцент кафедри ІВТ кандидат технічних наук, доцент
Чепюк Л.О.

затверджена наказом по університету від « 04 » квітня 2025 р. № 131/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 10 » червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи об'єкт досліджень – комп'ютеризована система ви-
мірювання оптичного складу рідин, параметр вимірювання – розмір
аналізованих частинок, діа-

пазон вимірювання розміру частинок 0,01 ... 3500 мкм, похибка точності
системи $\pm 1\%$

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)
огляд та аналіз методів вимірювання частоти електричних сигналів, розробка
структурної схеми, розробка принципової схеми, розробка алгоритму та
програми роботи системи, розрахунок метрологічних характеристик,
оцінка показників надійності роботи системи, безпека життєдіяльності
та охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень)

структурна схема, електрична принципова схема, перелік елементів, топологія друкованої плати, блок-схема алгоритму роботи системи

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Узгодження технічного завдання	25.02.25 – 15.03.25	Виконано
2	Огляд та аналіз методів вимірювання складу рідин	25.02.25 – 15.03.25	Виконано
3	Огляд існуючих технічних рішень	16.03.25 – 15.04.25	Виконано
4	Розробка структурної схеми	16.04.25 – 24.04.25	Виконано
5	Розробка електричної принципової схеми	25.04.25 – 09.05.25	Виконано
6	Розробка алгоритму та програми системи	10.05.25 – 24.05.25	Виконано
7	Розрахунок метрологічних характеристик	25.05.25 – 03.06.25	Виконано
8	Розрахунок надійності	04.06.25 – 15.06.25	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	03.06.25 – 17.06.25	Виконано

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Содолевський І.О.

(прізвище та ініціали)

Чепюк Л. О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У даній кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему для визначення оптичного складу рідин оптичними методами. Система забезпечує збір, обробку та аналіз оптичних даних, що дає змогу точно і оперативно визначати характеристики досліджуваних рідин. Реалізовано можливість візуалізації результатів вимірювань та подальшої їх інтерпретації для контролю якості та складу речовин, що робить систему придатною для застосування в лабораторних та виробничих умовах.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, оптична діагностика, емульсія, мікроконтроллер, розмірний спектр, оптичні методи

ABSTRACT

This thesis develops a computerized information and measurement system for determining the optical composition of liquids using optical methods. The system collects, processes, and analyzes optical data, enabling accurate and rapid determination of the characteristics of the liquids under study. The possibility of visualizing the measurement results and their further interpretation for quality control and composition of substances has been implemented, which makes the system suitable for use in laboratory and production conditions.

Keywords: information and measuring system, optical diagnostics, emulsion, microcontroller, size spectrum, optical methods

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота представлена пояснювальною запискою обсягом 96 сторінок формату А4. Записка містить вступ, основну частину, що складається з восьми розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Темою роботи є комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для визначення дисперсного складу рідини оптичними методами .

У першому розділі сформульовано основні завдання та вимоги до системи, зокрема: умови експлуатації, технічні характеристики, вимоги до надійності та конструктивного виконання.

Другий розділ містить огляд та аналіз методів вимірювання оптичного складу рідин

У третьому розділі наведено структурну схему комп'ютеризованої системи, описано функціональне призначення її основних складових та взаємозв'язки між ними.

Четвертий розділ містить розробку електричної принципової схеми.

П'ятий розділ містить опис оптичної та механічної частини пристрою, включно з побудовою оптичного каналу, розміщенням джерела випромінювання, приймального модуля та геометричними параметрами конструкції.

У шостому розділі описано алгоритмічне та програмне забезпечення, яке реалізує процес збору даних, цифрової обробки результатів та виведення інформації користувачу.

Сьомий розділ присвячено метрологічному аналізу, зокрема оцінці похибки вимірювання розміру частинок та визначенню класу точності розробленої системи.

У восьмому розділі проведено розрахунок надійності пристрою, побудовано графік імовірності безвідмовної роботи системи протягом визначеного часу.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1. Технічне завдання	9
1.1. Підстава для розробки, призначення та галузь застосування	9
1.2. Умови експлуатації.....	9
1.3. Вимоги до технічних характеристик.....	9
1.4. Вимоги до надійності.....	9
1.5. Вимоги до конструктивного оформлення	9
2. Огляд та аналіз методів вимірювання оптичного складу рідин	10
2.1.1 Оптична мікроскопія	10
2.1.2. Електронна мікроскопія	17
2.1.3. Просвічувальна електронна мікроскопія.....	18
2.1.4. Скануюча електронна мікроскопія.....	25
2.1.5. Скануюча зондова мікроскопія	28
2.1.6. Скануюча тунельна мікроскопія	31
2.1.7. Атомно-силова мікроскопія	32
2.2.1. Огляд літератури та аналоги досліджуваного пристрою.....	33
2.3.1. Висновки до розділу	40
3. Розробка структурної схеми.....	41
3.1.1. Опис інформаційно-вимірювальної системи.....	41
4. Розробка принципової схеми	44
4.1.1 Проектування автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи.....	44
4.2.1. Модуль камери	49
4.2.2. З'єднання модуля камери(паралельний інтерфейс)	52
4.3.1. Мікроконтролер STM32	53

					МІМТ.480. 013.012 – ПЗ					
Вим	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для визначення оптичного складу рідин оптичними методами Пояснювальна записка			Лім.	Лист	Листів
Розроб.		Содолевський І.О.								
Перевір.		Чепюк Л.О.							6	96
Реценз.								Державний університет «Житомирська політехніка», гр. МТ-4		
Н. Контр.		Чепюк Л.О.								
Затверд.		Подчашинський Ю								

5. Конструкторська частина	56
5.2.1. Гвинтові передачі лінійного переміщення оптичної системи....	57
5.2.2. Оптична система пристрою	58
6. Розробка алгоритму та програми роботи системи.....	60
6.1.1. Програмне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи	60
6.1.2. Опис програм і функцій керування роботою крокових двигунів для налагоджувальної плати	60
6.1.3. Функція Parser() для перетворення даних, що надходять від користувача на виконання.....	66
6.1.4. Функції переривань таймерів для керування частотою Спрацьовування крокових двигунів.....	67
6.1.5. Функції спрацьовування кінцевих вимикачів для повного зупинення крокових двигунів і реалізації процесу юстування	68
7. Розрахунок метрологічних характеристик	70
7.1 Розрахунок похибки струму лазера.....	70
7.2 Розрахунок похибки для крокового двигуна	71
8. Оцінка показників надійності роботи системи	75
9. Безпека життєдіяльності та охорона праці	79
ВИСНОВКИ.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
ДОДАТКИ	84

ВСТУП

У наш час науково-технічний прогрес характеризується щоденною розробкою нової техніки, прискорення якої значною мірою залежить від успіхів сучасної мікроелектроніки.

Контроль дисперсного складу рідин є важливою складовою в екологічному моніторингу, харчовій, хімічній та фармацевтичній промисловості. Для цього використовуються як традиційні фізико-хімічні методи, так і сучасні неруйнівні технології, що базуються на використанні електромагнітного випромінювання в оптичному та радіодіапазонах, а також ультразвукових хвиль.

Оптичні методи аналізу особливо ефективні для виявлення та оцінки розмірного складу частинок у дисперсних середовищах. Прикладом є застосування лазерних систем типу Malvern Mastersizer 3000, які дозволяють з високою точністю визначати параметри мікрочастинок у складних рідинних середовищах.

Такі вимірювання мають вирішальне значення для контролю якості, стабільності та безпеки рідин, у складі яких можуть міститися домішки або спеціальні функціональні добавки — стабілізатори, консерванти, флокулянти тощо.

Розробка комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем на основі оптичних методів відкриває нові можливості для автоматизованого аналізу дисперсного складу рідин у реальному часі з високою точністю та надійністю.

1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1. Підстава для розробки, призначення та галузь застосування

Підставою для розробки є завдання на дипломне проектування.

Система призначена для визначення оптичного складу рідин оптичними методами

Необхідно розробити структурну схему системи та обґрунтувати вибір елементної бази. Розробити електричну принципову схему оптико-електронної системи аналізу. Також передбачити створення програмно-алгоритмічного забезпечення для збору, обробки та візуалізації даних.

Початок розробки – лютий 2025 р. Кінець розробки – червень 2025 року.

1.2. Умови експлуатації

1.2.1. Температура зовнішнього середовища від 0 до +45 °С

1.2.2. Відносна вологість не більше 80%

1.2.3. Атмосферний тиск 600-800 мм. рт. ст.

1.2.4. Відсутність хімічно активних речовин у повітрі

1.2.5. Характер роботи: неперервний режим

1.3. Вимоги до технічних характеристик

1.3.1. Об'єкт досліджень – комп'ютеризована система аналізу рідин

1.3.2. Параметр вимірювання – розподіл частинок у рідині за розміром

1.3.3. Діапазон вимірювання частинок: 0.01... 1000 мкм

1.3.4. Похибка визначення розміру частинок: не більше $\pm 2\%$

1.3.5. Відображення результатів вимірювання – на екрані комп'ютера

1.3.6. Джерело живлення + 5 В постійного струму

1.4. Вимоги до надійності

Система є що відновлюється, не резервується, ремонтпридатною. Наробіток на відмову складає не менше 75000 годин.

1.5. Вимоги до конструктивного оформлення

Пристрій виконати на стандартній платі і в стандартному корпусі

2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНОГО СКЛАДУ РІДИН

2.1.1 Оптична мікроскопія

Оптичний або світловий мікроскоп являє собою оптичну систему з двома ступенями збільшення - об'єктивом і окуляром. Об'єктив являє собою перший ступінь збільшення.

Принципову схему мікроскопа наведено на рис. 2.1. Об'єкт освітлюється джерелом світла через оптичну систему колектор-конденсор. Конденсор являє собою короткофокусну лінзу або систему лінз, використовувану в оптичному приладі для висвітлення предмета, що розглядається або проектується. Конденсор збирає, підсилює і перетворює потік світла на пучок рівномірних паралельних променів у межах усієї площі конденсора, який розраховується для освітлення площі досліджуваного предмета. Конденсор спрямовує на предмет промені від джерела світла, зокрема й такі, які за його відсутності проходять крізь предмет. У результаті такого ущільнення світлового потоку різко зростає освітленість предмета. Об'єктив створює дійсне перевернуте і збільшене зображення об'єкта, яке розглядається через окуляр. Окуляр призначений для створення додаткового збільшення і створює уявне зображення

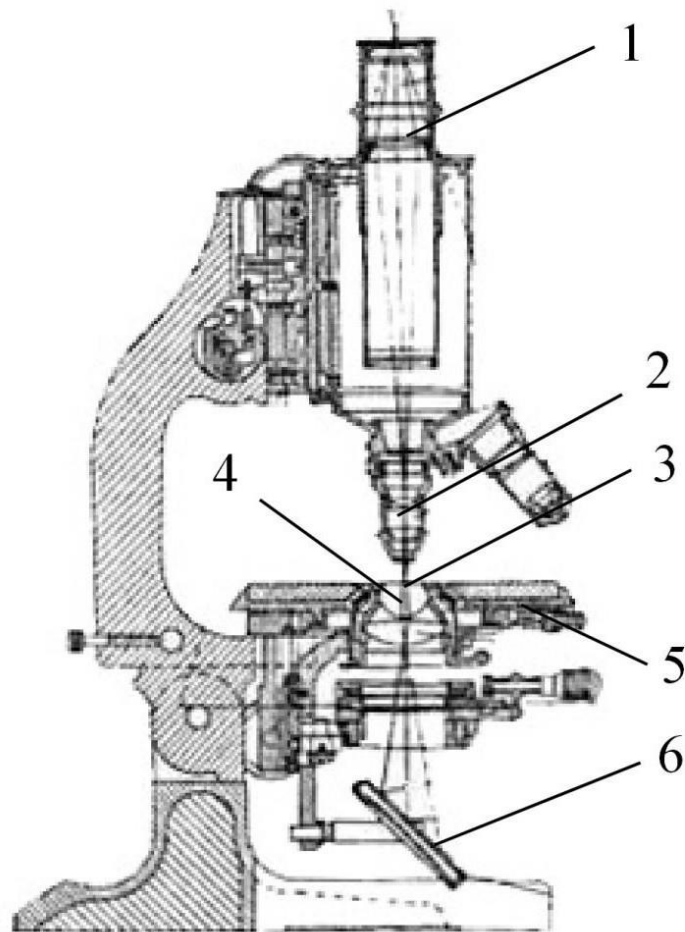


Рис. 2.1. Схематичне зображення оптичного мікроскопа: окуляр (1), об'єктив (2), досліджуваній об'єкт (3), конденсор (4), предметний столик (5), освітлювальне дзеркало (6)

Для спостереження частинок менших розмірів необхідно збільшити роздільну здатність мікроскопа. Це можливо здійснити двома способами: застосовуючи світло з меншою довжиною хвилі і збільшуючи апертуру об'єктива. Апертура являє собою діючий отвір оптичної системи, що визначається розмірами лінз або діафрагмами. Апертура визначається апертурним кутом і показником заломлення середовища між об'єктом і фронтальною лінзою об'єктива.

$$d_{\text{мкр}} = \frac{\lambda}{2A_c} = \frac{\lambda}{2n_D \sin \alpha},$$

де λ - довжина хвилі світла, A_c - чисельна апертура об'єктива, n_D - показник заломлення середовища, що заповнює простір між об'єктом і

фронтальною лінзою об'єктива, α - половина кута між двома крайніми променями.

Для збільшення апертури простір між лінзою об'єктива й об'єктом заповнюється імерсійною рідиною (рис. 2.2).

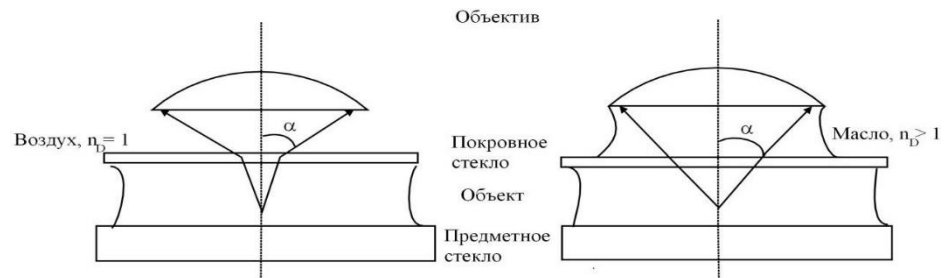


Рис. 2.2. Схема дії сухої та імерсійної систем.

Як імерсійну рідину застосовують кедрову олію, показник заломлення якої дорівнює показнику заломлення скла ($n_D = 1,52$), воду ($n_D = 1,33$), гліцерин ($n_D = 1,45$), бромнафталін ($n_D = 1,66$).

Оскільки показники заломлення імерсійних рідин більші за показник заломлення повітря ($n_D = 1$), то в такому разі до об'єктива потраплять промені, які становлять з віссю оптичної системи більший кут, ніж у випадку сухої системи.

Мінімальні розміри частинок, які можна спостерігати за білого світла для середньої довжини хвилі видимого діапазону ($\lambda = 550$ нм), становлять: для сухої системи - 0,28 мкм, за водної імерсії - 0,2 мкм і за масляної - 0,18 мкм.

Роздільну здатність мікроскопа можна також значно підвищити, застосовуючи для освітлення світло з коротшою довжиною хвилі. Для цього використовують світлофільтри з різним спектральним пропусканням (зелений $\lambda = 520$ нм, синій $\lambda = 455$ нм тощо). При використанні ультрафіолетового світла можна домогтися роздільної здатності до 0,1 мкм.

Залежно від оптичних властивостей об'єкта оптичної мікроскопії застосовуються різні методи освітлення [6]. Основною метою цього вибору є отримання найбільш контрастного зображення.

Метод світлого поля в світлі, що проходить, дає змогу отримувати рівномірно освітлене поле в площині зображення. При цьому світло з конденсора проходить через об'єкт і об'єктив. Зображення об'єкта стає видимим унаслідок часткового поглинання і відхилення окремими його елементами світла, що падає на них.

Метод світлого поля у відбитому світлі ґрунтується на освітленні об'єкта зверху через об'єктив, який одночасно виконує роль конденсора. Як різновид цього методу можна виділити метод косого освітлення. Відмінність між ними полягає в тому, що світло на об'єкт направляють під великим кутом. Такий спосіб освітлення надає зображенню об'єкта високу контрастність, а також іноді дає змогу оцінити рельєф досліджуваного зразка.

Метод темного поля у світлі, що проходить, дає можливість точно визначити лити контури розглянутих об'єктів, оскільки на темному тлі утворюються світлі зображення об'єкта. При використанні методу темного поля в прохідному світлі світло від освітлювача і дзеркала спрямовується на об'єкт конденсором спеціальної конструкції. Основна частина променів утворює пучок у вигляді порожнього конуса і не потрапляє в об'єктив. Зображення в об'єктиві формується за допомогою невеликої частини променів, що розсіяні частинками всередину конуса і пройшли в об'єктив.

Метод темного поля у відбитому світлі ґрунтується на висвітленні об'єкта зверху за допомогою спеціальної кільцевої системи, званої епіконденсором. У такому разі зображення утворюється тільки розсіяними променями, що мають слабку інтенсивність. Тому для освітлення об'єкта використовують яскраві джерела світла. У цьому разі зображення частинок має вигляд тіл, що яскраво світяться, на абсолютно темному тлі. На рис. 2.3

наведено зображення частинок $\text{MoO}_3\text{-nH}_{(2)}\text{O}$, отриманих методом світлого (а) і темного (б) поля.

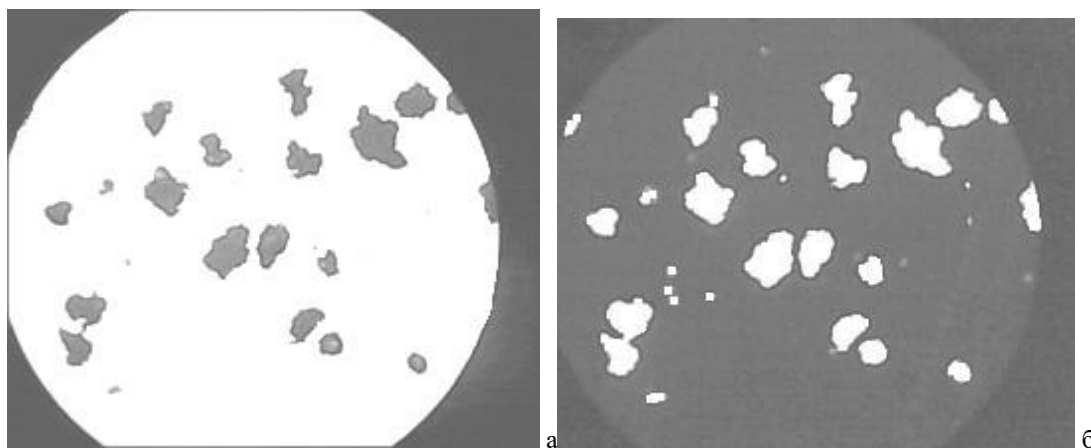


Рис. 2.3 Зображення частинок $\text{MoO}_3\text{-nH}_{(2)}\text{O}$, отриманих методом: світлого поля у світлі, що проходить (а), і темного поля у відбитому світлі (б).

Збільшення 900X

Метод дослідження в поляризованому світлі застосовують для вивчення об'єктів, елементи якого мають неоднакові оптичні властивості за різними напрямками. Використання поляризаційного світла дає можливість досліджувати структуру й оптичні властивості частинок.

Метод фазового контрасту ґрунтується на тому, що під час проходження через елементи об'єкта з різними показниками заломлення світлова хвиля зазнає змін, набуваючи так званого фазового рельєфу. Це значно збільшує контрастність зображення. Фазові зміни світлової хвилі перетворюються за допомогою спеціального пристрою на зміну амплітуди хвилі, що призводить до зміни інтенсивності світла, яка і сприймається спостерігачем.

Флюоресцентна мікроскопія дає змогу в об'єкті складного складу розглядати частинки різних речовин. Унаслідок освітлення об'єкта знизу або зверху синьо-фіолетовими або ультрафіолетовими променями збуджується флюоресценція об'єкта. При цьому речовина випускає видиме світло з характером, що характеризує характерним для нього спектральним складом, і спостерігач бачить зелено-жовте світіння об'єкта. Для отримання такого зображення в оптичну систему мікроскопа вводять два світлофільтри. Один

із них поміщають перед конденсором. Він пропускає від джерела світла випромінювання тільки тих довжин хвиль, які збуджують люмінесценцію самого об'єкта або барвника, яким обробляють об'єкт. Другий світлофільтр, встановлений після об'єктива, пропускає до ока спостерігача тільки світло люмінесценції.

Різноманітність методів мікроскопії зумовила розроблення як спеціально призначених для дослідження того чи іншого методу мікроскопів, так і приладів універсального призначення.

Мікроскопи заведено класифікувати: за призначенням - біологічні, металографічні, мікроскопи порівняння тощо; за методом - мікроскопи світлового світла, що проходить або відбитого світла, поляризаційні, люмінесцентні, ультрафіолетові тощо; за ступенем універсальності та складності конструкцій - універсальні, дослідницькі, робочі, лабораторні, спрощені.

Приготування препаратів. Для мікроскопічного аналізу можна використовувати емульсії або суспензії порошків.

У разі використання олій або гліцерину як дисперсійного середовища для приготування суспензії невелику кількість порошку (на кінчику шпателя) вносять у краплю рідини, вміщену на предметне скло, і суміш ретельно перетирають, потім накривають покривним склом. Скло має бути попередньо ретельно вимите хромовою сумішшю.

Якщо як дисперсійне середовище використовують воду, то наважку порошку перетирають у ступці з невеликою кількістю води, після чого суміш переносять у циліндр і розбавляють водою з розрахунку отримання ~0,5 мас. %-ної суспензії. Для запобігання агрегації частинок до суспензії додають кілька крапель рідкого скла або розчину дифосфату натрію $\text{Na}_{(4)}\text{P}_{(2)}\text{O}_7$. Одну-дві краплі емульсії або суспензії наносять на предметне скло і накривають покривним склом. Для закріплення частинок можливе застосування

плівкоутворювального швидковисихаючого 4 % розчину колодію в амілацетаті.

Під час аналізу високодисперсних частинок у водному середовищі слід збільшити в'язкість дисперсійного середовища, для чого одну-дві краплі приготовленої водної емульсії (суспензії) вносять під час перемішування в 1 мл нагрітого розчину желатини (3 г желатини на 1 л води).

Із проби для випробувань готують два препарати і порівнюють їх під мікроскопом. Якщо вони збігаються, то вимірювання проводять на одному з них. Вважають, що приготовані препарати збігаються, якщо в полі зору, обмеженому полем основного прямокутника або кола, перебувають від 6 до 30 частинок.

Методика мікроскопічного аналізу. Для аналізу використовують оптичний мікроскоп будь-якого типу, призначений для лабораторних досліджень, в окуляр якого вставляють мікрометричну сітку. Шкала мікрометричної сітки розбиває поле зору мікроскопа на 100 квадратів, сторона кожного з яких становить 5 поділок сітки (мал. 10). Ціна поділки сітки залежить від кратності збільшення окуляра й об'єктива і визначається за допомогою окуляр-мікрометра. Предметне скло зі зразком емульсії або порошку поміщають під об'єктив мікроскопа і, переміщаючи тубус мікроскопа по вертикалі, домагаються найкращої різкості зображення частинок.

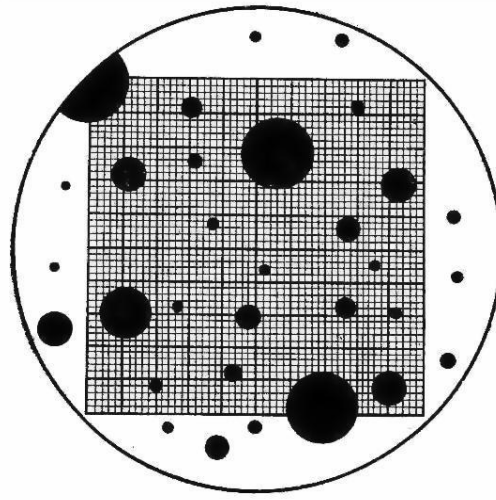


Рис. 2.4. Препарат у полі зору окуляра мікроскопа з мікрометричною сіткою

Щоб отримати найкраще для підрахунку частинок збільшення, розглядають зразок із різними окулярами і вибирають такий, щоб у межах мікрометричної сітки перебувало не більше ніж 30-40 і не менше ніж 15 частинок.

2.1.2 Електронна мікроскопія

Перші електронні мікроскопи з'явилися в 30-40-х роках XX століття в Європі. Однак широке застосування цих приладів для наукових досліджень почалося через 30 років, коли вони досягли значної технічної досконалості.

Наразі на базі електронних мікроскопів створюють аналітичні комплекси, що дають змогу визначити не тільки розмір і форму частинок, а й елементний або фазовий склад, оцінити міжплощинну відстань, виявити дефекти кристалічної решітки та багато іншого. Ці можливості досягаються завдяки під'єднанню до електронного мікроскопа додаткових блоків, як-от: спектрометр характеристичних втрат енергії електронів (СХПЕЕ або EELS), енергодисперсійний рентгенівський спектрометр (ЕРС або EDS), електронна дифракція (ЕД або ED), електронна голографія та ін. У табл. 4 наведено аналітичні методи та одержувану за їх допомогою інформацію.

Аналітичні методи	Отримана інформація
Спектроскопія характеристичних втрат енергії електронів	Електронна структура, склад, товщина зразка
Рентгенівська енергодисперсійна спектроскопія	Склад, домішки, товщина зразка
Електронна мікроскопія високої роздільної здатності	Розташування атомів, дефекти кристалічної решітки, морфологія поверхні
Електронна дифракція	Кристалічна структура, кристалічна структура, кристалічна орієнтація, товщина зразка, товщина зразка
Лоренцева електронна мікроскопія	Магнітна структура
Електронна голографія	Магнітна структура, внутрішній потенціал
Скануюча (растрова) електронна мікроскопія	Морфологія поверхні
Метод Z-контрасту	Склад, розташування атомів

Таблиця 2.1 - Аналітичні методи в електронній мікроскопії та одержувана з їхньою допомогою інформація

Електронні мікроскопи існують двох типів: просвічувальний електронний мікроскоп (ПЕМ, або TEM) і скануючий (растровий) електронний мікроскоп (СЕМ, або SEM).

2.1.3 Просвічувальна електронна мікроскопія

Робота просвічувального електронного мікроскопа базується на хвильовій природі електрона. Подібно до заломлення і фокусування світла оптичною лінзою електронний пучок можна відхилити і фокусувати магнітним або електричним полем. Схематичне зображення принципу роботи електронного мікроскопа представлено на рис. 11.

Зображення формується за рахунок проходження пучка електронів через аналізований зразок. При цьому використовуються швидкі електрони, для отримання яких застосовують прискорювальну напругу близько 100-200 кВт. На рис. 12 наведено схему просвічувального електронного мікроскопа із зазначенням його основних складових частин.

Електронний пучок випускається електронною гарматою, встановленою у верхній частині колони просвічувального електронного мікроскопа. Усередині колони шляхом відкачування повітря підтримується високий вакуум. Характеристики електронного пучка (діаметр, розкид електронів за енергією) залежать від типу електронної гармати. За типом емісії розрізняють два види електронних гармат: гармата з термоелектронною емісією і гармата з польовою емісією.

Тривалий час в електронних мікроскопах використовували гармату з термоелектронним типом емісії, оснащену емітером на основі вольфрамової нитки розжарювання. Останнім часом частіше застосовують монокристалічні катоди з гексабориду лантану, які порівняно з вольфрамовою ниткою мають більшу яскравість.

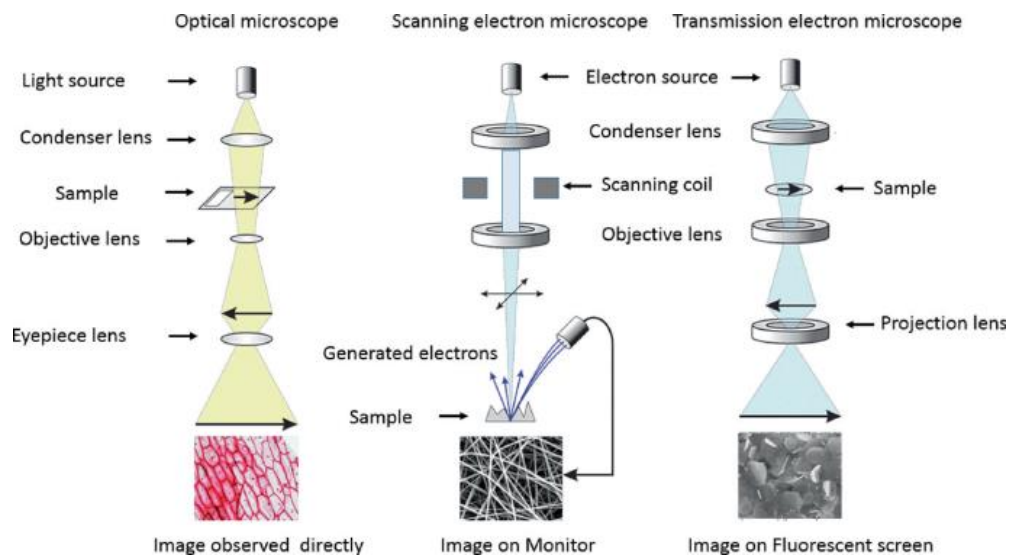


Рис. 2.5 Принцип роботи оптичного мікроскопа, електронного мікроскопа з електростатичним фокусуванням та електронного мікроскопа з магнітним фокусування).

Гармати з польовою емісією генерують електрони високої яскравості та когерентності, що дає змогу проводити дослідження методом електронної

голографії. Ці типи електронних гармат трапляються менш часто через складне технічне обслуговування і досить високу вартість.

Електрони, що випускаються гарматою, прискорюються в трубці прискорювача за напрямком до апертурної діафрагми. Потім пучок проходить через електромагнітні лінзи освітлювача і потрапляє на зразок.

Зразок розташовується на прозорій для електронів підкладці. Пучок електронів послаблюється за рахунок розсіювання або поглинання різними частинами зразка пропорційно локальній густині, що, своєю чергою, залежить від товщини і складу об'єкта. Після проходження через зразок електронів в об'єктивній лінзовій системі формується зображення.

Формуюча лінзова система складається з об'єктивної лінзи, що збільшує зображення в 10-200 разів, і проєкційної лінзи, яка дає додаткове збільшення від 50 до 400 разів. Іноді трапляються конструкції мікроскопів із додатковими проміжними лінзами.

Отримане в результаті зображення, що формується на флуоресцентному екрані, можна спостерігати через вікно камери спостереження, телевізійну камеру або екран ПК, можна записати на фотопластину, фотоплівку. Загальне збільшення в просвічувальному електронному мікроскопі становить від 100 до 1500000, що дає змогу досліджувати частинки розміром до 1 нм.

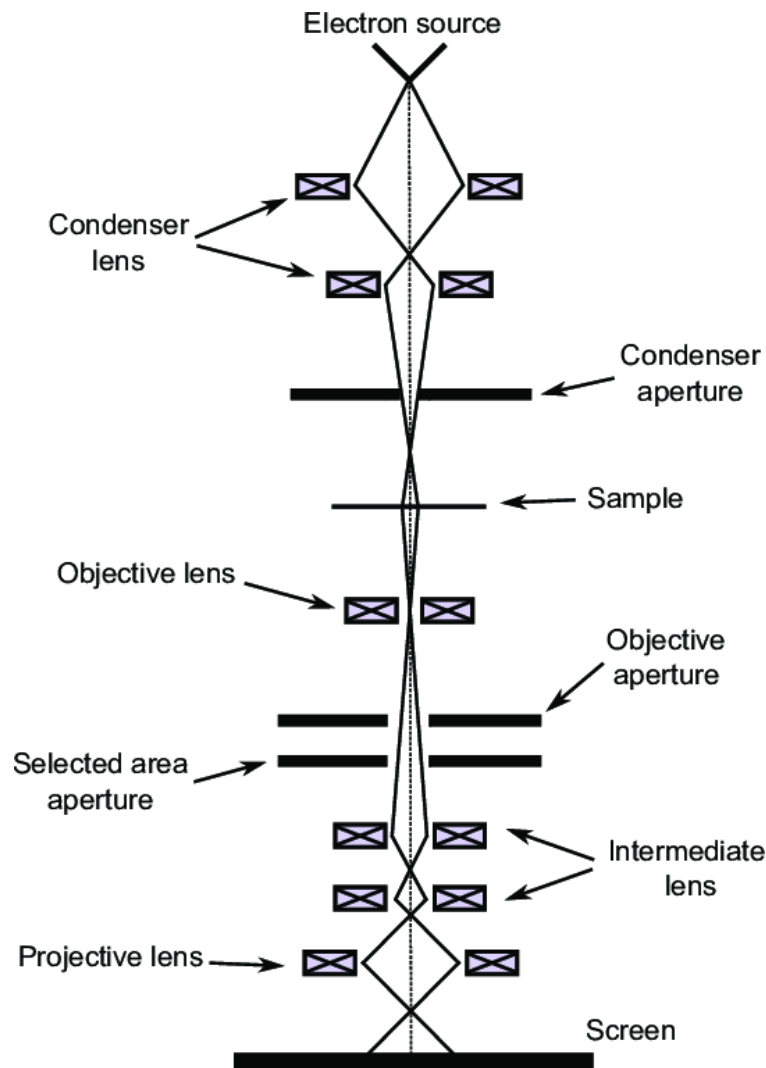


Рис. 2.6. Схема просвічувального електронного мікроскопа

Існує просвічувальна електронна мікроскопія високої роздільної здатності (ПЕМВР, або HRTEM), що дає змогу не тільки оцінити розміри та форму частинок, а й також виявити особливості мікроструктури зразка (наявність мікродфектів, кордонів сполучення кількох фаз, визначити міжплощинну відстань). Зображення, що отримується за допомогою просвічувального електронного мікроскопа, є двовимірним представленням реальної структури. Можливі два режими зйомки зразків: світлопольне і темно-польне зображення.

Світлопольне зображення відображає морфологію досліджуваного зразка і формується центральним пучком електронів, що пройшли. Цей вид зйомки найчастіше використовують для визначення форми та розміру частинок.

Темнопольне зображення формується не центральним пучком, а одним або кількома дифракційними пучками. На зображенні з'являються світлові області, які розсіюють електрони в даному дифракційному напрямку. Зазвичай таку роздільну здатність і використовують для якісного аналізу закристалізованих областей. На рис. 13 наведено мікрофотографії частинок WO_3 , отриманих у режимах світлого і темного полів.

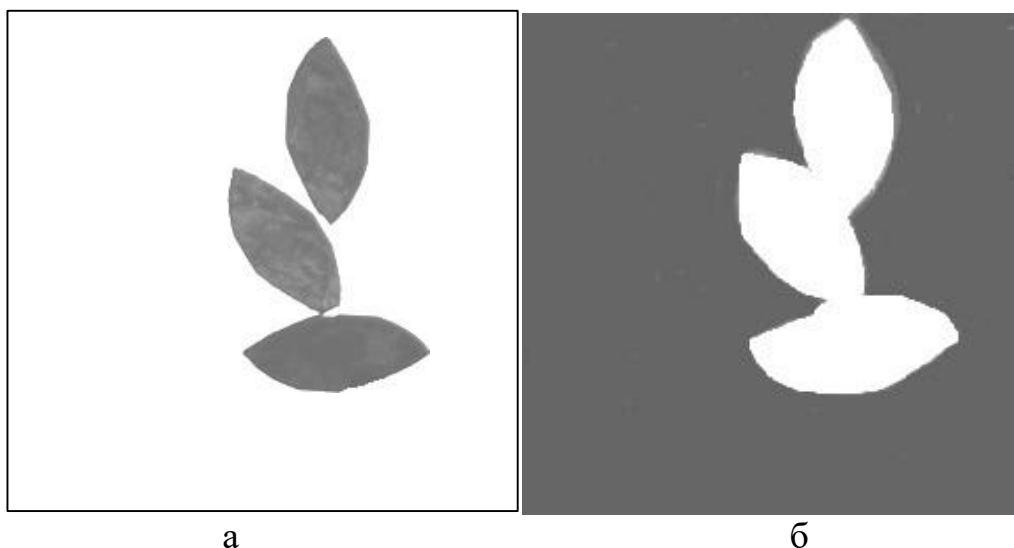


Рис. 2.7. Мікрофотографії частинок WO_3 , отриманих за допомогою просвічувального електронного мікроскопа в режимі світлого (а) і темного (б) полів

Серед методів, які досить часто використовують під час дослідження зразків, слід зазначити електронну дифракцію. Цей метод служить для отримання кристалографічної інформації про матеріал.

При фокусуванні електронів можливе отримання дифракційної картини досліджуваного об'єкта - електронограми. Залежно від розміру кристалітів на електронограмі можна спостерігати кільцеві лінії або точкові рефлекси. Вимірюючи відстані до рефлексів, можна розрахувати міжплощинні відстані та визначити тип кристалічної решітки досліджуваного об'єкта.

Незважаючи на наявність деяких труднощів під час аналізу частинок золів, основними з яких є проблема підготовки зразка, цей метод наразі є найбільш інформативним.

Підготовка зразка. Основні складнощі при аналізі частинок виникають при підготовці зразка. Досліджувану систему, як правило, наносять на сітку, вкриту полімерною плівкою, висушують і поміщають тримачем у вакуумна камеру мікроскопа (4-10 мм рт. ст.). Для отримання достовірних результатів необхідно, щоб під час вакуумування і бомбардування електронами досліджуваний зразок не зазнавав жодних структурних змін. Проблем, пов'язаних з електростатичним зарядом, плавленням, випаровуванням і розкладанням зразка під дією електронного пучка, іноді вдається уникнути, використовуючи методики для дослідження біологічних об'єктів.

При дослідженні частинок золів необхідно підібрати концентрацію дисперсної фази, за якої на отриманих знімках буде можливо аналізувати первинні частинки, а не агрегати. Концентрація золів для аналізу кожної системи підбирається експериментально і зазвичай не повинна перевищувати 0,05-0,10 мас. %.

На рис. 15 подано фотографії частинок золів із неправильно подобними концентраціями. На рис. 15,а концентрація частинок настільки висока що неможливо чітко розділити межі первинних частинок. На рис. 15,б у полі зору присутня лише одна частинка, що є недостатнім для статистичного опрацювання даних

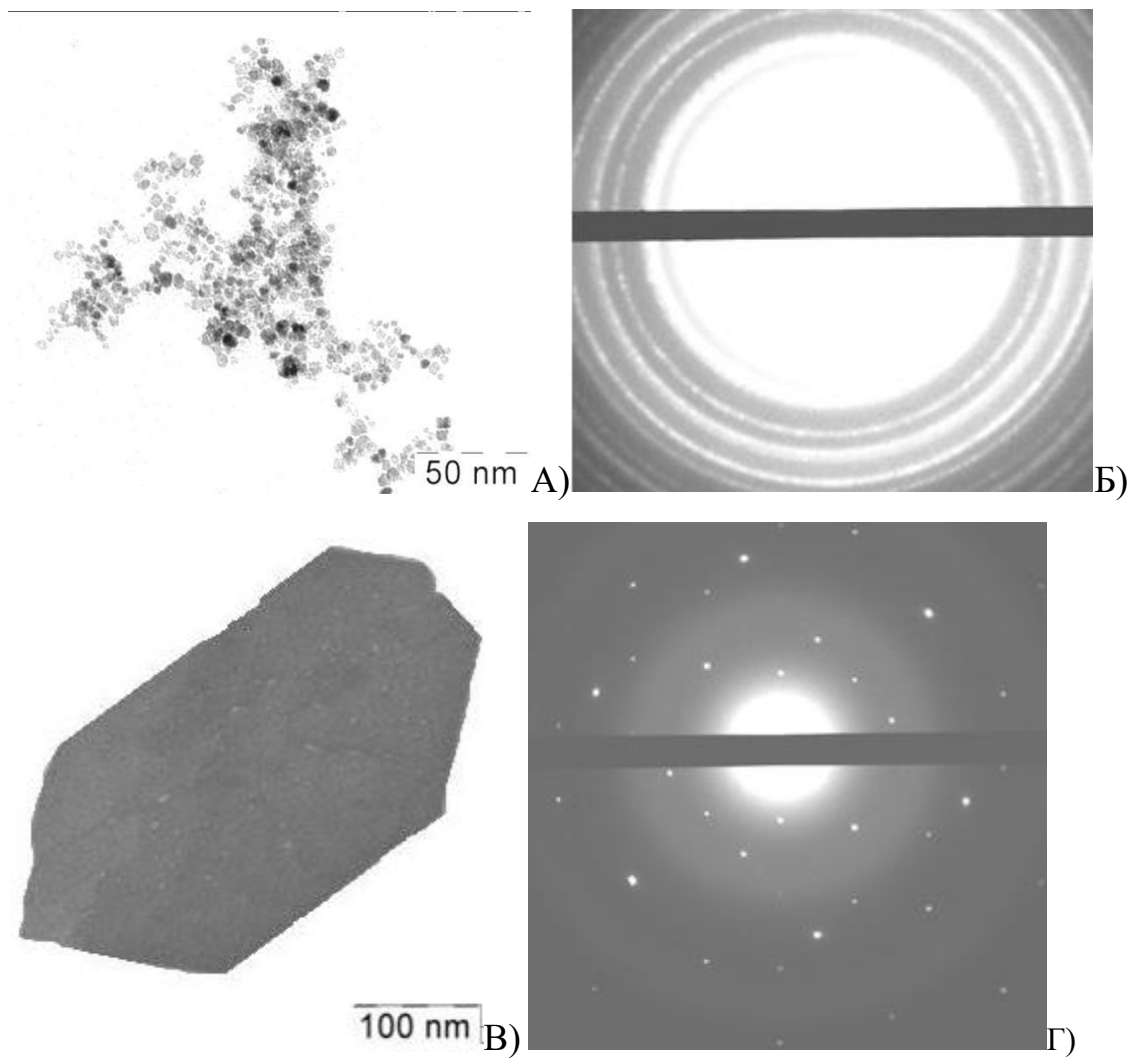


Рис. 2.8. Мікрофотографії та електронограми частинок $\text{CeO}_{(2)}$ (а, б) і CuO (в, г)

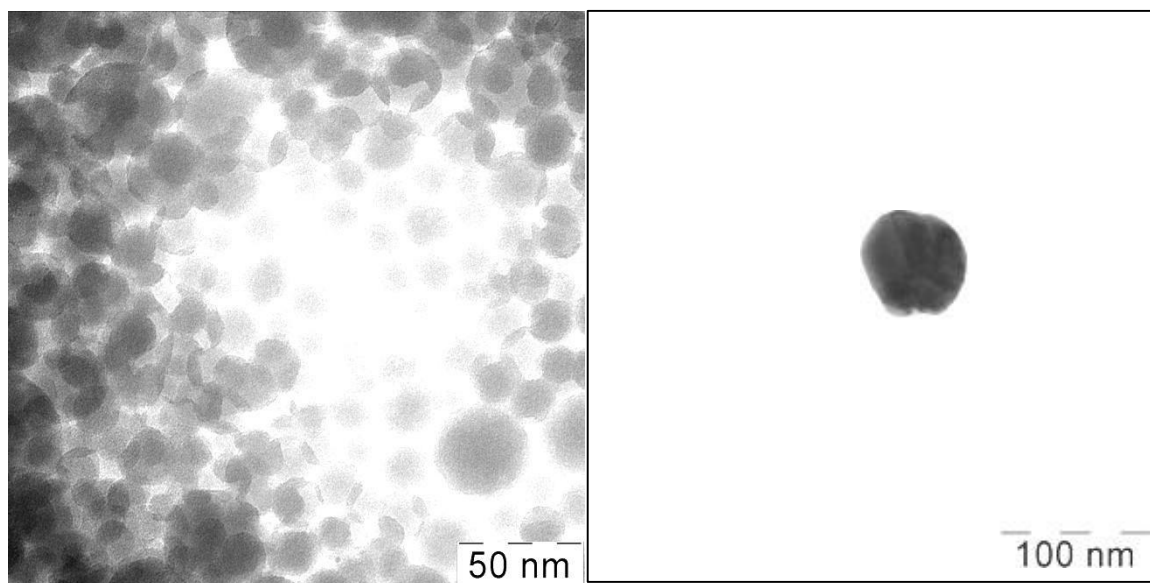


Рис. 2.9. Мікрофотографії частинок золів SiO_2 різною концентрацією дисперсної фази

Ще однією важливою умовою отримання якісних результатів є знепилювання зразків, яке можна провести, використовуючи відповідні фільтри.

У тому випадку, коли необхідно провести аналіз порошкоподібних матеріалів, досліджуваний порошок поміщають у рідину (вода, органічні розчини) для утворення суспензії та диспергують шляхом впливу ультразвукових хвиль або звичайним перемішуванням.

При аналізі композиційних матеріалів, сплавів, нанесених матеріалів необхідно підготувати тонку плівку досліджуваного матеріалу. Спочатку масивний зразок розрізають на тонкі пластинки завтовшки близько 0,3 мм за допомогою прецизійного відрізного пристрою або багатодротяної пилки. Потім отриману плівку стоншують або механічно (електрополіруванням, ультрамікротомією), або хімічно (хімічним травленням)

2.1.4 Скануюча електронна мікроскопія

На відміну від просвічувальної скануюча електронна мікроскопія дає змогу отримати тривимірне зображення досліджуваного об'єкта. У скануючому електронному мікроскопі сфокусований пучок електронів відхиляється магнітною системою від поверхні зразка, що розташована під кутом до пучка.

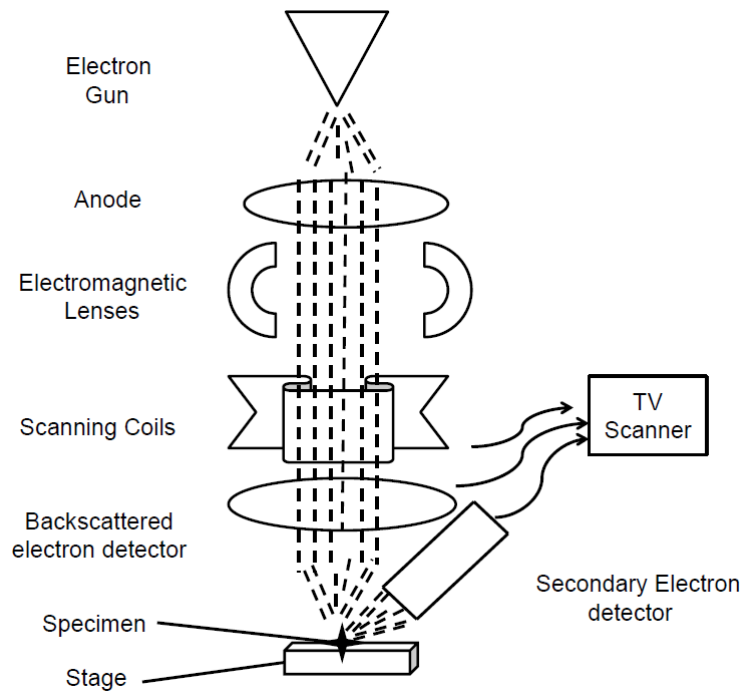


Рис. 2.10. Принципова схема роботи скануючого електронного мікроскопа

При цьому реєструються вторинні електрони низької енергії ($E < 50$ eV), що виникають у результаті взаємодії скануючого пучка з поверхнею твердого тіла. Вони рухаються у напрямку до колекторної решітки і потрапляють у чутливий детектор. Сигнал від цього детектора використовується для модуляції інтенсивності електронного променя електронно-променевої трубки. Цей промінь сканує поверхню трубки синхронно зі скануванням зразка первинним електронним променем. Результатом є реконструйоване зображення на екрані електронно-променевої трубки, подібне до телевізійного зображення.

Вторинні електрони мають дуже малу енергію, тому вони здатні виходити з поверхневих ділянок із глибиною порядку 1-10 нм. Така властивість дає змогу якісно характеризувати досліджувану поверхню зразка з отриманням при цьому об'ємних зображень. Однак слід зазначити, що роздільна здатність скануючого електронного мікроскопа дещо нижча, ніж просвічувального.

Для аналізу композиційних частинок або нанесених матеріалів (каталізаторів, плівок і покриттів) зйомка зразків можлива в режимі фазового

контрасту, коли реєструються не вторинні, а відбиті електрони. У такому режимі зйомки матеріали, що мають різний хімічний склад, відрізнятимуться за контрастом. Ділянки з високим атомним номером будуть більш яскравими. На рис. 17 наведено фотографії нанесених каталізаторів $\text{MoO}_3/\text{Al}_{(2)}\text{O}_3$, отриманих у звичайному режимі (реєстрація вторинних електронів) і в режимі фазового контрасту (реєстрація відбитих електронів).

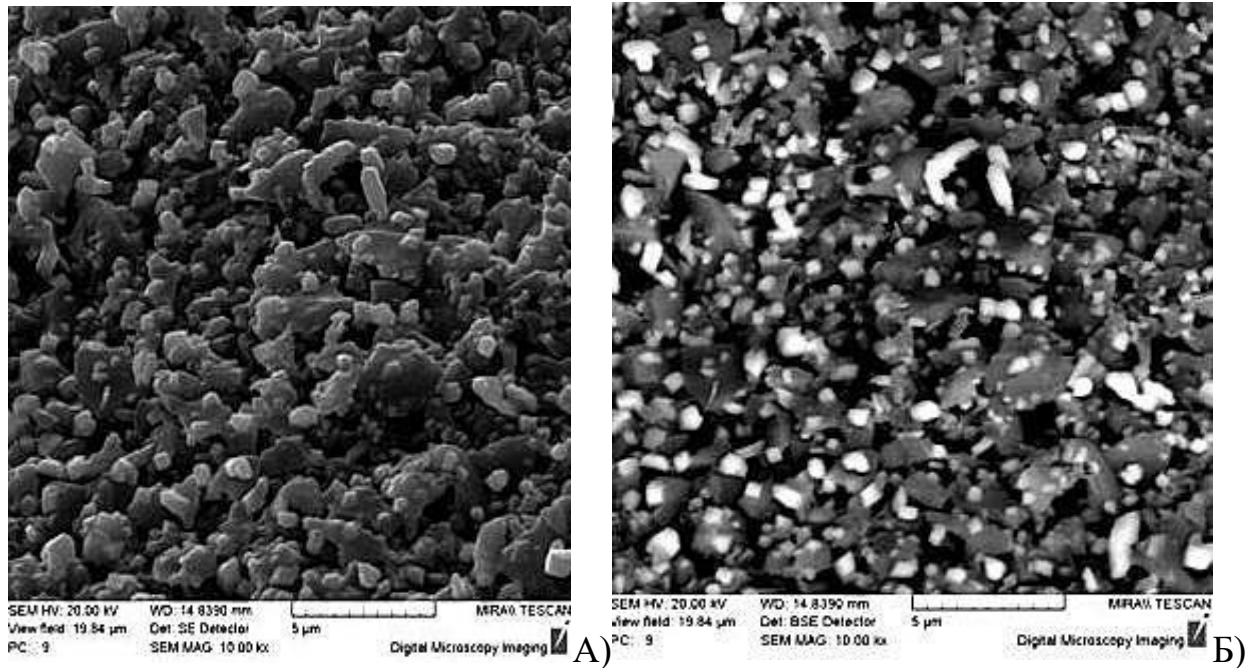


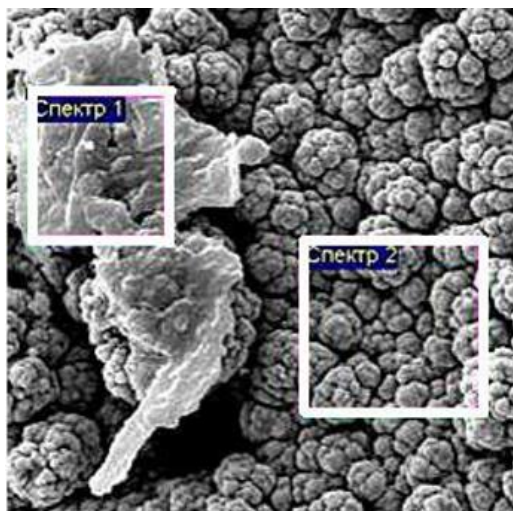
Рис. 2.11. Мікрофотографії нанесеного каталізатора $\text{MoO}_3/\text{Al}_{(2)}\text{O}_3$, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа у звичайному режимі (а) і режимі фазового контрасту (б)

Як видно з представлених фотографій, у звичайному режимі можна спостерігати тільки рельєф поверхні каталізатора, в той час як під час зйомки в режимі фазового контрасту на фотографії чітко видно світлі області - нанесений матеріал, що дає змогу визначити розміри і розподіл нанесеного матеріалу - каталізатора.

Як і у випадку ПЕМ, у СЕМ можливе приєднання додаткових аналітичних блоків, найпоширенішим з яких є аналізатор енергії рентгенівських променів. Цей метод аналізу дає змогу проводити елементний аналіз у досліджуваному зразку.

Цей аналіз можна проводити як точково в певній точці на поверхні, так і за заданим напрямком. Результатом такого аналізу може бути відсотковий вміст елементів (див. рис. 18), що містяться в матеріалі, або розподіл елемента за перерізом матеріалу.

Підготовка зразка. Для отримання інформації про розмір і форму частинок також необхідно провести ретельну підготовку зразка. Аналізу піддаються тільки порошкоподібні, монолітні або нанесені матеріали. Досліджуваний порошок поміщають на предметний столик. У разі, якщо зразок не є провідником, на нього напилюють тонке покриття провідного матеріалу (Au, Pt, Pd тощо). Потім столик із підготовленим зразком поміщають у камеру мікроскопа і піддають вакуумуванню



Спектр	C	O	Cr	Mo
Спектр 1	58.16	16.77	1.05	24.02
Спектр 2	32.07	12.74	1.99	53.2

Рис. 2.12. Мікрофотографія та результати енергодисперсійного аналізу зразка

Незважаючи на високу роздільну здатність, при зйомці дуже малих об'єктів і за відсутності на них дефектів нерідко виникає проблема чіткого фокусування. Тому цей метод застосовний для аналізу частинок розміром від 20 нм.

2.1.5 Скануюча зондова мікроскопія

Скануюча зондова мікроскопія зародилася на початку 80-х років ХХ століття. В основі цього методу лежить дослідження рельєфу поверхні зразка за допомогою механічного зонда. Розмір вістря зонда становить близько 10 нм. Відстань між зондом і досліджуваною поверхнею варіюється в межах від

0,1 до 10 нм. В основі роботи зондових мікроскопів лежать різні типи взаємодії зонда з поверхнею. Залежно від типу скануючого зондового мікроскопа контролюються різні характеристики контакту: тунельний або електричний струм між вістрям і поверхнею (скануюча тунельна мікроскопія), механічна взаємодія (атомно-силова мікроскопія), магнітна взаємодія (магнітно-силова мікроскопія) тощо.

На рис. 19 представлено принципову схему роботи силового мікроскопа

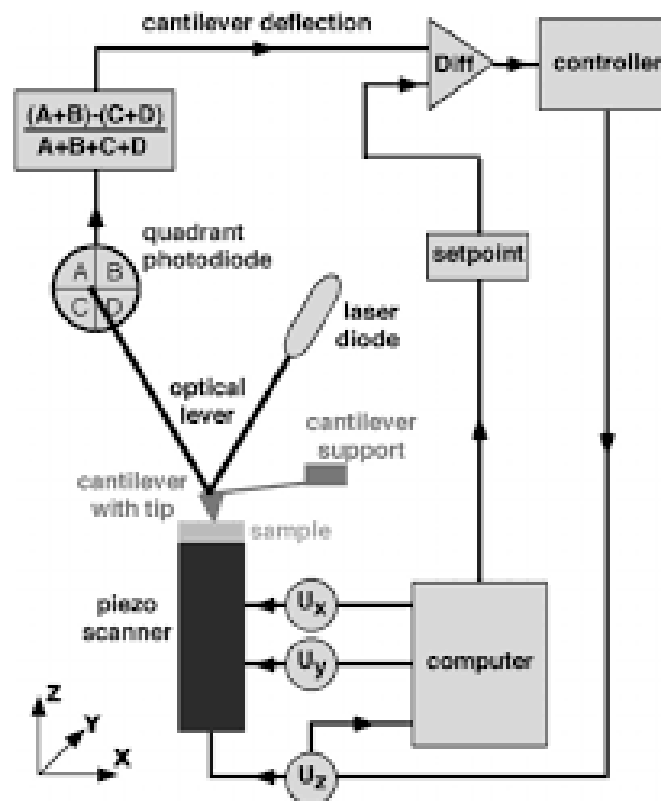


Рис. 2.13. Схема роботи силового мікроскопа

Для роботи зондових мікроскопів необхідно контролювати робочу відстань зонд-зразок і здійснювати переміщення зонда в площині зразка з високою точністю. Це завдання вирішують за допомогою спеціальних маніпуляторів - скануючих елементів (сканерів). Скануючі елементи зондових мікроскопів виготовляють із п'єзоелектриків, які здійснюють сканування в площині XY , а система зворотного зв'язку є основною для побудови тривимірного зображення поверхні (див. рис. 20).

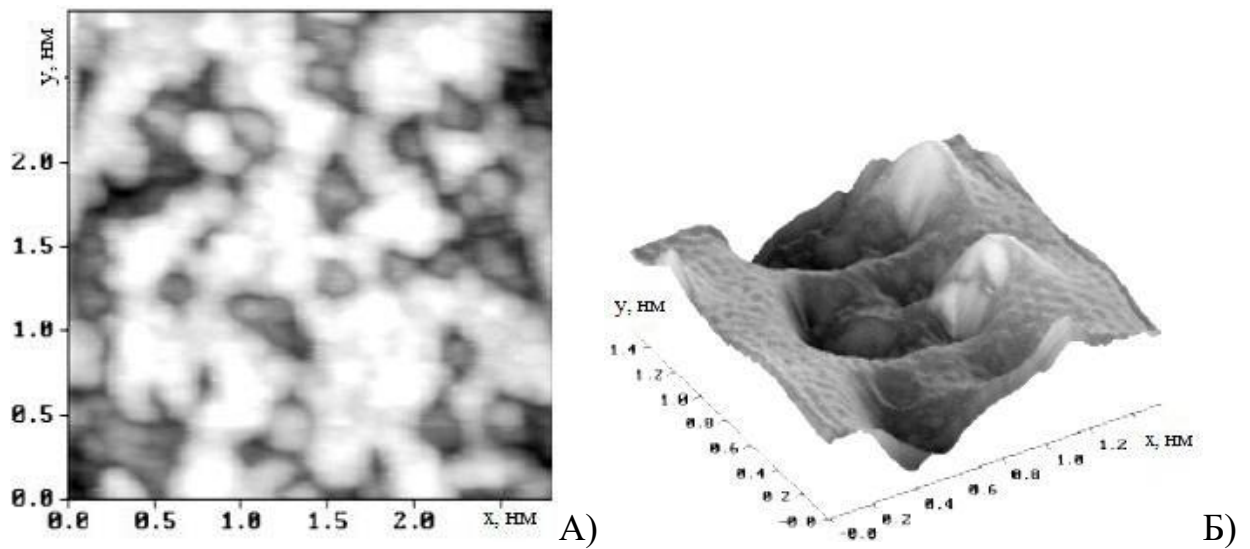


Рис. 2.14. Двох- (а) і тривимірні (б) зображення досліджуваного зразка, отримані за допомогою СЗМ

Існують різні режими сканування зондового мікроскопа. Вони залежать від природи реєстрованих сил і відстані від кінчика голки до поверхні зразка. Можливі три варіанти роботи скануючого зондового мікроскопа: контактний, безперервно-контактний і безконтактний

При контактному режимі роботи мікроскопа контролюється сила відштовхування між зразком і кінчиком голки. Для жорстких матеріалів сила відштовхування визначається топографією зразка.

Безконтактний і переривчасто-контактний режими роботи запобігають механічній взаємодії голки та зразка, а метод силової модуляції дає змогу вивчати механічні характеристики зразка і будувати форму поверхні за нульової сили дотику.

Завдяки спеціальним силовим методам можна вивчати навіть рідкі фази і дрібні краплі на поверхні зразка.

Висока чутливість зондів і точність сканерів дає змогу отримувати зображення високої роздільної здатності 0,05 нм x 0,01 нм. Крім того, для роботи зондового мікроскопа не потрібне створення вакууму, їх можна застосовувати в стандартних лабораторних умовах або при зануренні в рідину.

Нині найпоширенішими видами зондової мікроскопії є скануюча тунельна й атомно-силова мікроскопії

2.1.6 Скануюча тунельна мікроскопія

У скануючому тунельному мікроскопі як зонд використовують тонке металеве вістря (як правило, вольфрамове), кінчик якого має розмір близько 0,2 нм.

Принцип роботи тунельного мікроскопа ґрунтується на проходженні електроном потенційного бар'єру, який утворено розривом електричного кола невеликим проміжком між зондувальним вістрям і поверхнею зразка. Якщо між металевим зондом і поверхнею створити невелику різницю потенціалів (близько 10 мВ) і наблизити зонд до поверхні, то за деякої відстані між ними з'явиться слабкий тунельний струм. Для отримання зображення поверхні металевий зонд переміщують над поверхнею зразка, підтримуючи постійне значення тунельного струму, таким чином, траєкторія руху зонда збігається з профілем поверхні. Існує й інший варіант проведення аналізу - у режимі постійної висоти, він швидший, але менш точний

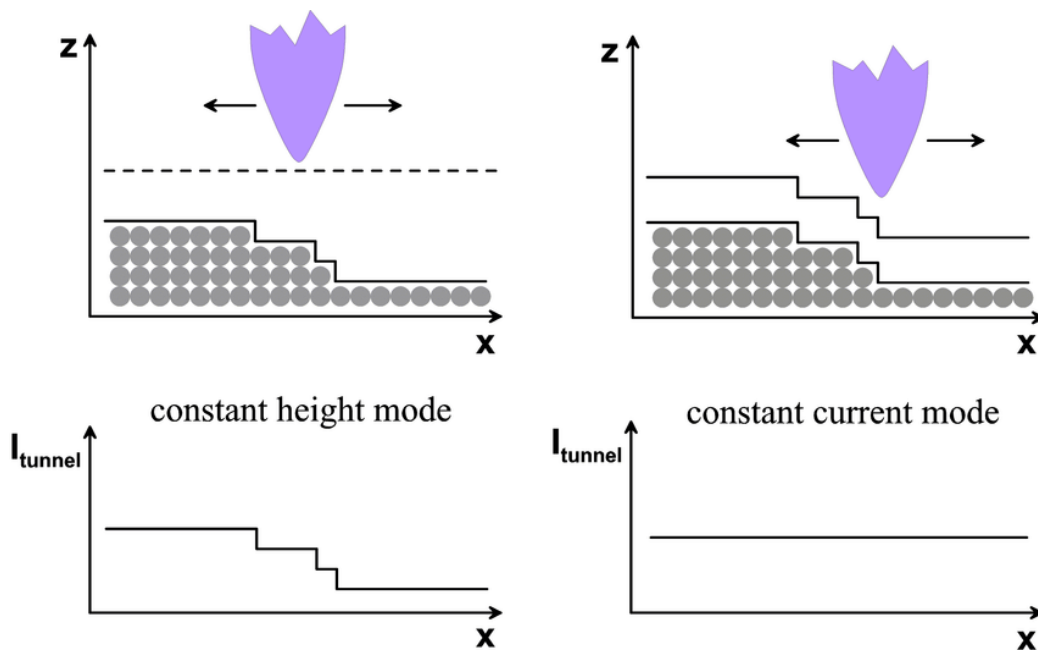


Рис. 2.15. Схема роботи скануючого тунельного мікроскопа: у режимі постійної висоти (а), у режимі постійного струму (б)

2.1.7 Атомно-силова мікроскопія

Атомно-силова мікроскопія являє собою надчутливий вимірювач профілю поверхні будь-яких типів матеріалів (рис. 23), заснована на вимірюванні величини міжмолекулярної взаємодії (сил Ван-дер-Ваальса).

Як зонд в АСМ використовують пружну пластинку (кантилевер), на вільному кінці якої (методами літографії) формують вістря з твердого матеріалу (кремнію або нітриду кремнію). Під час контакту вістря голки з поверхнею відбувається вигин пластини. Кількісно визначивши цей вигин, можна розрахувати сили, що діють між голкою і поверхнею, а також відносну висоту рельєфу поверхні в точці контакту.

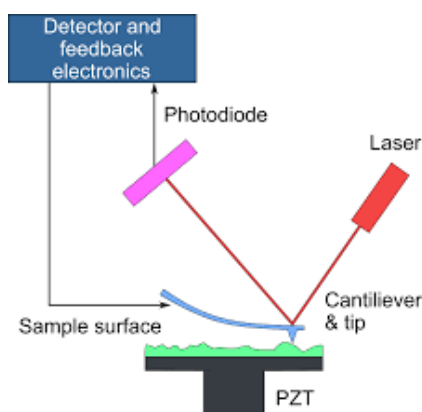


Рис. 2.16. Схема роботи атомно-силового мікроскопа

Для детектування відхилення використовується напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 670 нм. Лазерний промінь спрямовується на вкритий дзеркальним шаром бік кантилевера, зворотний до досліджуваної поверхні, і відбивається від неї. Відбитий промінь потрапляє в спеціальний фотодіод, що реєструє амплітуду зміщення кантилевера в той чи інший бік.

Широко використовують також такий режим роботи АСМ, коли зонд коливається в напрямку нормалі до поверхні зразка з деякою частотою. З таких режимів найчастіше застосовують режим "обстукування" поверхні та режим фазового контрасту, що дають змогу, крім рельєфу поверхні, вимірювати механічні властивості поверхневого шару.

Цей метод дає можливість досліджувати практично будь-яку поверхню від провідних матеріалів до діелектриків і полімерів.

2.2.1 Огляд літератури та аналоги досліджуваного пристрою

Інноваційність розроблення пристрою для підготовки емульсії, інформаційно-вимірювальної системи для визначення дисперсного складу емульсії полягає в автоматизації процесу вимірювань з використанням системи штучного інтелекту, а також у реалізації режимів вимірювання статичних і динамічних зразків. Складемо таблицю конкурентного аналізу та аналогів системи відповідно до джерела [18].

Аналогами розробки є аналізатор частинок "Mastersizer 3000" від компанії Malvern Panalytical, Великобританія. Принцип роботи даного пристрою заснований на методі лазерної дифракції, частота вимірювання 10кГц, розмір аналізованих частинок від 0.01 до 3500 мкм, габарити 690 мм х 300 мм х

450 мм. Іншим аналогом розроблюваної системи є аналізатор розміру частинок LS 13 320 XR компанії Beckman Coulter, США, принцип роботи цього пристрою також заснований на методі лазерної дифракції, розмір аналізованих частинок від 10 до 2000 мкм, габарити 970 мм х 254 мм х 495 мм.

Таблиця 2.2 - Конкурентний аналіз аналогічних технічних рішень

Найменування пристрою	Діапазон вимірювань частинок, мкм	Метод вимірювання	Наявність ПЗ	Рівень автоматизації	Розподіл частинок за розміром	Габарити, мм	Вага, кг
ЛС 13 320 MBT, Beckman Coulter, США	0,017 - 2000	Лазерна дифрактометрія за Мі та Фраунгофером у поєднанні з реєстрацією диференціальної інтенсивності поляризованого світла (PIDS)	+	Автоматичне юстування гарантує точність калібрування кута лазера щодо оптичної осі, забезпечуючи високу відтворюваність	+	1007×254×445	32,5
SALD-2300, Shimadzu, Японія	0,017 - 2500	Лазерна дифракція	+	Комп'ютерне управління	+, спостереження в реальному часі	680×280×430	31

Camsizer X2, Retsch, Німеччина	0,8 - 8000	Аналіз динамічних зображень відповідно до стандарту ISO 13322-2	+	Повністю автоматична процедура вимірювання	-	850×580× 570	50
Mastersizer 3000, Malvern Panalytical, Велика Британія	0,01 - 3500	Лазерна дифракція	+	Автоматичне та ручне керування послідовністю вимірювань	+	690×300× 450	30
Розроблюва на система	0,017 - 3500	Оптичний цифровий метод аналізу	+	Повністю автоматична процедура вимірювання з системою автопозиціонування	+, спостереженн я за поведінкою глобулу реальному часу	355×340× 495	5,45

В аналізаторах серії Mastersizer 3000 використовується метод лазерної дифракції для аналізу розподілів частинок за розмірами в діапазоні від 10 нм до 3.5 мм.

Запатентована П-образна оптична схема Mastersizer 3000 забезпечує покриття широкого діапазону розмірів часток : від 10 нм до 3.5 мм, з використанням фіксованої оптичної конфігурації (і однолінзової системи). Для покриття усього розмірного діапазону з високим розділенням використовується вимір і обробка сигналу розсіяння на двох довжинах хвиль. Точний вимір сигналу великих часток можливий завдяки високочутливому детектору фокальної площини з високим кутовим розділенням. Висока чутливість в нанодіапазоні (менше 100 нм) досягається в силу специфіки оптичної конфігурації і використання 10 мВт твердотілого джерела синього світла.

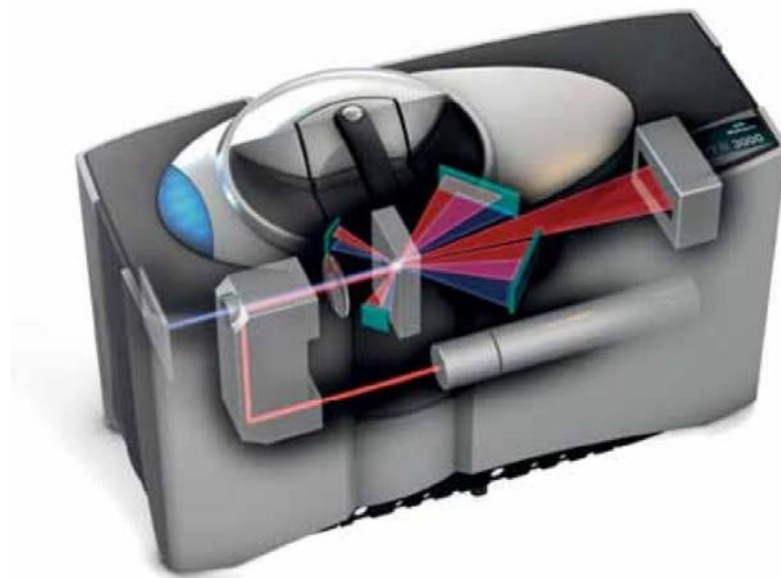


Рис. 2.17 – Структурна схема лазерного аналізатору Mastersizer 3000

Аналізатори розмірів часток Mastersizer використовуються в щоденній виробничій практиці по всьому світу. Основні технічні характеристики аналізатора : об'єктивність і коректність його функціонування - верифіковані: Точність при вимірі стандартних зразків полістиролового латексу (водна суспензія) краще чим 1%. Повторюваність при вимірі стандартних зразків полістиролового латексу краще чим 0.5%. Відтворюваність результатів аналізу полідисперсних стандартних зразків краще чим 1% що перевершує вимоги ISO 13320 : 2009 і USP <429>

Вимірювані характеристики	Типи зразків
Розподіл часток за розмірами (гранулометричний склад)	Суспензії, емульсії, сухі порошки
Фундаментальні характеристики	
Принцип вимірювання	Розсіювання лазерного світла (лазерна дифракція)
Аналіз	Теорія Мі, наближення Фраунгофера

Частота реєстрації даних	10 кГц	
Характерна тривалість вимірювання	<10 секунд	
Характеристики оптичної системи	Mastersizer 3000	Mastersizer 3000E
Джерело червоного світла	Максимальна потужність 4 мВт, 632.8 нм, He-Ne лазер	Максимальна потужність 4 мВт, 632.8 нм, He-Ne лазер
Джерело синього світла	Номинальна потужність 10 мВт, 470 нм, напівпровідниковий	Відсутнє
Оптична схема	Зворотня Фур'є конфігурація (сходиться промінь)	Зворотня Фур'є конфігурація (сходиться промінь)
Ефективна фокусна відстань лінзи	300 мм	300 мм
Детектор		
Розташування елементів	Логарифмічні інтервали	Логарифмічні інтервали
Кутовий діапазон реєстрації розсіяного світла	Від 0.015 до 144 градусів (одноразова реєстрація у всьому діапазоні)	Від 0.032 до 60 градусів (одноразова реєстрація у всьому діапазоні)
Юстирування	Автоматична	Автоматична
Характеристики аналізу розмірів частинок		
Діапазон вимірювання розмірів частинок	0.01 – 3500 мкм *	0.1 – 1000 мкм *
Кількість розмірних класів	100 (можливе додаткове налаштування користувачем)	100 (можливе додаткове налаштування користувачем)
Клас лазера	Клас 1, IEC 60825-1: 2007 і CRF глава 1: Розділ J: Частина 1040 (CDRH)	

Нормативи	Відповідність вимогам RoHS і WEEE Відповідність CE / FCC Відповідність вимогам ICES / C-tick / VCCI
Маса і габарити (оптичний модуль)	
Габарити	690 мм x 300 мм x 450 мм (ДхШхВ)
Маса	30 кг
Експлуатаційні параметри	
Електроживлення	100/240 В, 50/60 гц
Температура зберігання	від -20 ° С до + 50 ° С
Температура експлуатації	від + 5 ° С до + 40 ° С
Клас захищеності (IP)	IP41B
Характеристики комп'ютера	
Інтерфейс	Не менше 1 високошвидкісного USB порту
Операційна система	Windows 7 professional (32 bit и 64 bit)
Апаратне забезпечення	Апаратне забезпечення Intel Core i5, 4 гб RAM, 250 гб HD, CD-ROM або DVD +/- RW, широкоекранний монітор

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики аналізаторів
MASTERSIZER 3000

Аналізатор розміру часток BetteBettersizer ST використовує для аналізу метод лазерної дифракції. Дозволяє проводити гранулометричний аналіз дисперсних систем. Інноваційні оптичні розробки аналізаторів серії Bettersizer ST забезпечують стабільні і надійні результати вимірів з мінімальним втручанням користувача. А компактний розмір устаткування (660 мм x 420 мм) Bettersizer ST зберігає цінний робочий простір.



Рис. 2.18 – Аналізатор розміру часток BetteBettersizer ST.

Bettersizer ST має діапазон виміру розмірів часток від 0.1 мкм. до 1000 мкм .; Двохлінзова оптична система (DLOS) : особливу оптичну система забезпечує результати високої точності; автоматичне калібрування і тестування : забезпечує високу відтворюваність результатів

Загальні	Bettersizer ST
Принцип роботи	Лазерна дифракція
Аналітична теорія	Мі і Франгофер
Швидкість виміру	3 кгц
Типовий час виміру	≤ 10 с.
Розмір часток	
Діапазон виміру розмірів	0.1 - 1000 мкм
Правильність	$\leq 1\%$
Відтворюваність	$\leq 1\%$
Дозвіл	Один пік, подвійний пік, мульти-пік
Оптика	

Лазер	3 мвт, Напівпровідниковий волоконний лазер, 635 нм
Схема лінз	Одна лінза
Ефективна фокусна відстань	300 мм
Детектор	
Схема	Масив
Кількість	86 шт (передні, бічні, задні)
Коректування траєкторії світла	Інтелектуальна система автоматичної корекції
Система диспергування зразка	
Тип диспергування	Рідинний
Система диспергування	Ультразвукова 50 вт, 38 кгц, система захисту від пересихання
Циркуляція рідини	Центробіжний насос, 3000-8000 мл / хв, автоматичне споживання і промивання рідини
Обсяг	600 мл
Програмне забезпечення	
21 CFR частина 11	Підтримується
Звіт	Більше 14 форматів звітів
Авто тестування	Можливо
Експорт даних	Excel, Pdf, Word, Jpg та ін.
Живлення і розміри	

Напруга	220В
Розміри	660 мм x 420 мм x 320 мм (Д x Ш x В)
Вага	38 кг
Специфікація комп'ютера	
Комп'ютерний інтерфейс	USB2.0, USB3.0
Операційна система	Windows XP, Windows 7, 8 або 10
Вимоги до ПК	Intel Core I5, 4GB RAM, 250GB HD

Таблиця 2.4 – Аналізатор розміру часток BetteBettersizer ST.

2.3.1 Висновки до розділу

У результаті аналізу встановлено, що методи мікроскопії забезпечують високу точність дослідження, але поступаються за швидкістю та автоматизацією сучасним лазерно-оптичним аналізаторам. Наведені пристрої-аналоги дозволяють ефективно визначати дисперсний склад рідин, проте їхня складність і вартість мотивують розробку власної системи з оптимальним функціоналом.

3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

3.1.1 Опис інформаційно-вимірювальної системи

Оскільки аналіз дисперсного складу - це процес отримання статистичних даних про розміри емульсії, то як спосіб проведення аналізу дисперсного складу емульсії було обрано методи спостереження, оптичної мікроскопії та фотофіксації результатів серій експериментів, які проводять, на базі технології комп'ютерного машинного зору, а використання спеціального програмного та апаратного забезпечення прискорює процес обробки мікрофотографій емульсії.

Ця система передбачає роботу в двох режимах. Перший режим - статичний. У цьому режимі відбувається спостереження за емульсією, що подається порціями через кювету, розташовану на предметному столику пристрою. Другий режим - динамічний, за якого відбувається створення й аналіз серій мікрофотографій в умовах прогону ламінарного потоку емульсії через кювету предметного столика з низькою швидкістю, а також подальше опрацювання отриманих серій зображень.

Промисловий зразок інформаційно-вимірювальної системи можна буде використовувати на промислі як модуль автоматизованого пробовідбору та аналізу дисперсного складу емульсії - передбачено можливість відбору для аналізу невеликої кількості нафтової емульсії, яку пізніше повертають у загальний потік [2].

Сам пристрій складається з оптичної системи, камери з комп'ютерним зором, що фіксує розміри та площу проєкції глобул як у режимі реального часу (у динамічному режимі), так і в статиці, напрямних валів, якими відбувається рух, а, як наслідок, - коригування положення оптичної системи у зв'язці з камерою для точнішого вимірювання, крокових двигунів із блоками лінійно-гвинтових передач та багатьох інших деталей корпусу й електромеханічних вузлів.

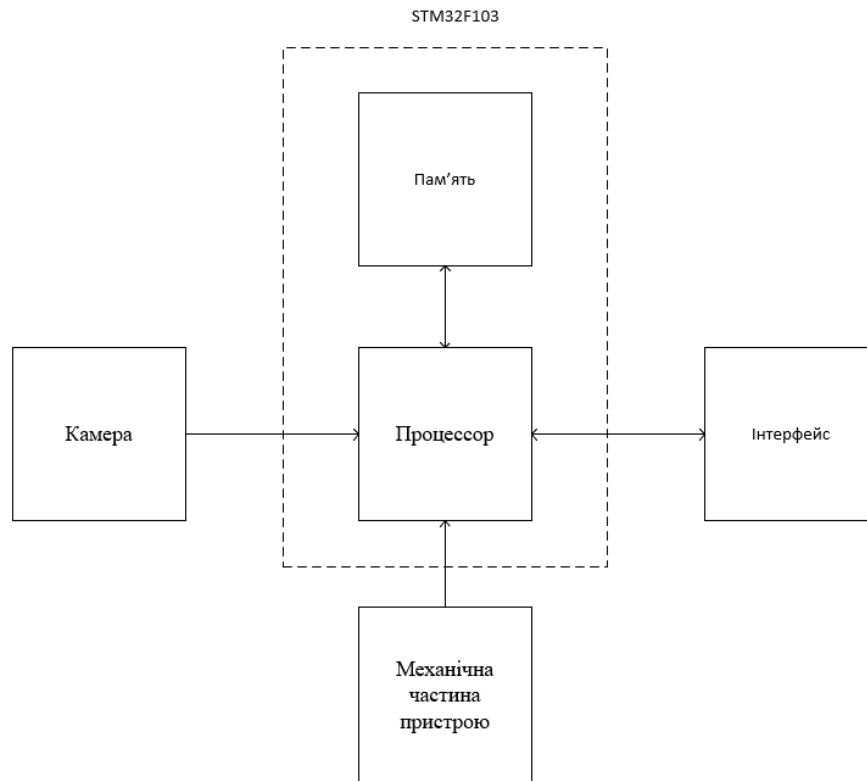


Рис. 3.1 – Структурна схема пристрою

З погляду механічної системи, пристрій має 3 поступальні ступені свободи, по одній на кожну з осей прямокутної системи координат у просторі. Така Механічна система пристрою дає змогу оптичній системі з камерою точно позиціонуватися в конкретній точці простору і переміщатися прямолінійно тільки уздовж координатних осей у стані відсутності побічних обертань, що виникаються під час руху платформ гвинтових передач. Відсутність ступенів свободи механічної системи, що відповідають за обертання, дає змогу позбутися неточностей у переміщенні оптичної системи та додаткових похибок під час проведення вимірювань. Усе це досягається завдяки жорсткому кріпленню передач у корпусі пристрою.

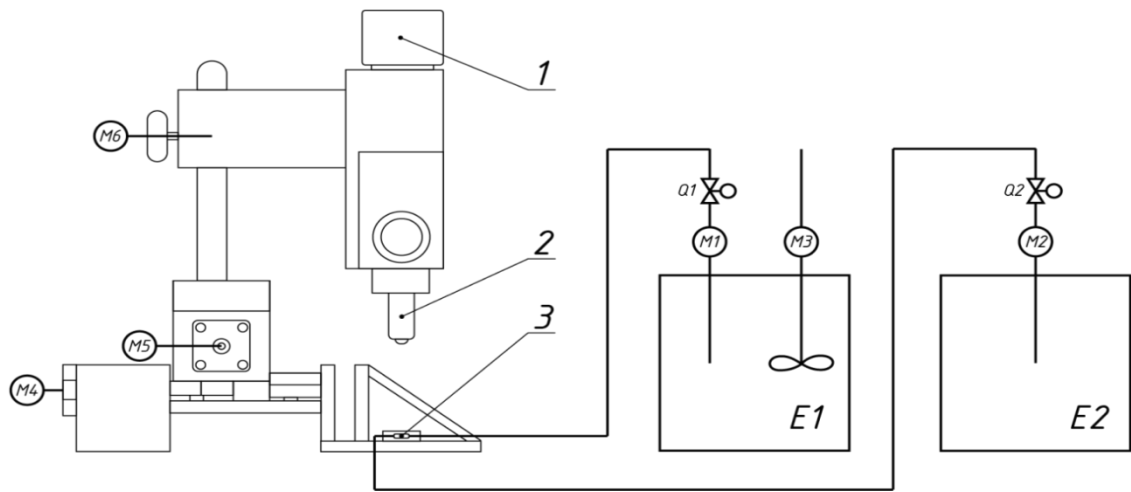


Рисунок 3.2 –Схема комплексу інформаційно-виміральної системи оптичної діагностики з підключеними резервуарами та клапанами (1 – цифрова камера; 2 – оптична система лінз мікроскопа; 3 – кювета на предметному столику; E1-ємність для підготовки емульсії; E2-технічна ємність; Q1, Q2- електромагнітні клапани; M1, M2 – насоси для здійснення подачі емульсії; M3 – привід мішалки/насоса для підготовки емульсії; M4, M5, M6 – приводи для переміщення мікроскопа щодо предметного столика).

4 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

4.1.1 Проектування автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи

1.1.1 Кроковий двигун, його принцип роботи і розрахунок основних параметрів, застосовних для побудови гвинтових передач

Кроковий двигун (КД) - синхронний безщітковий електродвигун із кількома обмотками, у якому струм, що подається в одну з обмоток статора, викликає фіксацію ротора завдяки імпульсному збудженню обмоток за допомогою електронного комутатора. Ротором є активний дво полюсний постійний магніт. На малюнку 4.3 представлено схему крокового двигуна з активним ротором. У конструкції лінійних гвинтових передач використовуються ШД NEMA 17 42NM40-1684.

Для реалізації роботи модуля лінійного переміщення оптичної системи стенда ШД підходить ідеально, оскільки фіксувати положення оптичної системи необхідно з великою точністю й акуратністю. Тому необхідні 2 електродвигуни з найменшим можливим кутом повороту ротора, що приводять у дію модулі лінійного руху на кожну зі ступенів свободи. Зовнішній вигляд і технічні характеристики ШД NEMA 17 42NM40-1684 наведені на малюнку 4.4 і в таблиці 4.1, відповідно. [11]

Таблиця 4.1 - Технічні характеристики ШД NEMA 17 42NM40-1684

Технічна характеристика	Опис
Виробник	NEMA
Модель пристрою	17 42NM40-1684
Кутовий крок	$0,9^{\circ} \pm 5\%$ (1 оберт ротора= 400 кроків ШД)
Число фаз	2
Діапазон робочих температур	від -20°C до $+85^{\circ}\text{C}$
Напруга живлення	2,8 В
Номінальний струм	1,68 А
Опір фази	1,65 Ом
Індуктивність	3,2 мГн
Крутний момент	3,3 кг - см

Діаметр вала	5 мм
Довжина вала	24 ± 1 мм
Габарити корпусу	$42 \times 42 \times 40$ мм
Вага пристрою	0,28 кг

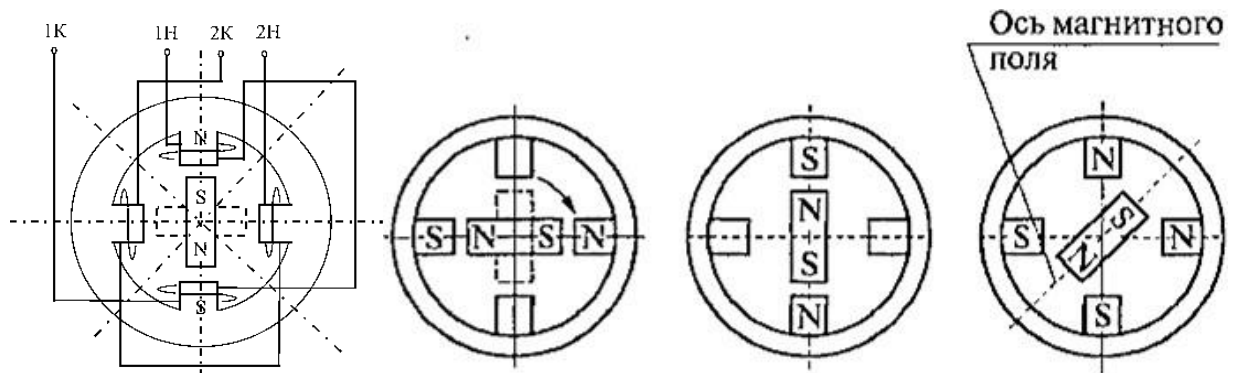


Рисунок 4.1 – Схема контактів і роботи крокового двигуна



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд крокового двигуна NEMA 17 42NM40-1684

Під час подавання імпульсу напруги на обмотку 1Н-1К (рисунок 4.3) ротор займає вертикальне, під час живлення обмотки 2Н-2К - горизонтальне положення, забезпечуючи крок, що дорівнює 90° . Положення буде стійким, оскільки в разі відхилення від нього на ротор діє синхронізуючий обертальний момент $M = M_{max} \cdot \sin(T)$, де T - кут між осями магнітних полів статора і ротора. Якщо подавати імпульси напруги на обидві обмотки одночасно, то вісь магнітного поля статора буде розташована під 45° .

Ротор при цьому повернеться на 45° , щоб максимальне поле його перетинало. Якщо зняти напругу з обмотки 1Н-1К, ротор стане

горизонтально (наступний крок), потім, помінявши полярність напруги, вісь магнітного поля переміститься ще на 45° і т. д. (ця схема називається несиметричною).

Кутове переміщення крокового двигуна визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{2\pi}{p_{\pi} * n}$$

Де p_{π} - число пар полюсів ротора, n - число перемикачів (тактів) у циклі, що дорівнює числу фаз ШД за симетричного та подвоєного числа за несиметричного режимів роботи, відповідно. Оцінимо значення кутового переміщення ШД NEMA 17 42NM40-1684:

$$\alpha = \frac{2\pi}{p_{\pi} * n} = \frac{2\pi}{8 * 2} \approx 0,39269$$

Крокове переміщення ротора здійснюється за допомогою подачі імпульсів з перемиканням обмоток (один такт комутації - один крок ротора). Сумарний кут повороту ШД пропорційний числу імпульсів, а його швидкість - частоті імпульсів, амплітуда і форма імпульсів можуть бути різними. Для реверсу ШД потрібно увімкнути на зворотну полярність обмотку, яка наразі відключена, тоді ротор зробить крок в інший бік.

Основний режим роботи ШД - динамічний. ШД входить у синхронізм зі стану спокою і самогальмується. Тому в ШД забезпечується пуск, гальмування, реверс і перехід з однієї частоти керуючих імпульсів на іншу. Пуск ШД здійснюється стрибкоподібним або поступовим збільшенням частоти вхідного сигналу до робочої, гальмування - зниженням її до нуля, реверс - зміною послідовності комутації обмоток ШД.

За конструкцією ШД можуть бути однофазними, двофазними, багатофазними, з активним або пасивним ротором. Активний ротор виконаний у вигляді постійних магнітів або з обмоткою збудження, як у СД (магнітоелектричні крокові двигуни). Такі ШД мають великий крок ротора

від 90° до 15° . Для зменшення кроку збільшують число фаз і тактів комутації, а також використовують двостаторну або двороторну конструкцію.

Максимальна частота керівних імпульсів, за якої можливий пуск ШД із нерухомого стану без випадання із синхронізму (пропуску кроків) називається частотою прийомистості. Що вища електромагнітна і механічна інерція ШД і більший момент навантаження, то менша частота прийомистості.

Максимальна швидкість ШД з активним ротором становить 208-314 р/с, частота прийомистості від 70 до 500 Гц, номінальний обертальний момент від 10×10^{-6} до $10 \times 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Для великих частот прийомистості використовують ШД із пасивним ротором, які поділяють на реактивні та індукторні. Ротор виконаний з феромагнітного матеріалу, не має обмоток (пасивний). На статорі зубці Z_c (виразні полюси) з обмотками, на роторі зубці Z_p без обмоток.

Якщо $Z_p > Z_c$, то під час кожного перемикавання обмоток статора ротор здійснює поворот (крок) α , обчислюваний за формулою:

$$\alpha = \tau_c - \tau_p - \frac{360^\circ}{Z_c} \frac{360^\circ}{Z_p} - \frac{360^\circ \cdot (Z_p - Z_c)}{Z_c Z_p}$$

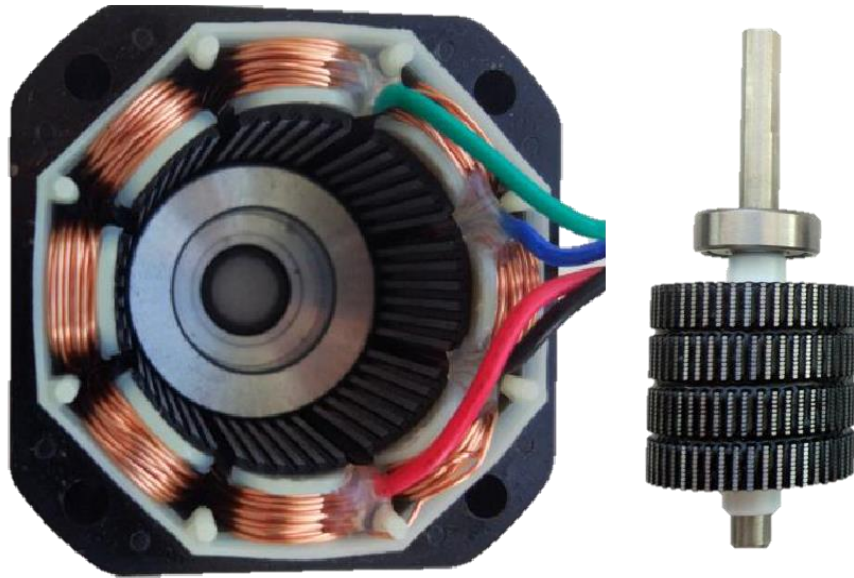


Рисунок 4.3 – Ротор і статор крокового двигуна NEMA 17 42NM40-1684

У разі використання запропонованого ШД, значення кроку дорівнює (число обмоток статора, що дорівнює 8, узятє з малюнка 5.5):

$$\alpha = \frac{360^0}{6 * 8} = \frac{360^0}{20 * 4} = \frac{360^0 * (80 - 48)}{80 * 48} = \frac{11520}{3840} = 3^0$$

Зменшивши різницю $Z_{(p)} - z_{(c)}$, можна знизити крок ротора. ШД з пасивним ротором (Ш, ШДР, ШР, РШД) мають крок від $1,5^0$ до 9^0 , момент $2,5 \times 10^{-6}$ - $10 \times 10^{-3} \text{Н} \times \text{м}$, частоту прийомистості від 250 до 1200 Гц [7].

Ця зв'язка електромеханічного та електронного забезпечення пристрою гарантує безпечне завадостійке та гнучко настроюване з'єднання між механічною та електронною системами пристрою.

4.2.1 Модуль камери

Модуль камери складається з чотирьох частин: датчика зображення, об'єктива, друкованої плати (PCB) та інтерфейсу. На рисунку 4 показано кілька типових прикладів модулів камер.

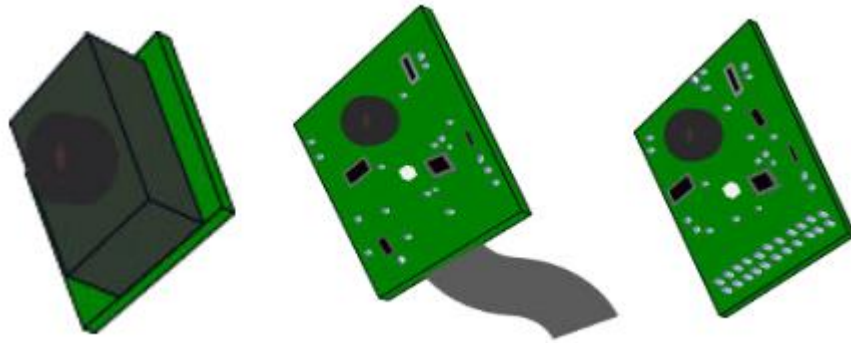


Рис. 4.4 – Приклади модулів камери

Компоненти модулю камери:

1. Датчик зображення

Це аналоговий пристрій, який використовується для перетворення отриманого світла в електронні сигнали. Ці сигнали передають інформацію, що складає цифрове зображення.

Існує два типи датчиків, які можуть використовуватися в цифрових камерах:

- Датчики CCD (пристрій із зарядовим зв'язком)
- Датчики CMOS (комплементарний металооксидний напівпровідник)

Обидва типи перетворюють світло в електронні сигнали, але кожен має свій власний метод перетворення. Оскільки їхні характеристики постійно вдосконалюються, а вартість знижується, CMOS-датчики зараз домінують у сфері цифрової фотографії.

2. Об'єктив

Це оптичний пристрій, який дозволяє відтворювати реальне зображення, чітко зафіксоване на матриці. Вибір відповідного об'єктива є частиною творчості користувача і значно впливає на якість зображення.

3. Друкована плата (PCB)

Це плата, що містить електронні компоненти для забезпечення хорошої поляризації та захисту датчика зображення. PCB також підтримує всі інші частини модуля камери.

4. З'єднання модуля камери

Інтерфейс камери є своєрідним мостом, який дозволяє датчику зображення підключатися до вбудованої системи та надсилати/отримувати сигнали. Між камерою та вбудованою системою передаються такі сигнали:

- Сигнали керування
- Сигнали даних зображення
- Сигнали живлення
- Сигнали конфігурації камери

Інтерфейси камери поділяються на два типи: паралельні та послідовні, залежно від методу передачі сигналів даних.

Опис модуля камери, що використовується в проєкті:

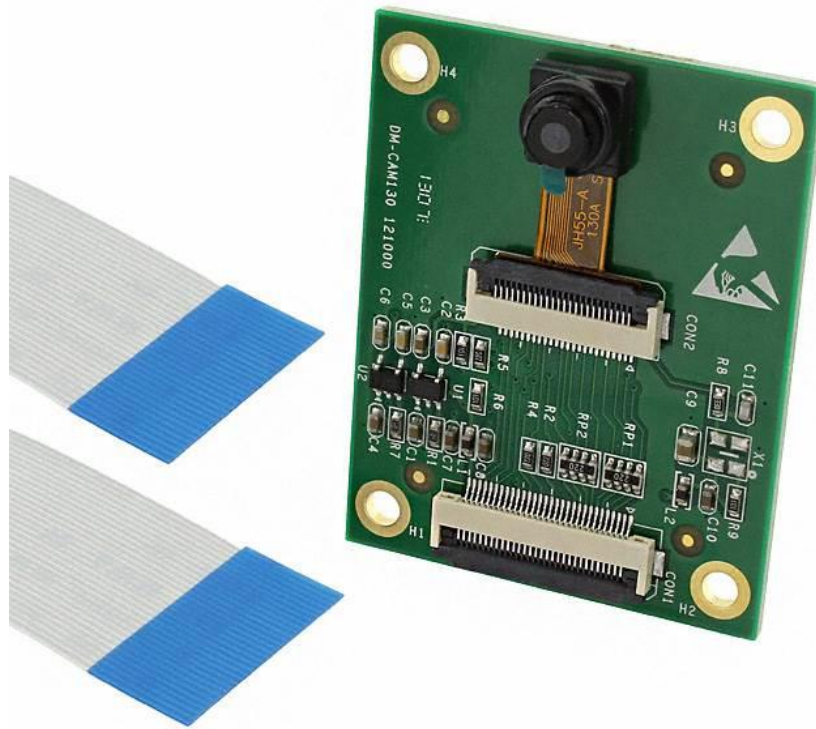


Рис. 4.5 – Зображення модуля STM32F4DIS-CAM

Модуль цифрової камери STM32F4DIS-CAM, розроблений компанією Embest, може використовуватися з оціночною платою STM32F4DIS-BB та сенсорним екраном STM32F4DIS-LCD. Цей модуль містить OV9655, який є 1,3-мегапіксельним CMOS SXGA-датчиком зображення. Цей модуль підтримує попередній перегляд зображень, фотозйомку та зберігання фотографій. Він підходить для таких застосувань, як портативні цифрові термінали та домашня автоматизація.

Система сигналу	CMOS 1,3 мегапікселя
Роздільна здатність	до 1280 * 1024
Можливості	Підтримка фотографій
Частота кадрів	15 кадрів/с для SXGA, 30 кадрів/с для VGA і CIF

Табл. 4.2 – Характеристики модулю камери

4.2.2 З'єднання модуля камери (паралельний інтерфейс)

Як згадувалося вище, для належного передавання даних зображення модуль камери потребує чотирьох основних типів сигналів: сигналів керування, сигналів даних зображення, сигналів живлення та сигналів конфігурації камери. На рисунку 5 показано типову блок-схему CMOS-сенсора та його з'єднання з мікроконтролером.

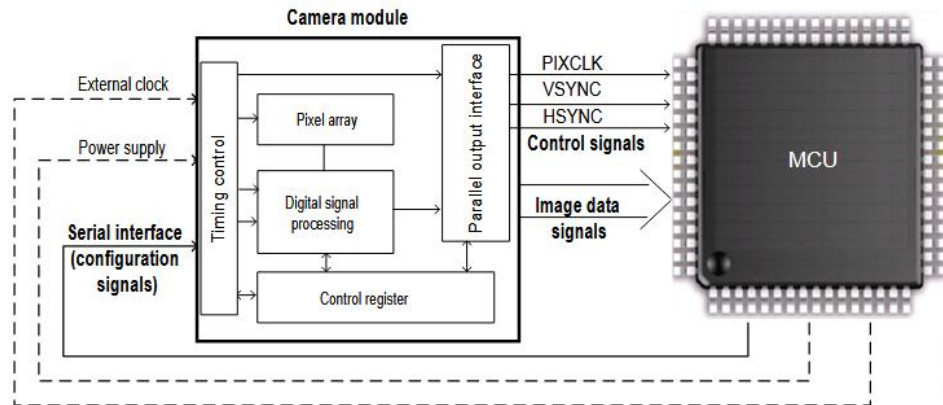


Рис. 4.6 - Підключення модуля камери до мікроконтролера STM32

Сигнали управління(Control Signals): використовуються для генерації тактового сигналу та синхронізації передачі даних. Тактовий сигнал камери повинен відповідати технічним характеристикам камери. Камера також надає два сигнали синхронізації даних: HSYNC (для горизонтальної/лінійної синхронізації) та VSYNC (для вертикальної/кадрової синхронізації).

- Сигнали даних зображення(Image data signals): кожен з них передає біт даних зображення. Їхня ширина представляє кількість бітів, що передаються на кожен такт пікселя. Ця кількість залежить від паралельного інтерфейсу модуля камери та від вбудованого інтерфейсу системи.

- Сигнали живлення(Power supply signals): Як і будь-яка вбудована електронна система, модуль камери потребує джерела живлення. Робоча напруга модуля камери вказана в його технічному описі.

- Сигнали конфігурації(Configuration signals): використовуються для наступного:

- Для конфігурації відповідних характеристик зображення, таких як роздільна здатність, формат і частота кадрів.
- Для конфігурації контрасту і яскравості.
- Для вибору типу інтерфейсу. (Модуль камери може підтримувати більше одного інтерфейсу: паралельний і послідовний інтерфейс. Користувач повинен вибрати найбільш зручний для застосування.)

Більшість модулів камери параметризуються через комунікаційну шину I2C.

4.3.1 Мікроконтролер STM32

STM32F103C8T6 — це 32-бітний мікроконтролер на базі ядра ARM Cortex-M3, виготовлений компанією STMicroelectronics. Він є популярним вибором для вбудованих систем завдяки своїй продуктивності, низькому енергоспоживанню та багатому набору периферійних пристроїв. Він має 64 КБ флеш-пам'яті, 20 КБ SRAM і працює на тактовій частоті до 72 МГц. Пристрій включає в себе різні комунікаційні інтерфейси, такі як USART, SPI, I2C і CAN, а також кілька таймерів і 12-бітний АЦП. Він часто зустрічається на платі розробки «Blue Pill», яка використовується для навчання і створення прототипів.

Архітектура	32-бітне ядро ARM Cortex-M3.
Тактова частота	до 72 МГц
Пам'ять	64 КБ Flash, 20 КБ SRAM
Периферійні пристрої	До 37 GPIO-контактів. 12-бітний АЦП з максимум 10 каналами.

	Кілька таймерів, включаючи таймери PWM. Інтерфейси зв'язку USART, SPI, I2C, CAN
Енергоспоживання	Підтримує режими низького енергоспоживання для енергоефективної роботи
Робоча напруга	від 2,0 В до 3,6 В
Робоча температура	від -40 °C до +85 °C.
Корпус	LQFP48

Табл. 4.3. – Характеристики мікроконтролеру STM32F103C8T6

Принципова схема наведена на рис. 4.9

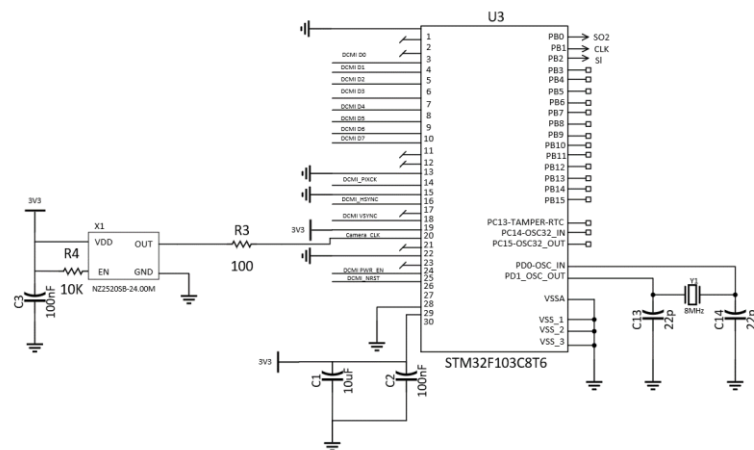


Рис. 4.7. Електрична принципова схема підключення мікроконтролеру STM32F103 до камери STM32F4Dis cam

5 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

У рамках проєктування інформаційно-вимірювальної системи та вивчення механічних агрегатів пристрою, було створено детальну САД-модель із використанням САПР. Загальний вигляд моделі зображено на малюнку 5.1. Складальне креслення пристрою наведено в додатках Н - П. Специфікація до складального креслення також наведена в додатках Р - С.

Спроектована модель дає змогу не тільки наочно продемонструвати сам пристрій, а й фізично провести складання з повною поінформованістю про точне взаємне розташування елементів, а також оцінити характеристики міцності вузлів майбутньої інформаційно-вимірювальної системи загалом. Ба більше, модель дає змогу змінювати конструкцію некоректних і/або неефективних механічних вузлів без необхідності попереднього повного розбору прототипу. Кінцева версія комплексу інформаційно-вимірювальної системи зображена на схемі рисунка 5.1.

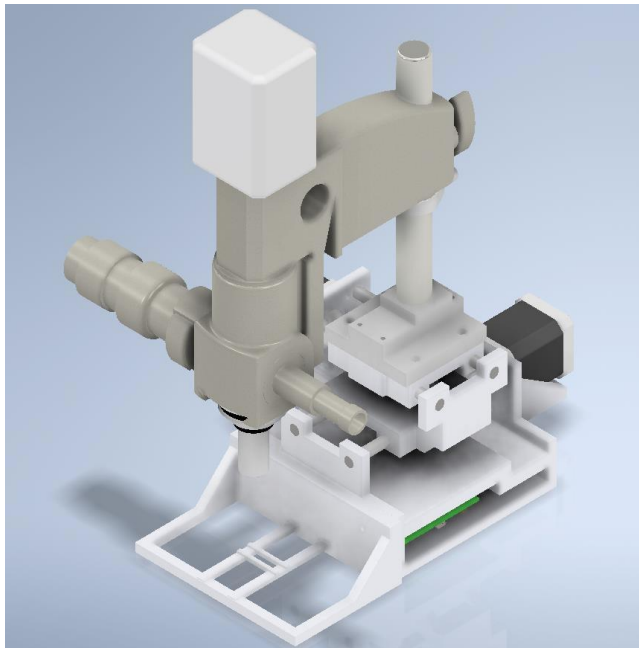


Рисунок 5.1 – САД-модель автоматизованого пристрою цифрового оптичного аналізу дисперсного складу нафтових емульсій

5.2.1. Гвинтові передачі лінійного переміщення оптичної системи

Просторове переміщення оптичної системи здійснюється за допомогою обертання гвинтів лінійних передач пристрою, що перетворюють обертання валів крокових двигунів на прямолінійний і рівномірний рух платформ. Лінійне переміщення здійснюється оп осях OX і OY , як це показано на малюнку 5.3. На одній із платформ гвинтової передачі, що відповідає за переміщення за віссю OY , закріплюється оптична система, а на іншій платформі - повністю вся передача, що відповідає за переміщення за віссю OY .

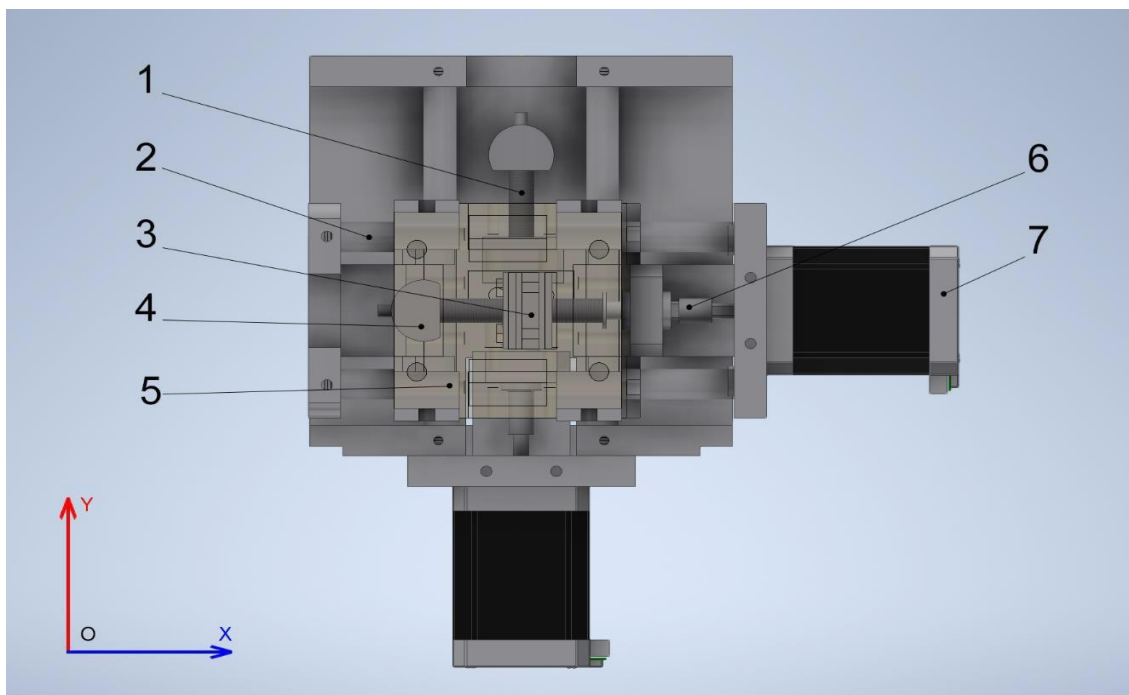


Рисунок 5.2 - CAD-модель гвинтових передач лінійного переміщення з платформами, кінцевими вимикачами, гвинтами, що подають(1), напрямними валами(2), U-подібними гайками(3), радіальними підшипниками(4), платформами з лінійними підшипниками(5), з'єднувальними муфтами(6) і кроковими двигунами (7)

Різьбовий крок ведучого гвинта розраховується за формулою:

$$P = \frac{L}{(n - 1)} \Rightarrow P = \frac{10 \text{ мм}}{(20 - 1)} = 0,5263 \text{ мм} \approx 0,5 \text{ мм}.$$

Де P – різьбовий кром (мм), L - довжина взятого відрізка (мм), на якому відлічується число витків гвинта, n – число витків на взятому відрізку L .

Кожна з розглянутих вище передач має гвинт подачі (рисунок 5.3, п. 1), з'єднаний муфтою (рисунок 5.3, п. 6) з валом двофазного крокового двигуна (рисунок 5.3, п. 7) з кутовим кроком $0,9^\circ$ (під час одного повного обороту вала двигуна ротор робить 400 кроків), що працює в мережі постійного струму 12 В. Керувальні сигнали напругою 3,3 В для кожного з крокових двигунів надходять через драйвери крокових двигунів, з'єднаних з налагоджувальною платою на базі мікроконтролера STM32.

У разі досягнення кінцевого вимикача однією або відразу двома платформами, робота ШД і, як наслідок, будь-який рух кожної з платформ припиняється.

5.2.2 Оптична система пристрою

Цифрова камера (рисунок 4.6, п.1), фізично з'єднана з оптичною системою пристрою та під'єднана через інтерфейс USB і драйвер до ПК, здатна детектувати розміри глобул флюїду як у статичному, так і динамічному режимах роботи пристрою за допомогою технології комп'ютерного зору, під'єднаної через спеціальні бібліотеки розробленого ПЗ. Камера здатна вести фото- і відеофіксацію мікрозображень глобул нафти в різних режимах роботи пристрою з плаваючою частотою кадрів залежно від роздільної здатності кадру і необхідних завдань конкретного дослідження від 6 до 216 FPS. Передача зображення в розроблений додаток для ПК відбувається за інтерфейсом USB 3.1 і драйвера камери для наочності проведення досліджень і позиціонування оптичної системи в цілому.

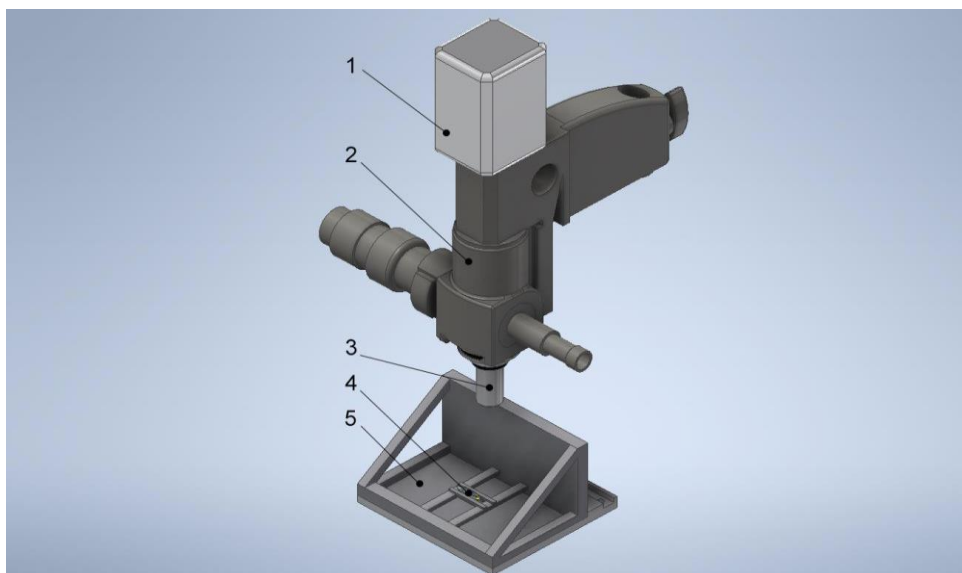


Рисунок 5.3 – CAD-модель оптичної системи (2) з об'єктивом (3), цифровою камерою (1) і предметного столика (5) з кюветою (4) розробленого пристрою

Оптична система (рисунок 5.4, п. 2, 3) являє собою металеву трубу з під'єднаною цифровою камерою на верхній її частині, в нижній же вставлений мікрооб'єктив. Скоригований планахроматичний мікрооб'єктив із плоским зором для проведення досліджень у поляризованому світлі має 16-кратне збільшення та апертуру 0,32 (рисунок 5.4, п. 3) і підходить для роботи в прохідному світлі, розрахований на довжину тубуса 160 мм і товщину покривного скла кювети 0,17 мм (рисунок 5.4, п. 4).

6. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ РОБОТИ СИСТЕМИ

6.1.1 Програмне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи

Проектування апаратного забезпечення для пристрою оптичної діагностики дисперсного складу свердловинної рідини - важливий етап створення досліджуваного пристрою, проте без спеціалізованого програмного забезпечення, за допомогою якого можливо було б керувати всіма агрегатами і периферією, не є можливим автоматизоване управління такою установкою. Описані далі заходи націлені на створення оригінального ПЗ, здатного задовольнити всі потреби, пов'язані з керуванням і контролем процесів, що протікають з установкою і дослідженням дисперсного складу емульсії.

Комплекс розробленого оригінального ПЗ для інформаційно-вимірювальної системи базується на написаних програмах окремо для налагоджувальної плати на базі мікроконтролера STM32 і ПК, що описані далі.

6.1.2 Опис програм і функцій керування роботою крокових двигунів для налагоджувальної плати

Для того, щоб написані програми надалі точно працювали з налагоджувальною платою, яку під'єднують, її спочатку необхідно сконфігурувати, налаштувавши всі необхідні для реалізації під'єднання крокових двигунів входи та виходи мікроконтролера на платі. [12] Цю операцію було виконано в середовищі конфігурації налагоджувальних плат на базі мікропроцесорів STM32 - STM32CubeMX. Результат роботи представлено на малюнках 6.1 і 6.2.

Також налаштуємо частоту тактування мікропроцесора і вбудованих таймерів. Виберемо частоту, що дорівнює 100 МГц. Результати конфігурування представлено на рисунку 6.3.

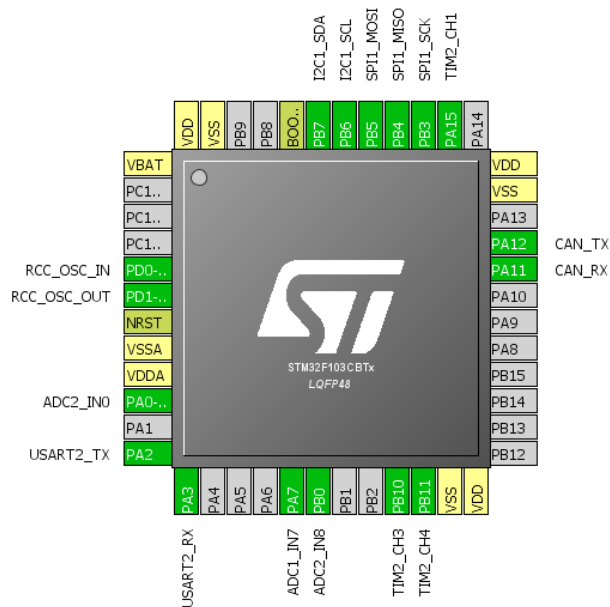


Рисунок 6.1 - Сконфігуровані входи/виходи налагоджувальної плати в середовищі STM32CubeMX

GPIO Mode and Configuration							
Configuration							
Group By Peripherals							
GPIO SYS USART NVIC							
Search Signals Search (Ctrl+F) Show only Modified Pins							
Pin Name	Signal on Pin	GPIO output...	GPIO mode	GPIO Pull-u...	Maximum ou...	User Label	Modified
PA5	n/a	High	Output Push...	No pull-up a...	Low	LED_BLINK	✓
PA15	n/a	Low	Output Push...	No pull-up a...	Low	STEP_X	✓
PB7	n/a	Low	Output Push...	No pull-up a...	Low	DIR_X	✓
PB14	n/a	Low	Output Push...	No pull-up a...	Low	ENABLE_Y	✓
PB15	n/a	Low	Output Push...	No pull-up a...	Low	STEP_Y	✓
PC7	n/a	Low	Output Push...	No pull-up a...	Low	DIR_Y	✓
PC13-ANTI_...	n/a	n/a	External Inte...	No pull-up a...	n/a	END_SWITCH	✓
PC14-OSC3...	n/a	Low	Output Push...	No pull-up a...	Low	ENABLE_X	✓

Рисунок 6.2 – Налаштування входів/виходів налагоджувальної плати в середовищі STM32CubeMX

TIM2 Mode and Configuration

Mode

Slave Mode

Disable

Trigger Source

Disable

Clock Source

Internal Clock

Channel1

Disable

Channel2

Disable

Channel3

Disable

Channel4

Disable

Combined Channels

Disable

☐ Use ETR as Clearing Source

☐ XOR activation

☐ One Pulse Mode

Configuration

Reset Configuration

Parameter Settings

User Constants

NVIC Settings

DMA Settings

Configure the below parameters :

Search (Ctrl+F)

Counter Settings

Prescaler (PSC - 16 bits value)

2999

Counter Mode

Up

Counter Period (AutoReload Register - 32 bits v...

20

Internal Clock Division (CKD)

No Division

auto-reload preload

Enable

Trigger Output (TRGO) Parameters

Master/Slave Mode (MSM bit)

Disable (Trigger input effect not delayed)

Trigger Event Selection

Reset (UG bit from TIMx_EGR)

Рисунок 6.4 – Налаштування таймера TIM2 для ШД осі ОХ для налагоджувальної плати в середовищі STM32CubeMX

TIM3 Mode and Configuration

Mode

Slave Mode

Disable

Trigger Source

Disable

Clock Source

Internal Clock

Channel1

Disable

Channel2

Disable

Channel3

Disable

Channel4

Disable

Combined Channels

Disable

☐ Use ETR as Clearing Source

☐ XOR activation

☐ One Pulse Mode

Configuration

Reset Configuration

Parameter Settings

User Constants

NVIC Settings

DMA Settings

Configure the below parameters :

Search (Ctrl+F)

◀

▶

ⓘ

Counter Settings

Prescaler (PSC - 16 bits value)

4799

Counter Mode

Up

Counter Period (AutoReload Register - 16 bits v...

20

Internal Clock Division (CKD)

No Division

auto-reload preload

Enable

Trigger Output (TRGO) Parameters

Master/Slave Mode (MSM bit)

Disable (Trigger input effect not delayed)

Trigger Event Selection

Reset (UG bit from TIMx_EGR)

Рисунок 6.5 - Налаштування таймера TIM3 для ШД осі ОУ для налагоджувальної плати в середовищі STM32CubeMX

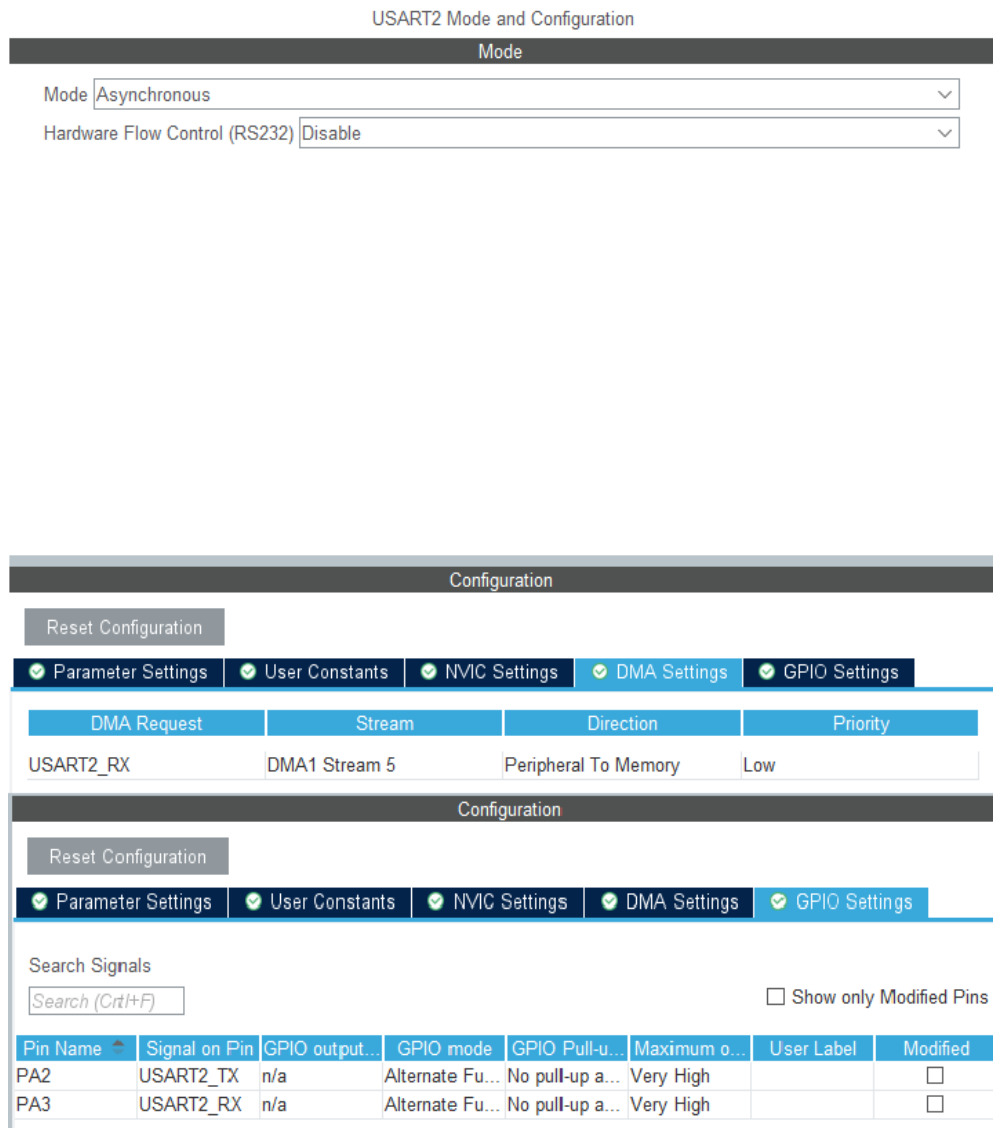


Рисунок 6.6 - Налаштування USART і DMA для налагоджувальної плати в середовищі STM32CubeMX

Після проведення повної конфігурації налагоджувальної плати, необхідно написати програми для реалізації управління обертанням валів крокових двигунів, а, як наслідок, і управління лінійним переміщенням оптичної системи пристрою через валово-циліндричні передачі. Цю операцію було виконано в середовищі програмування налагоджувальних плат на базі мікропроцесорів STM32 - STM32CubeIDE. Результат робіт наведено в додатках А-В. Розглянемо деякі функції написаних програм.

6.1.3 Функція Parser() для перетворення даних, що надходять від користувача на виконання

Складемо на основі наявної програми main.c блок-схему, що пояснює алгоритм роботи функції перетворення даних - Parser(), які надходять від користувача на виконання кроковим двигунам через під'єднані драйвери. Результат роботи представлено на малюнку 6.7 нижче.

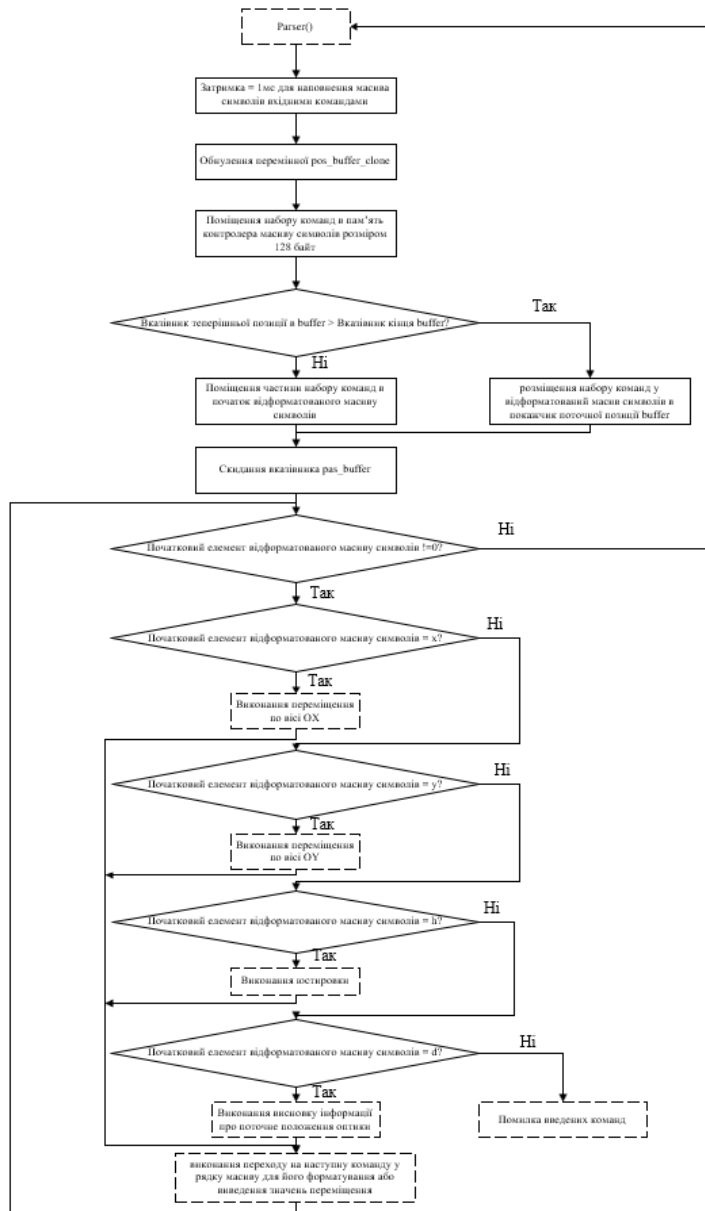


Рисунок 6.7 – Блок-схема функції Parser() програми main.c для налагоджувальної плати

6.1.4 Функції переривань таймерів для керування частотою спрацьовування крокових двигунів

Складемо на основі наявної програми stm32f4xx_it.c блок-схеми, що пояснюють алгоритм роботи функцій переривань таймерів - TIM2_IRQHandler() та TIM3_IRQHandler(), для коректної та точної роботи тактування крокових двигунів. Результат роботи представлено на малюнку 6.8 і 6.9.

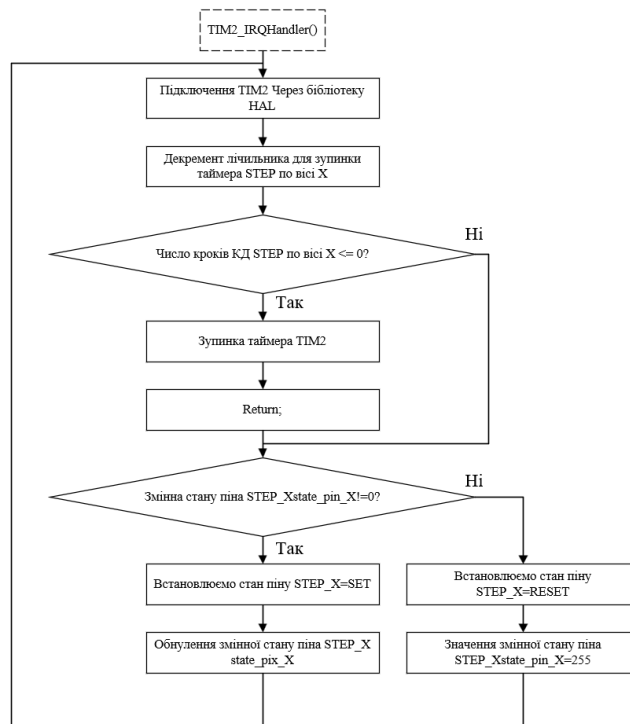


Рисунок 6.8 - Блок-схема функції переривання таймера TIM2 для переміщення по осі ОХ програми stm32f4xx_it.c для налагоджувальної плати

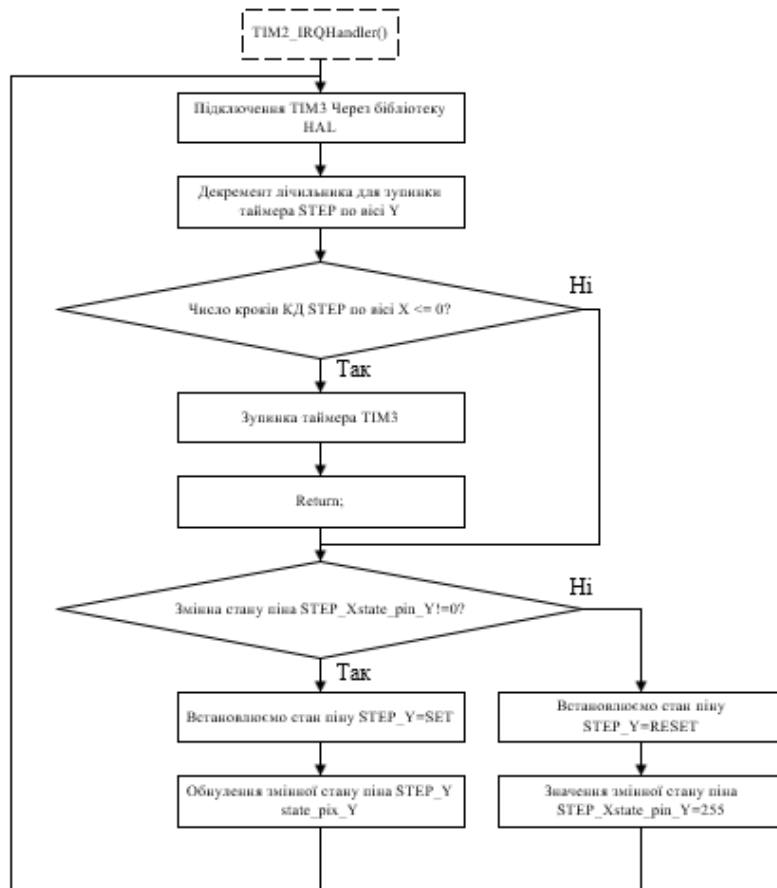


Рисунок 6.9 – Блок-схема функції переривання таймера TIM3 для переміщення по осі OY програми stim32f4xx_it.c для налагоджувальної плати

6.1.5 Функції спрацьовування кінцевих вимикачів для повного зупинення крокових двигунів і реалізації процесу юстування

Складемо на основі наявної програми stm32f4xx_it.c блок-схему, що пояснює алгоритм роботи функції спрацьовування кінцевих вимикачів - EXTI15_10_IRQHandler(), для повної зупинки крокових двигунів і реалізації процесу юстування. Результат роботи представлено на малюнку 6.10.

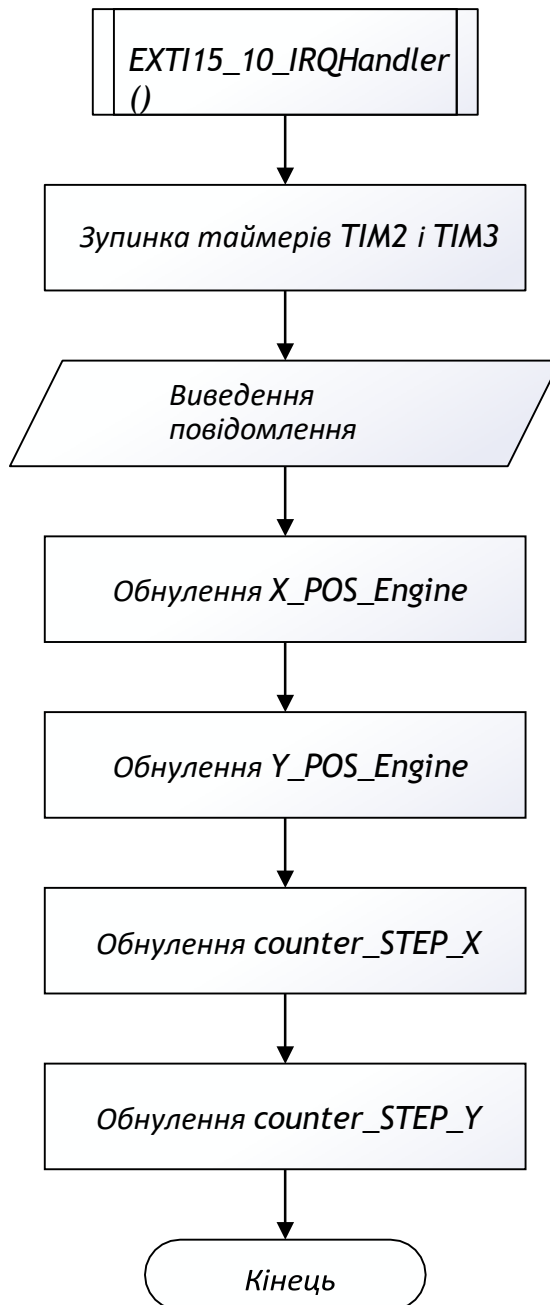


Рисунок 6.10 - Блок-схема функції спрацьовування кінцевих вимикачів для повної зупинки ШД і реалізації процесу юстування програми stm32f4xx_it.c для налагоджувальної плати

7 РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

7.1 Розрахунок похибки струму лазера

Похибка вимірювання кута визначається як сума похибок кроку двигуна та оптичної системи позиціонування. Це означає, що враховуються похибки пов'язані з кінцевими вимикачами, драйвером і коефіцієнтом перетворення механічного вузла. Останній визначається як співвідношення зміни кута падіння лазерного променя на межі скло-олива до зміни кута повороту валу крокового двигуна, що призводить до відповідної зміни кута падіння.

Розглянемо ці фактори створення похибок по черзі: спочатку для визначення інтенсивності світла, а потім для визначення кута. Розрахуємо відповідні невизначеності. Невизначеність знаходять за формулою:

$$U = \pm x_i / \sqrt{\alpha_i},$$

де α_i – коефіцієнт прийнятого закону розподілу для симетричних границь відносної похибки $\pm x_i$.

При відсутності інформації про закон розподілу вхідної величини невизначеність знаходять при $\alpha_i=3$.

Для визначення похибки струму лазера – абсолютної ΔI_L та відносної δI_L , а також відповідної невизначеності U_{I_L} використаємо табличні дані параметрів мікросхеми LM217LD13TR, яка виконує функцію стабілізатора струму.

Оскільки опорна напруга мікросхеми змінюється в межах $\pm 0,05$ В і має середнє значення 1,25 В, то розрахуємо абсолютну похибку за формулою:

$$\Delta I_L = \frac{U_{оп} + \Delta U_{оп}}{R_{об} - \Delta R_{об}} - \frac{U_{оп}}{R_{об}},$$

де $U_{оп}$ – опорна напруга мікросхеми LM317, $U_{оп} = 1,25$ В;

$\Delta U_{оп}$ – абсолютна похибка опорної напруги, $\Delta U_{оп} = 0,05$ В;

$R_{об}$ – опір обмежувального резистора, $R_{об} = 18$ Ом для номінального струму лазера 70 мА;

$\Delta R_{об}$ – абсолютна похибка опору обмежувального резистора, $\Delta R_{об} = 0,18$ Ом для резистора з допуском 1%.

$$\Delta I_L = \frac{1,25 + 0,05}{18 - 0,18} - \frac{1,25}{18} = \frac{1,3}{17,82} - 0,0694 = 3,6 \text{ мА.}$$

Відносна похибка при цьому дорівнює:

$$\delta I_L = (\Delta I_L / I_{L0}) \cdot 100\% = 5,14\%.$$

При цьому невизначеність струму лазера рівна $U_{I_L} = 0,0297$. Тому,

$$I_L = 70 \pm 3,6 \text{ мА.}$$

7.2 Розрахунок похибки для крокового двигуна

Для визначення коефіцієнту перетворення механічного вузла розрахуємо оптичну геометрію виходячи з заданих в ТЗ характеристик (Таблиця 7.1).

№	Параметр	Розмірність	Значення
1	Діапазон $\Delta\varphi$ критичних кутів для зразків моторних олив, не менше	градуси	60...70
2	Межі основної відносної похибки вимірювання критичних кутів, не більше	%	± 1

Таблиця 7.1 – Вихідні дані для розрахунку

Робоча ось валу має довжину $L=30$ мм, різьблення валу має крок $p = 1$ мм, кількість кроків двигуна складає $n = 400$. Похибка кроку становить $\pm 5\%$, тобто 0,045 градуси, або 2,7 кут. хвилини, або 162 кут. секунди. Похибка початку відліку визначається шириною оптичного вікна кінцевого вимикача, який у нашому випадку дорівнює 0,4 мм (Рисунок 7.1).

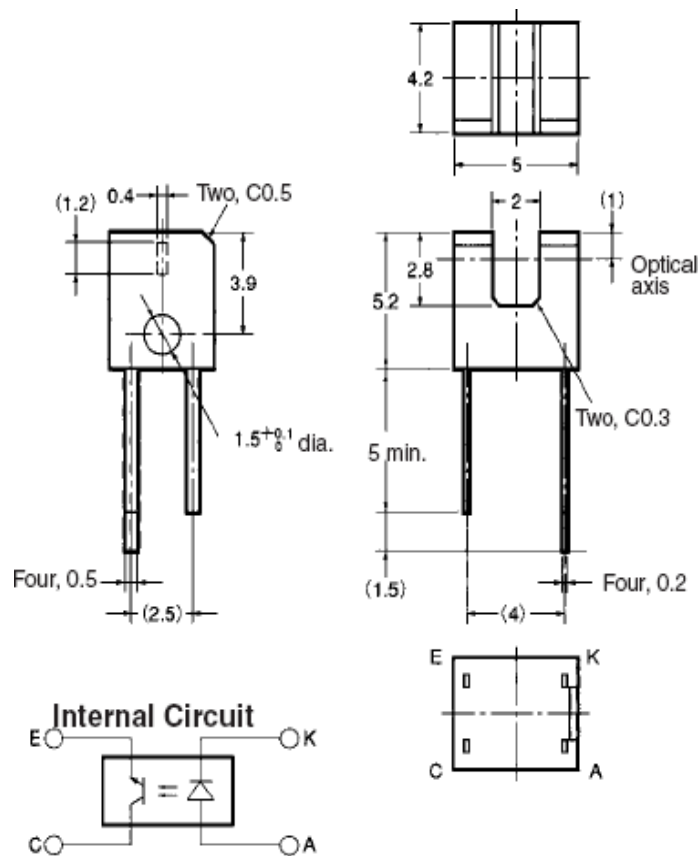


Рисунок 7.1 – Габаритні розміри та схема підключення кінцевого вимикача

Драйвер може пропустити крок на початку роботи, що може призвести до додаткової похибки. Під час оберту валу двигуна штовхач переміщується на один крок різьблення, тобто 360 градусів на 1 мм. Тобто похибка початкового позиціонування виражена в кутовій мірі обертання валу двигуна, що становить $\Delta\theta_{\text{вал}} = 360 \cdot 0,4 = 144$ градуси, що відповідає 160 крокам двигуна або імпульсам генератора.

Так як похибки початкового позиціонування і робота драйвера адаптивні, а похибкою крокового двигуна можна знехтувати, то загальна похибка початкового позиціонування становить ± 80 крок. Для визначення похибки кута падіння розрахуємо геометрію (Рисунок 7.2).

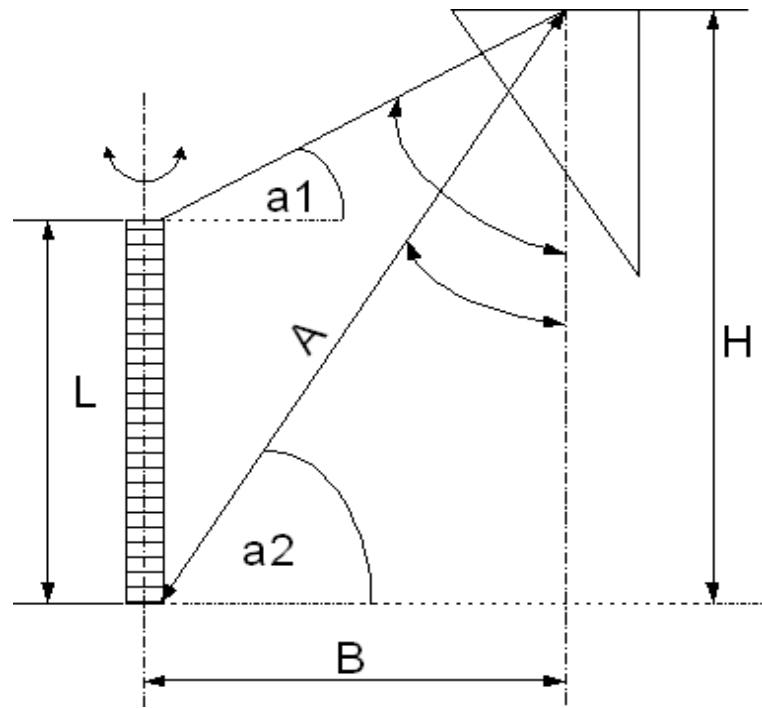


Рисунок 7.2 – Геометрія крокового двигуна

Розраховані значення геометрії наступні:

$H = 81$ мм висота геометрії;

$B = 141$ мм відстань від призми до валу;

$A = 162$ мм відстань до нижньої точки валу; $A_2 = 150$ мм відстань до верхньої точки валу.

1). Кількість обертів валу на робочій ділянці $N_{\text{вал}} = L/p = 30/1 = 30$ обертів;

2). Кількість кроків двигуна на ділянці L : $N_{\text{двиг}} = N_{\text{вал}} \cdot n = 30 \cdot 400 = 12\,000$ кроків;

3). Крок зміни кута падіння світла на призму:

$N_{\text{призм}} = \Delta\phi/N_{\text{двиг}} = (70-60)/12000 = 8,33 \cdot 10^{-4}$ градуси; Крок становить 3 кут.секунди. Тобто один крок двигуна рівний 0,9 кут.градуси змінює кут падіння світла на 3 кут. секунди. У цьому разі коефіцієнт перетворення механічного вузла становить $K=9,26 \cdot 10^{-4}$

Похибку коефіцієнту перетворення обчислюється на основі похибки кроку. Для найбільшого кроку 0,945 кут.градуси, коефіцієнт перетворення складає $8,82 \cdot 10^{-4}$, тоді коефіцієнт з похибкою складає $(9,26 \pm 0,44) \cdot 10^{-4}$.

Враховуючи похибку початкового позиціонування, кут падіння можна обчислити так:

$$\theta = \theta_0 + (N \pm \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} \pm \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot K,$$

де, θ – абсолютне значення кута повороту оптичної лави, градуси; θ_0 – початкове початку кутового діапазону, градуси, $\theta_0 = 60^\circ$; N – кількість поданих імпульсів на драйвер крокового двигуна; ΔN – похибка початкового позиціонування, $\Delta N \pm 80$ кроків;

$N_{\text{к.д.}}$ – номінальний крок крокового двигуна, $N_{\text{к.д.}} = 0,9^\circ$; $\Delta N_{\text{к.д.}}$ – похибка кроку двигуна, $\Delta N_{\text{к.д.}} = 0,045^\circ$;

K – коефіцієнт перетворення механічного вузла, $K = 9,26 \cdot 10^{-4}$.

Розрахуємо значення похибки кутів падіння для початку та кінця діапазону критичних кутів відповідно до ТЗ. Для початку діапазону $N=0$:

$$\theta_{\text{begin}} = \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + (0 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4}$$

$\theta_{\text{begin}} = 60 + 0,07 = 60,07^\circ$. Відносна похибка 0,12%.

Для кінця діапазону 70° необхідно кількість кроків двигуна $N=12000$:

$$\theta_{\text{end}} = \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + (12000 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4}$$

$\theta_{\text{end}} = 60 + 10,571 = 70,57^\circ$. Відносна похибка 0,82%.

Для кінця діапазону $N=6000$:

$$\theta_{\text{mid}} = \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + (6000 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4}$$

$\theta_{\text{mid}} = 60 + 5,32 = 65,32^\circ$. Відносна похибка 0,49%.

З розрахунків видно, що величина похибки залежить від кутового положення. Чим ближче до кінця діапазону в напрямку більших кутів, тим більша похибка. У даному випадку, найбільша невизначеність становить

$$U_{U_{\text{МС}}} = 0,0047.$$

8 ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ

При розрахунку надійності системи потрібно визначити такі показники:

- ймовірність безвідмовної роботи системи за заданий час ($P(t)$);
- параметр потоку відмов (Λ);
- середнє напрацювання до відмови ($T_{\text{серед}}$).

Надійність – властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах.

Ймовірність безвідмовної роботи – ймовірність того, що в межах вказаного періоду часу відмова пристрою не виникає.

Відмова – подія, яка полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

Середнє напрацювання до відмови – це математичне очікування напрацювання об'єкта до першої відмови.

Інтенсивність відмов – умовна щільність імовірності появи відмови.

Виріб використовуватиметься в таких умовах:

- температура повітря 19 °С, відносна вологість повітря 85 %;
- призначений для роботи в закритому приміщенні зі штучно регульованими кліматичними показниками.

Критерієм відмови системи вважається відмова будь-якої її складової частини, що приводить до порушення її працездатності і неможливості використання за призначенням. Відмова будь-якої складової частини системи призведе до відмови системи в цілому. Відновлення роботи системи проводиться методом заміни складової частини, що відмовила.

Розрахунок параметра потоку відмовлень виробу проводиться по формулі:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n N_i \lambda_i \quad (8.1)$$

де n – загальне число групи КВ, що входять до складу проектного виробу; $N_i \lambda_i$ – кількість і інтенсивність відмовлень КВ i -ої групи відповідно.

Інтенсивність відмовлень КВ i -ої групи в робочому режимі визначалася по формулі

$$\lambda_i = \lambda_{oi} a_i \dots a_n \quad (8.2)$$

де λ_{oi} – інтенсивність відмовлень КВ в номінальному режимі і нормальних умовах; $a_i \dots a_n$ – поправочні коефіцієнти, що враховують умови роботи (кліматичні і механічні впливи в залежності від призначення й умов майбутньої роботи), електричне навантаження КВ і температуру навколишнього середовища, ступінь інтеграції інтегральних мікросхем, а також співвідношення видів відмовлень.

Конкретні формули, по яких визначалися інтенсивність відмовлень кожної групи комплектуючих виробів, приведені в таблиці 8.2. Величини значень визначилися по довідковим даним з врахуванням вихідних даних для проектного виробу.

По формулі (8.1) визначаємо потік відмовлень виробу:

$$\Lambda = 13,254 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t визначалася по формулі

$$P(t) = e^{-\Lambda t} \quad (8.3)$$

де Λ – параметр потоку відмовлень; t – час роботи виробу (год)

Дані розрахунку $P(t)$ приведені в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1

Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t

250	500	750	1000	2000	5000	8000	10000
0,9967	0,9934	0,9054	0,9868	0,9738	0,9359	0,8994	0,8759

Середній наробіток до відмовлення виробу визначався по формулі:

$$T_0 = \Lambda^{-1} \quad (8.4)$$

Підставляючи дані в формулу (8.4) одержимо

$$T = (13,254 \cdot 10^{-6})^{-1} = 75200 \text{ Г.}$$

Рис. 8.1 Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t

Таблиця 8.2

Перелік комплектуючих виробів

[illegible]

9 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час розробки та експлуатації аналізатора дисперсного складу рідин оптичними методами важливо забезпечити відповідність умов праці чинним нормам безпеки, з урахуванням потенційних фізичних, електричних та оптичних факторів ризику.

Основними джерелами потенційної небезпеки є електричне обладнання, оптичні компоненти (лазерне випромінювання), а також можливість контакту з хімічними речовинами при підготовці зразків. Для запобігання ураженню електричним струмом усі елементи живлення повинні мати відповідну ізоляцію, захисне заземлення, а корпус пристрою – бути виготовленим із діелектричних або заземлених матеріалів. Забороняється експлуатація обладнання при порушенні цілісності ізоляції чи за відсутності захисного заземлення.

При використанні лазерного джерела світла необхідно дотримуватись правил роботи з лазерними пристроями, що включає застосування захисних окулярів, екранування випромінювання, використання закритих оптичних каналів і відповідне маркування робочої зони. Категорично заборонено прямий візуальний контакт з лазерним променем.

Робоче місце має бути організоване відповідно до ергономічних вимог: достатнє освітлення (не менше 300 лк), провітрюваність, температура в межах 18–25 °С. Рівень шуму від вентиляторів та приладів не повинен перевищувати допустимих значень згідно з ДСН 3.3.6.037–99.

З метою зниження ризику травматизму передбачено інструктаж з охорони праці, навчання персоналу безпечному використанню обладнання та наявність засобів первинного пожежогасіння (вогнегасник ВВК-2 або аналогічний) у приміщенні.

Всі роботи з електронними схемами, налаштуванням оптичної системи та програмуванням проводяться на спеціально обладнаному робочому місці, з дотриманням правил електробезпеки, техніки безпеки та санітарно-гігієнічних норм.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено комп'ютеризовану систему збору, обробки та візуалізації результатів аналізу дисперсного складу рідин із використанням оптичного методу.

Апаратна частина включає оптичний сенсорний модуль та мікроконтролер STM32F103, який виконує керування вимірювальним процесом, обробку сигналів і передачу даних. Похибка вимірювального каналу становить 0,2 %, що забезпечує високу точність аналізу. Надійність системи оцінюється на рівні 75450 годин безвідмовної роботи, що відповідає вимогам до тривалого використання в лабораторних і промислових умовах. Розраховані технічні характеристики повністю відповідають вимогам технічного завдання.

У складі графічного матеріалу подано структурну схему, принципову електричну схему та перелік елементів.

Для програмного забезпечення наведено вихідний код прошивки для STM32F103, а також блок-схеми алгоритмів, реалізованих у системі. Розроблена система дозволяє відстежувати зміну дисперсного складу рідини в реальному часі, що може бути корисним для контролю якості, проведення наукових досліджень, екологічного моніторингу та використання в різних галузях, зокрема у фармацевтиці та харчовій промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Hall-effect sensors: theory and applications [Tutorial] Ramsden, Edward; Elsevier – USA, 2006 – 272 p.
- 2) Dictionary of algorithms and data structures. Gray's code [Collection of scientific publications] Black, Paul E; NIST, 2004.
- 3) П. А. Красовський, О.В. Карпов, Д.М. Балаханов, Е.В. Лісників О.В. Карпов // Вимірювальна техніка - 2009. -№ 5. - С. 8-14.
- 4)Таранов В. В. Розмірний спектр мікрогених структур як фізико-хімічний стан рідинної системи /В. В. Таранов// Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2017. – Вип. 3(66) – С. 93- 94.
- 5)Wilson, R. G. Fourier Series and Optical Transform Techniques on Contemporary Optics: An Introduction, John Wiley & Sons, New York, 1995, pp. 124-128.
- 6)Riefler N., Wriedt Th. Intercomparison of Inversion Algorithms for Particle-Sizing Using Mie Scattering. Particle & Particle Systems Characterization. Vol. 25, Issue3. September 14, 2008. pp. 216-220.
- 7)ISO 13320-1: 1999. Particle size analysis. Laser diffraction methods. Pt. 1: General principles. ; ISO 22412: 2008. Particle size analysis. Dynamic light scattering (DLS).
- 8)F. Yang // Physics Examination and Testing. -2005. - V. 23. - № 5. - P. 36- 39.
- 9)Защепкіна Н.М. Застосування люмінесцентних методів аналізу в експрес-метрії сортів якостей моторних олив. /Н.М. Защепкіна, В.В. Таранов, О.А. Наконечний, М.О.Музика// Міжнародна науково- технічна конференція «Інженерія та технології: наука, освіта, виробництво». м. Луцьк, 15-15 листопада 2018 р. ЛНТУ. – С. 91-94.
- 10) User manual STM32 Nucleo-64 boards // STMicroelectronics [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105823-stm32-nucleo64-boards-mb1136-

stmicroelectronics.pdf - вільний (дата звернення: 22.02.2022)

11) Annual Reports & Proxies // Schlumberger - Investor Center [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://investorcenter.slb.com/static-files/c6adfd3f-5bf4-43bf-9794-04c52433c474> - вільний (дата звернення: 06.06.2022)

12) Міжнародний стандарт ІС CSR-08260008000 "Соціальна відповідальність організації. Вимоги" М.: ВОК, - 2011, - 36 с.

13) Соколевський І.О., Подчашинський Ю.О., Чепюк Л.О. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для визначення складу рідин оптичними методами. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 12–17 травня 2025 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2025. С. 33. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/2.pdf>