

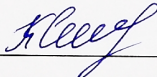
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Система контролю чистоти виробів електронної техніки

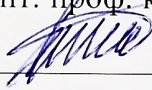
Виконала: студ. 2-го курсу, гр. ЛТО–23м
спеціальності 175 Інформаційно-
вимірювальні технології

 Матвійчук В. Л.

Керівник: д-р філос., ст. викл. каф. БМІОЕС

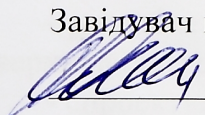
 Карась О. В.

Опонент: проф. каф. ІРТС, д.т.н., професор

 Семенов А. О.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри БМІОЕС

 к. т. н., доц. Коваль Л. Г.

« 17 » 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
Освітньо-професійна програма «Лазерна техніка та оптоінформатика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри БМІОЕС

 Л. Г. Коваль

« 17 » 09 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Матвійчук Валерії Леонтіївни

1. Тема роботи: Система контролю чистоти виробів електронної техніки.
Керівник роботи: Карась О. В., доктор філософії,
затверджені наказом ВНТУ від «17» вересня 2024 року № 310.

2. Строк подання студентом роботи «29» листопада 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи:

- методи визначення технічної чистоти згідно зі стандартом ISO 16232;
- цифрові зображення фільтру, що одержують з камери;
- програмні засоби: Python, мови C або Java;
- обладнання: мікроскоп, цифрова камера, ПК.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

- проаналізувати методи і засоби визначення технічної чистоти і вимоги до них;
- розробити або вдосконалити метод оброблення цифрових зображень поверхні фільтра для визначення зображень частинок забруднення;
- спроектувати інформаційну систему контролю технічної чистоти;
- оцінити ефективність інформаційної системи контролю технічної чистоти.

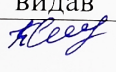
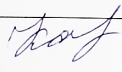
5. Перелік ілюстративного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів):

- процес визначення технічної чистоти;
- оцінювання розмірів частинок;
- метод визначення частинок за зображеннях;
- структура системи контролю технічної чистоти;
- алгоритм роботи системи.

6. Зміст текстової частини:

- аналіз методів і засобів визначення технічної чистоти;
- метод визначення і класифікації зображень частинок;
- архітектура системи для контролю чистоти виробів електронної техніки;
- дослідження методу і системи контролю технічної чистоти;
- економічна частина.

7. Консультанти розділів роботи

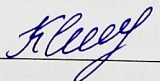
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Карась О. В., д-р філос., ст. викл. каф. БМІОЕС		
Економічна частина	Кавецький В. В., к. е. н., доцент. каф. ЕП та ВМ		

8. Дата видачі завдання «18» вересня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Г
Постановка задачі дослідження	до 17.09.2024	
Розробка технічного завдання	до 30.09.2024	
Аналіз методів і засобів визначення технічної чистоти	до 4.10.2024	
Розроблення методу визначення і класифікації зображень частинок	до 25.10.2024	
Розроблення архітектури системи для контролю чистоти виробів електронної техніки	до 8.11.2024	
Дослідження методу і системи контролю технічної чистоти	до 22.11.2024	
Виконання економічного розділу	до 29.11.2024	
Попередній захист	29.11.2024	
Нормоконтроль МКР	10.12.2024	
Рецензування МКР	13.12.2024	
Захист МКР	19-20.12.2024	

Студентка  Валерія МАТВІЙЧУК

Керівник роботи  Олександр КАРАСЬ

АНОТАЦІЯ

УДК 681.2.08:004.9

Матвійчук В, Л. Система контролю чистоти виробів електронної техніки : магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 175 Інформаційно-вимірювальні технології, освітньо-професійна програма «Лазерна техніка та оптоінформатика». – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 105 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 41 найм.; 18 рис.; 16 табл.

Мета магістерської роботи полягає в удосконаленні процесу визначення технічної чистоти виробів електронної техніки шляхом автоматизації виявлення частинок забруднення на цифрових мікрофотографіях поверхні фільтрів. Для досягнення мети були проаналізовані методи і засоби визначення технічної чистоти, удосконалено метод автоматичного визначення частинок на зображеннях, розроблена структура системи контролю технічної чистоти з використанням металографічного мікроскопа, цифрової камери, крокових двигунів та комп'ютера, проведені її дослідження, що показало високу ефективність системи, а також розраховані техніко-економічні показники впровадження цієї науково-технічної розробки у виробництво.

ABSTRACT

UDC 681.2.08:004.9

Matviichuk V. L. System for electronic products' cleanliness control : master's thesis on specialty 175 Information and measuring technologies, educational and professional program «Laser technology and optoinformatics». – Vinnytsia : VNTU, 2024. – 105 p.

Ukraine language Bibliography: 41 titles; 18 Figs.; 16 tables.

The purpose of the master's thesis is to improve the process of determining the technical cleanliness of electronic products by automating the detection of contamination particles on digital micrographs of the filter surface. To achieve the goal, methods and means of determining technical cleanliness were analyzed. The method of automatic detection of particles on images was improved. The structure of the technical cleanliness control system was developed using a metallographic microscope, a digital camera, stepper motors and a computer. The system was investigated in a research, which showed the high efficiency of the system. The technical and economic indicators of the implementation of this scientific and technical development into production were calculated.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ЧИСТОТИ	8
1.1 Регламентація контролю технічної чистоти.....	9
1.2 Вибір методу визначення технічної чистоти	12
1.3 Методи екстракції	15
1.4 Фільтрування і висушування	17
1.5 Методи аналізу	19
1.6 Висновок до розділу 1	24
2 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ЧАСТИНОК	25
2.1 Визначення шляхів удосконалення методу.....	25
2.2 Одержання зображень	26
2.3 Виявлення частинок забруднення	28
2.4 Удосконалення методу визначення частинок	30
2.5 Висновок до розділу 2	34
3 АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЧИСТОТИ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ.....	36
3.1 Синтез системи контролю технічної чистоти	36
3.2 Мікроскопічна система для одержання зображень фільтра	39
3.3 Програмне забезпечення системи	44
3.4 Висновок до розділу 3	47
4 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ І СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОЇ ЧИСТОТИ	49
4.1 Оцінювання ефективності системи контролю технічної чистоти	49
4.2 Метрологічні показники системи.....	51
4.2.1 Роздільна здатність	51
4.2.2 Контрастність	51
4.2.3 Точність.....	52
4.2.4 Достовірність.....	55

4.3 Висновок до розділу 4	56
5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	57
5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки	57
5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки	60
5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи	62
5.3.1 Витрати на оплату праці.....	62
5.3.2 Відрахування на соціальні заходи.....	65
5.3.3 Сировина та матеріали.....	66
5.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі	67
5.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	67
5.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	68
5.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	69
5.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	70
5.3.9 Службові відрядження.....	71
5.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	72
5.3.11 Інші витрати.....	72
4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	72
5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором	73
5.5 Висновки до розділу 5	78
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
Додаток А (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	87
Додаток Б (обов'язковий) Технічне завдання	89
Додаток В (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	94
Додаток Г (довідковий) Лістинг програми	99

ВСТУП

Актуальність. Технічна чистота – це поточний рівень наявності різних забруднень на внутрішніх та/або зовнішніх поверхнях технічних об'єктів [1]. Електронні пристрої, такі як елементи живлення, компонентна база, друковані плати чутливі до забруднень, тому контроль їх чистоти є обов'язковим етапом процедур забезпечення якості виробництва.

Контроль технічної чистоти важливий в багатьох галузях, таких як електроніка, хімічна промисловість, медицина, де наявність навіть невеликих домішок або забруднень може призвести до проблем у функціонуванні приладів, виробництві матеріалів або виникнення загрози для життя або здоров'я людей.

Мета контролю технічної чистоти – переконатися, що кількість та розміри сторонніх частинок, які можуть знаходитись на поверхні об'єкта, не перевищують встановлені норми [2].

На багатьох виробництвах контроль чистоти досі залишається неавтоматизованим, тобто його проводить інженер з контролю якості, оглядаючи поверхню електронних компонентів під мікроскопом або вивчаючи цифрові мікрофотографії змивів з поверхні об'єкта. Такий підхід вимагає витрат людського та часового ресурсу на виробництві.

Водночас вартість існуючих систем для автоматизованого контролю технічної чистоти (таких виробників як Olympus, NanoScience Instruments, Leica Microsystems, Motic) досягає десятків тисяч доларів, що робить їх важкодоступним обладнанням для виробництв на початковому етапі розвитку або стартап-проектів.

Тому розроблення системи автоматизованого визначення технічної чистоти, яка матиме доступну ціну та забезпечуватиме ефективне виявлення забруднень у відповідності до чинних стандартів, є актуальною науково-технічною задачею, а відсутність в Україні вітчизняних виробників подібних систем лише підвищує потенційний попит на таку продукцію.

Мета роботи – удосконалення процесу визначення технічної чистоти виробів електронної техніки шляхом автоматизації виявлення частинок забруднення на цифрових мікрофотографіях поверхні фільтрів.

Завдання дослідження:

- 1) проаналізувати методи і засоби визначення технічної чистоти;
- 2) розробити метод визначення і класифікації зображень частинок забруднення на мікрофотографіях поверхні фільтра;
- 3) розробити автоматизовану систему контролю технічної чистоти виробів електронної техніки на базі неспеціалізованого мікроскопа;
- 4) провести дослідження методу і системи контролю технічної чистоти, оцінити її метрологічні характеристики.

Об'єкт дослідження – процес визначення технічної чистоти виробів електронної техніки.

Предмет дослідження – метод і система для автоматизованого визначення і контролю рівня технічної чистоти виробів електронної техніки.

Наукова новизна одержаних результатів: в роботі удосконалено метод оброблення мікроскопічних зображень мембран фільтрів при визначенні технічної чистоти шляхом поєднання статистичної і нечіткої обробки матриць зображень за ознакою інтенсивності, що дозволило автоматизувати процес визначення частинок забруднення.

Практичне значення результатів роботи:

- 1) розроблено алгоритм визначення частинок забруднення на зображеннях фільтрувальних мембран;
- 2) розроблено структуру автоматизованої системи визначення технічної чистоти виробів електронної техніки на базі металографічного мікроскопа.

Апробація та публікації. Результати, одержані в магістерській кваліфікаційній роботі, були представлені на III Міжнародній науково-практичній конференції «Вища технічна освіта XXI століття: виклики, проблеми, перспективи» (13 грудня 2024 року), Донбаська національна академія будівництва і архітектури, місто Івано-Франківськ, Україна). За підсумками конференції

опубліковані матеріали доповіді «Інформаційна технологія визначення технічної чистоти виробів електронної техніки» [2].

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ЧИСТОТИ

Визначення технічної чистоти (або просто технічна чистота) – це один з важливих напрямків забезпечення якості продукції, яка широко використовується в різних галузях промисловості. Незважаючи на те, що здебільшого технічна чистота асоціюється з виробництвом автомобілів, аналіз рівня технічної чистоти активно впроваджується у процеси виготовлення електроніки, медичних пристроїв, в аерокосмічному виробництві [1]. Саме в цих галузях дрібні частинки, якщо їх не контролювати, становлять загрозу для безпеки та якості кожного компонента.

Сьогодні велику увагу надається технічній чистоті в електроніці, так як вимоги до якості і надійності електронних пристроїв постійно зростають при зниженні їх вартості [3]. До того ж відбувається мікромініатюризація електронних компонентів, збільшується питома потужність електронних пристроїв. Тому навіть незначне забруднення може істотно підвищити ймовірність порушення роботи або вихід з ладу виробу.

Процес визначення технічної чистоти регламентовано міжнародним стандартом ISO 16232, який встановлює вимоги до контролю технічної чистоти, зокрема до виявлення, аналізу та оцінювання частинок забруднень [4]. Цей стандарт використовується при виробництві автомобілів, електронної та оптичної техніки, де чистота компонентів впливає на їхню функціональність.

До електронних компонентів, на які поширюються стандарти технічної чистоти, належать інтегральні схеми, друковані плати, мікропроцесори, конденсатори та резистори, роз'єми та кабелі, модулі пам'яті, блоки живлення тощо [5].

Забруднюючі частинки можуть спричинити значне погіршення роботи кінцевого продукту, а в найгіршому випадку – повну несправність. Непрямі втрати включають додаткові ресурси, необхідні для вирішення проблем і шкоду, заподіяну репутації продукту та компанії-виробника. Тому для забезпечення якості продукту необхідно дотримуватись суворих стандартів технічної чистоти, оскільки витрати внаслідок забруднення можуть бути дуже значними.

1.1 Регламентация контролю технічної чистоти

Контроль технічної чистоти забезпечує те, що виготовлені деталі або електронні компоненти відповідають галузевим стандартам. Технічна чистота оцінюється кількісно (визначається, яка кількість частинок забруднення присутня на об'єкті контролю) та якісно (визначається тип частинок забруднення або домішок, тобто їх природа і склад).

Під час виробничого процесу деталі можуть проходити різні етапи та технологічні операції, такі як різання, полірування, шліфування, напилення, зварювання, з'єднання паянням тощо. Ці процеси з певною імовірністю призведуть до утворення залишків і сторонніх часток, які можуть залишатися на деталях або компонентах, що вимагає їх подальшого ретельного очищення.

Термін «технічна чистота» широко застосовується і асоціюється з автомобільною промисловістю, але вимоги до чистоти у відповідності зі стандартами використовуються і в інших сферах, в тому числі й в електроніці [5, 6].

Існує багато міжнародних стандартів, які можуть допомогти виробникам ефективно керувати технічною чистотою. Одним із найважливіших стандартів є ISO 16232 Міжнародної організації стандартизації [7]. У цьому об'ємному документі описано, як застосовувати методи визначення забруднюючих частинок до компонентів і систем автомобільної промисловості. Іншим стандартом для кількісного визначення твердих забруднювачів на деталях в автомобільній промисловості є VDA 19 Німецької асоціації автомобільної промисловості. Ці стандарти призначені для надання інформації про те, як визначати технічну чистоту, як покращити порівнянність результатів інспекції чистоти та визначити дії, коли граничні значення чистоти перевищено. Протоколи щодо контролю чистоти також повинні враховувати всю виробничу систему, в яку включені електронні компоненти, що робить непрактичним визначення граничних значень для окремих компонентів [8]. Щоб зробити результати аналізу порівнянними, стандарт ISO 16232 визначає тип і випробувальний об'єм екстракційної рідини,

метод збору забруднюючих речовин і параметри інструментів для аналізу. Аналіз чистоти виконується під час первинної перевірки та оцінки або на етапах контролю якості у виробничому процесі, таких як очищення або обробка поверхні, складання композитного блоку або деталі [9].

Сучасні електронні компоненти та системи чутливі до присутності одиничних або певної кількості частинок критичного розміру [4]. Частинки, такі як пісок, неметалевий і металевий пил або стружка, що затрималась після обробки, залишки абразиву, органічні та інші сторонні забруднення можуть мати негативний вплив на належне функціонування електронного компонента або вузла, зокрема через їх руйнівний вплив, підвищений знос або швидке виникнення корозії [10].

Стандарт ISO 16232 найширше використовується у всьому світі [1], тому саме цей стандарт доцільно взяти за основу при виконанні цієї роботи.

Цей стандарт визначає вимоги до контролю технічної чистоти компонентів, зокрема до виявлення, аналізу та оцінювання частинок забруднень, які можуть заподіяти механічний, електричний або хімічний вплив на компоненти.

Стандарт визначає методи екстракції, тобто зняття забруднень з об'єктів контролю: промивання (тобто використання рідини для змивання частинок), ультразвукове очищення (екстракція частинок завдяки впливу ультразвуковими коливаннями), продування газом (видалення частинок струменем газу), механічні вібрації (струшування або інші вібраційні методи) [4]. Крім того, стандарт дозволяє адаптувати класи чистоти до потреб конкретного виробника або галузі.

ISO 16232 регламентує способи аналізу частинок забруднення. Серед них визначення розмірів частинок за допомогою оптичної або електронної мікроскопії, кількісний аналіз і розподіл частинок за розмірами, визначення хімічного складу частинок (зокрема для ідентифікації типу забруднення використовується енергодисперсійний рентгенівський спектроскопічний аналіз – EDXA) [4]. Визначаються загальні вимоги до технічних процедур і ведення документації, зокрема передбачено використання контрольних списків для уніфікації підходів до оцінювання технічної чистоти.

Також важливими є встановлені вимоги до середовища, а саме забезпечення відповідної чистоти повітря та умов у приміщеннях, де проводиться аналіз технічної чистоти, а також контроль можливих джерел додаткового забруднення під час досліджень.

Відповідно до стандарту, звітність після контролю технічної чистоти повинна включати: опис методів екстракції забруднень, методів аналізу, дані про кількісний розподіл частинок за розмірами, тип забруднень (металеві, неметалеві, органічні частинки) [4].

Згідно зі стандартом контролюються частинки розміром від 15 мкм до 1000 мкм [11], але в деяких випадках присутність навіть частинок розміром до 5 мкм може призвести до пошкодження компонентів [12]. Рівень допустимих типів і розмірів часток визначається з для кожного електронного компонента окремо.

Забезпечення належного рівня чистоти будь-якого продукту вимагає знання всього виробничого процесу та точної інформації про забруднення, що дозволить ідентифікувати їх джерела. Щоб уникнути забруднень, необхідно знати про всі операції в процесі виробництва, які впливають на рівень чистоти продукту. Це призводить до суворих вимог до виробничих режимів, включаючи складальні операції в чистих зонах, окремо від виробничих ліній або навіть в окремих чистих приміщеннях. Ці вимоги базуються на інженерних потребах, тобто електронний компонент повинен бути настільки чистим, наскільки це потрібно, і не обов'язково більш чистим [1], тому що кожна додаткова операція очищення пов'язана з додатковими витратами часу та виробничих потужностей.

Щоб отримати інформацію про рівень чистоти компонента, необхідні лабораторні дослідження в спеціальних чистих приміщеннях. Отримання достовірної інформації вимагає дотримання багатьох факторів, зокрема:

- вибір належної техніки екстракції та збирання частинок забруднення;
- правильні параметри екстракції,
- перевірка процедури вилучення (зниження продуктивності),
- методи аналізу частинок.

Аналітичні методи, що використовуються для визначення чистоти [13]:

- гравіметричний аналіз (загальна кількість усіх частинок, зібраних із компонента, виражена в мг/компонент, мг/см² або мг/см³);
- оптична мікроскопія (гранулометрія, що передбачає визначення кількості, розмірів і типів частинок, включаючи поділ на металеві, неметалеві та волокнисті частинки);
- скануюча електронна мікроскопія (SEM), яка дозволяє визначати елементний склад і твердість частинок.

Таким чином, виконання вимог цього стандарту ISO 16232:2018 мінімізує ризики передчасного виходу виробів електронної техніки з ладу через забруднення в процесі виробництва.

1.2 Вибір методу визначення технічної чистоти

Контроль технічної чистоти виробу електронної техніки починається одразу після того, як електронний компонент виходить з виробничої лінії, адже належний рівень чистоти повинен бути забезпечений до відвантаження споживачам.

Щоб електронний компонент не отримав додаткових забруднень на шляху до лабораторії, його необхідно належним чином захистити та упакувати. Це особливо важливий крок, тому що потрібно забезпечити збереження всіх частинок, які залишились після виробничого процесу, і уникнути нанесення сторонніх частинок в ході переміщення. Це необхідно, щоб зробити правильний висновок про стан усього процесу та за потреби розробити рекомендації щодо його подальшого вдосконалення [1]. Для цього необхідна інформація щодо речовин та джерел потенційного стороннього забруднення. Таким чином, приміщення лабораторії, в якому проводиться перевірка, має забезпечувати належний рівень чистоти, щоб уникнути перехресного забруднення досліджуваного об'єкта та фільтрів сторонніми частками. Такі лабораторії називаються чистими кімнатами і можуть також використовуватися на виробничих лініях, якщо наявні суворі вимоги щодо рівня чистоти вироблених приміщень. Стан таких приміщень регламентується стандартом ISO 14644-1 [14] та згідно з ним кодуються від класу 1 (найбільш суворі

вимоги) до класу 9 (найменш суворі) чистих приміщень. Ще на етапі проектування електронних компонентів і розроблення виробничої лінії необхідно розуміти і знати вимоги до чистоти, яку потрібно забезпечити і контролювати за допомогою відповідних методів і засобів.

Необхідно встановити такі вимоги до чистоти:

- допустимий тип частинок: металеві, неметалеві, волокнисті, тверді або м'які частинки;
- допустимі розміри (максимальний розмір частинок);
- допустима кількість частинок на одиницю площі поверхні виробу;
- додаткові вимоги до частинок (хімічний склад, твердість, висота, площа поверхні тощо).

Незважаючи на велику кількість методів екстракції, типів сіток і фільтрів, що використовуються для збору частинок, а також різноманітність аналітичних методів, процедуру очищення можна описати кількома загальними кроками [9]. Основними етапами є: підготовка обладнання та фільтрів, перевірка нульового рівня, процедура очищення, гравіметричний аналіз, мікроскопічний аналіз, підготовка звіту про дослідження.

Контроль технічної чистоти використовує непряме вимірювання, оскільки вимагає перенесення частинок з аналізованої поверхні на фільтр, і саме фільтр підлягає детальному аналізу. Таке перенесення необхідне, оскільки візуальний огляд внутрішньої поверхні компонента зазвичай ускладнений через геометрію об'єкта, основний матеріал, візуальну схожість компонента із забрудненнями, шорсткість поверхні тощо. Вибір правильного методу екстракції має вирішальне значення для отримання надійної інформації щодо рівня чистоти. Метод екстракції повинен забезпечувати транспортування всіх частинок з досліджуваної поверхні на фільтр. Незважаючи на те, що в реальному процесі не забезпечує перенесення всіх частинок, тому що деякі з них залишаються на досліджуваному об'єкті, в обладнанні для екстракції або проходять крізь сітку фільтра, екстракція вважається достатньою, якщо дозволяє зафіксувати не менш як 90 % забруднень [4].

При виборі методу екстракції до уваги слід брати такі фактори [1]:

- яка поверхня підлягає випробуванню: зовнішня, внутрішня або повна;
- розмір і геометрія досліджуваного об'єкта;
- рівень адгезії матеріалу та частинок.

На основі визначених характеристик досліджуваного об'єкта (розмір, геометрія) вибирають метод екстракції:

- методи рідинної екстракції: занурення, ультразвуковий, промивання під тиском, внутрішнє промивання;
- методи газової (повітряної) екстракції: струменевий, наскрізний.

Залежно від необхідного рівня чистоти видалені частинки можна аналізувати за допомогою:

- швидкого аналізу з використанням рідинних лічильників частинок або камери (рідко застосовується в лабораторії);
- стандартний аналіз, який включає гравіметричний та мікроскопічний аналіз;
- розширений аналіз, який може включати такі методи, як скануюча електронна мікроскопія з енергодисперсійною рентгенівською спектроскопією (SEM-EDX), лазерно-індукована спектроскопія пробой (LIBS), раманівська спектроскопія, інфрачервона спектроскопія або рентгенівська спектроскопія, променева томографія [1].

Окремим випадком є аналіз чистоти, який зосереджується на рідких або жирних забрудненнях на досліджуваній поверхні. У деяких випадках присутність сторонньої рідини є більш небезпечною для компонента, ніж сторонні частинки, оскільки це може призвести, наприклад, до зниження тертя сполучених частин або несправності електронних пристроїв. У цьому випадку найважливішим кроком є вибір екстракційної рідини, яка повинна бути здатною розчиняти або видаляти таку речовину з поверхні. Водночас розчинник повинен бути досить чистим і летким, щоб забезпечити його швидке випаровування без утворення будь-яких залишків, які можуть вплинути на результати. Типовими аналітичними методами, які можуть використовуватись після рідинної екстракції такого забруднення, є інфрачервона

спектроскопія або хроматографічні методи, такі як газова хроматографія, високоефективна рідинна хроматографія або іонна хроматографія [1].

1.3 Методи екстракції

Промивання під тиском є найпоширенішим методом екстракції, оскільки його можна легко застосовувати як для зовнішнього, так і для внутрішнього очищення поверхонь, якщо поверхні легкодоступні [15]. Він також може бути застосований для одночасного дослідження кількох невеликих компонентів, якщо вони характеризуються простою геометрією. Важливими факторами, що впливають на ефективність цього методу, є [1]:

- форма сопла пістолета для промивання під тиском (використання різних форм може бути корисним для компонентів залежно від площі або геометрії їх поверхні);
- характеристики екстракційної рідини (наприклад, в'язкість, що забезпечує належне зволоження і швидке відведення з поверхні) і швидкість потоку;
- кут і відстань між соплом і поверхнею об'єкта;
- час екстракції та кількість повторів на одиницю площі поверхні.

У разі промивання під тиском частинки змиваються завдяки імпульсу, який передається від струменя. Ця техніка є дуже гнучкою і дозволяє видаляти забруднення навіть із невеликих порожнин, якщо інші поверхні належним чином закріплені. Крім того, цей метод дуже ефективний для очищення багатозонних об'єктів, зони яких необхідно оцінювати окремо.

У разі використання ультразвукового методу екстракції частинки відриваються від поверхні завдяки періодичному високому піковому тиску, що утворюються під час розривів кавітаційних бульбашок. Цей метод використовують для об'єктів з простою геометрією, він ідеально підходить, коли потрібно перевірити всю поверхню компонента. Однак, більш геометрично складні об'єкти з порожнинами можуть бути піддані такому способу очищення тільки якщо при виборі параметрів екстракції враховуються діаметри отворів і об'єм порожнин. В

цілому бажано, щоб досліджуваний об'єкт мав достатньо великі зазори, щоб гарантувати, що відокремлені частинки не залишаться на його поверхні через будь-які сферичні бар'єри [16]. Цей метод може мати небажаний вплив на поверхню об'єкта, оскільки неправильні параметри можуть призвести до пошкодження поверхні або матеріалу, особливо у випадку поверхонь з покриттям. Чим нижча частота ультразвуку, тим сильніші сили впливають на частинки й тим ефективнішим стає очищення. Тому найважливішими факторами для проведення ефективної процедури ультразвукової чистки є: частота і щільність ультразвуку, розташування ультразвукових генераторів, орієнтація досліджуваного об'єкта відносно ультразвукового джерела, тип і температура досліджуваної рідини, час екстракції.

Метод внутрішнього промивання передбачає, що компонент заповнюється рідиною в турбулентному потоці, що забезпечує належне видалення частинок. У разі застосування цього методу слід уважно поставитися до вибору: екстракційної рідини та її витрат, часу екстракції, частоти пульсації, руху компонента (в разі потреби); враховувати геометрію електронного компонента та з'єднання між частинами компонента.

Варто зауважити, що при використанні внутрішнього промивання ризик спотворення результатів вимірювань забрудненнями із зовнішньої поверхні мінімальний [1].

У разі дослідження внутрішньої поверхні компонентів зі складною геометрією та порожнинами, до яких важко дістатися промиванням під тиском, ультразвуковим методом або внутрішнім промиванням, можна використовувати простий, але ефективний метод перемішування [4]. Перемішування частково зануреного у екстракційну рідину компонента дозволяє рідині досягати найбільш важкодоступних зон і забезпечувати можливість відриву частинок забруднень за рахунок сили, що діє з різних напрямків і під різними кутами. Відокремлені частинки суспендують у досліджуваній рідині. Залежно від ваги та об'єму об'єкта можна використовувати ручне або автоматичне перемішування. Ефективність цього відносно простого методу пов'язана з: властивостями екстракційної рідини

та її об'ємом, часом, тривалістю, амплітудою та частотою перемішування, а також кількістю занурень об'єкта у рідину.

Для деяких компонентів, які не призначені для контакту з рідинами або можуть бути пошкоджені таким контактом, слід застосовувати газову екстракцію. Можна використовувати два методи, подібні до описаних вище внутрішнього промивання та промивання під тиском. Перший з них називається повітряно-струменевим видаленням і може ефективно використовуватися для очищення електронних компонентів, з яких тверді частки не можуть бути вилучені методом потоку рідини. Принцип цього методу, а також фактори, що впливають на його ефективність, такі ж, як і при промиванні рідиною під тиском [1]. Цю процедуру екстракції слід проводити в герметично закритій шафі. Забруднення, що відокремилися від досліджуваної поверхні, прилипають до стінок зволоженої шафи, а на наступному етапі промиваються та фільтруються. Другий спосіб відведення повітря – продування повітрям, аналогічне внутрішньому промиванню рідиною. Потік повітря відриває частинки від внутрішньої поверхні досліджуваного об'єкта, які потім іммобілізуються на мембранах з великою поверхнею, що можуть витримувати високу швидкість потоку повітря [1]. Для того, щоб мати можливість виконувати аналіз забруднення, зібрані частки переміщуються в кінцевий фільтр за допомогою промивання під тиском.

1.4 Фільтрування і висушування

Щоб здійснити аналітичне дослідження наявності частинок забруднення, їх необхідно відокремити від досліджуваної рідини, в якій вони суспендовані після змивання. Ця процедура проводиться шляхом вакуумного фільтрування на різних типах фільтрів і сіток. Їх вибір залежить від необхідного рівня чистоти, здатності утримувати частинки, типу використовуваної екстракційної рідини, хімічної стійкості, а також оптичних характеристик частинок [17].

Незважаючи на хімічну стійкість до екстракційної рідини, найважливішим є правильний вибір пористості фільтра [1]. Фільтр, що використовується для фіксації

частинок, повинен затримувати найдрібніші частинки, які знаходяться в рідині. Необхідно враховувати, що частинки зазвичай мають неправильну форму і їх диференціація базується на найбільшому діаметрі. З цієї причини фактична пористість фільтра повинна бути значно нижчою за діаметр найменшої частинки, що представляє інтерес в ході дослідження. Для стандартного гравіметричного та мікроскопічного аналізу, де аналізуються забруднювачі розміром понад 50 мкм, рекомендується використання поліефірних (тобто поліетилентерефталатних, PET) фільтрів з пористістю 5 мкм [1].

Загалом можна використовувати мембранні або сітчасті фільтри, які мають свої переваги та недоліки. У випадку спіненої мембрани, яка завдяки своїй гладкій поверхні значно полегшує мікроскопічний аналіз, такими недоліками є [17]:

- хороший потенціал для поглинання пігментних частинок,
- зниження контрасту між його поверхнею та частинками,
- схильність до водопоглинання, що може впливати на гравіметричний аналіз.

З іншого боку, сітчасті фільтри не страждають від цих проблем, оскільки вони поглинають набагато менше води та мають певний розмір пор. Це дозволяє уникнути затримки дрібних частинок пігменту, але при великому збільшенні на мікроскопічному зображенні їх структура може створювати відблиски та артефакти. Крім того, деякі дуже тонкі частинки можуть не утримуватися під час фільтрації.

Основні типи фільтрувальних матеріалів з їх хімічною стійкістю представлені в таблиці 1.1, а вигляд сітчастого мембранного фільтра – на рис. 1.1.

Після завершення процесу фільтрації фільтри висушують у сушильних шафах або камерах, які часто суміщені з фільтрувальною установкою. Температуру та час висушування фільтра слід визначати за попередньо вибраною процедурою, враховуючи матеріал фільтра та тип екстракційної рідини, що застосовується.

Таблиця 1.1 – Таблиця сумісності матеріалів для фільтрів з екстракційними рідинами [1]

Матеріал фільтра		Рідина для екстракції				
		Вода	Ізопропанол	Етанол	Аліфатичні вуглеводні	Кетони
Спінена мембрана	Нітрат целюлози	+	—	—	—	—
	Ацетат целюлози	+	+	—	+	—
	Поліамід	+	+	+	+	+
Сітчастий фільтр	Поліестер	+	+	+	+	+
	Поліамід	+	+	+	+	+

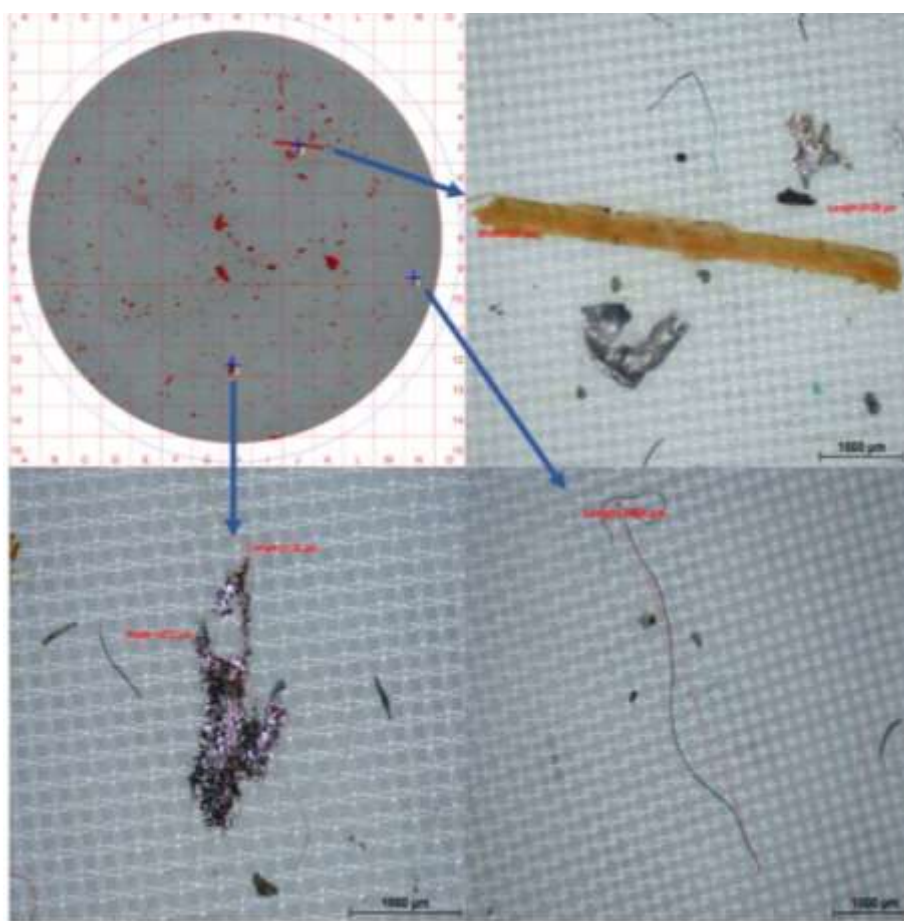


Рисунок 1.1 – Сітчастий мембранний фільтр

1.5 Методи аналізу

Гравіметричний аналіз є найпростішим підходом у стандартному аналізі на стан технічної чистоти та може включати оцінку як твердих частинок, так і розчинних забруднень. Визначення загальних твердих забруднень включає

фільтрацію екстракційної рідини через фільтр і обчислення маси частинок за різницею маси фільтра до і після процесу фільтрації. Для точного визначення різниці маси фільтра необхідні аналітичні ваги з мінімальною точністю 0,1 мг. Що дуже важливо, фільтри повинні бути належним чином підготовлені до тесту: спочатку висушені, потім охолоджені до кімнатної температури в ексикаторі. Тому важливо, щоб температура та вологість у приміщенні для зважування регулювалися та контролювалися, а також відповідали вимогам чистоти повітря. Незважаючи на свою простоту, гравіметричний аналіз дає інформацію про загальне забруднення компонентів.

Метод світлової мікроскопії є основою стандартного контролю чистоти виробів. Його застосування дозволяє отримати інформацію щодо кількості, розмірів або діапазонів розмірів і типу частинок. Уся ця інформація ґрунтується на аналізі мікроскопічного зображення, яке, щоб бути надійним, має бути зроблене з відповідним контрастом – диференціація частинок від поверхні фільтра базується на шкалі відтінків сірого. Фільтр для оптичного аналізу має бути належним чином підготовлений, а аналізовані забруднення мають бути рівномірно розподілені.

У разі світлового мікроскопічного аналізу проста диференціація між твердими металевими (блискучими), неметалевими (неблискучими) і волокнистими частинками базується лише на мікроскопічному зображенні та на пікселях, які утворюють зображення частинок. Металеві та неметалічні частинки зазвичай розрізняють за допомогою двох різних зображень, наприклад, поляризоване проти неполяризованого зображення тієї самої частинки. Цей аналітичний метод є найпоширенішим, але має свої недоліки. До уже згаданих додається ще необхідність використання автоматизованих мікроскопічних систем з моторизованими столиками, однорідне і стабільне в часі освітлення всієї поверхні фільтра протягом усього аналізу. Цей метод також чутливий до наявності часток, колір яких схожий на матеріал фільтра (зазвичай білий). Для вирішення цієї проблеми використовуються жовті сітчасті фільтри, що полегшують аналіз білих забруднень [17].

Незважаючи на те, що для аналізу зображень і обробки результатів потрібні автоматичні мікроскопічні системи, також потрібен добре навчений персонал. Його роль дуже важлива й включає встановлення відповідних аналітичних параметрів, таких як вибір порогу, ручне виправлення деяких поширених помилок, наприклад, розділення матової та блискучої частинки забруднення або частинок, які наклалися.

Розширений аналіз частинок може бути виконаний методом світлової мікроскопії у разі наявності додаткових вимог [3]. Наприклад, якщо потрібен аналіз висоти частинок, використовуються відмінності між положенням фокусу фільтра та найвищою точкою частинки. У деяких випадках для певних типів досліджуваних частинок необхідно провести додаткові вимірювання з використанням різних режимів освітлення або подвійної перевірки, щоб отримати необхідну інформацію.

Іншим методом вимірювання є аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM), який дозволяє підраховувати частинки, а також вимірювання в поєднанні з рентгенівською спектроскопією (EDX), яка надає інформацію про елементний склад забруднення, а отже, й твердість частинок. Цей аналітичний метод рекомендується використовувати, коли необхідно одержати додаткову інформацію про склад частинок, щоб точніше визначати їх джерела або щоб уникнути присутності твердих часток, які можуть призвести до несправності компонента [18]. Застосування цієї методики дозволяє перевірити наявність електропровідних частинок, які можуть впливати на роботу електронних пристроїв. Оскільки метод SEM-EDX підраховує частинки на основі іншого контрасту (контраст матеріалу), ніж світлова мікроскопія, результати, отримані за цими двома методами, не слід порівнювати між собою. Однак можна перевірити елементний склад вибраних частинок, виміряний за допомогою світлової мікроскопії, якщо координати цих частинок на фільтрі можна передати на обладнання SEM-EDX. Крім того, цей метод займає більше часу, ніж світлова мікроскопія, а у разі великої кількості частинок потрібно аналізувати лише частину фільтра. Якщо заповнюваність фільтра є однорідною, відповідні результати можна потім екстраполювати на загальну площу фільтра. Тут потрібно знаходити

компроміс між якістю результатів елементного складу і часом дослідження: чим більше рентгенівських імпульсів для кожної частинки підраховується, тим надійнішими є результати, однак при цьому зростає загальний час аналізу.

Слід взяти до уваги, що класифікація частинок за різними групами матеріалів базується лише на аналізованому елементному складі, який сильно залежить від роздільної здатності детектора EDX. Крім того, SEM-EDX має власні обмеження у випадку аналізу органічних або пластикових частинок. Оскільки фільтри створюють фон, що містить багато вуглецю, а рентгенівська спектроскопія загалом менш чутлива до легших елементів, таких як кисень, вуглець і азот, можна розрізнити лише специфічні пластикові матеріали. Серед них є ті, що містять такі елементи, як хлор або фтор. Порівняння світлової мікроскопії та SEM-EDX аналізу однієї і тієї ж частинки представлено на рис. 1.2.

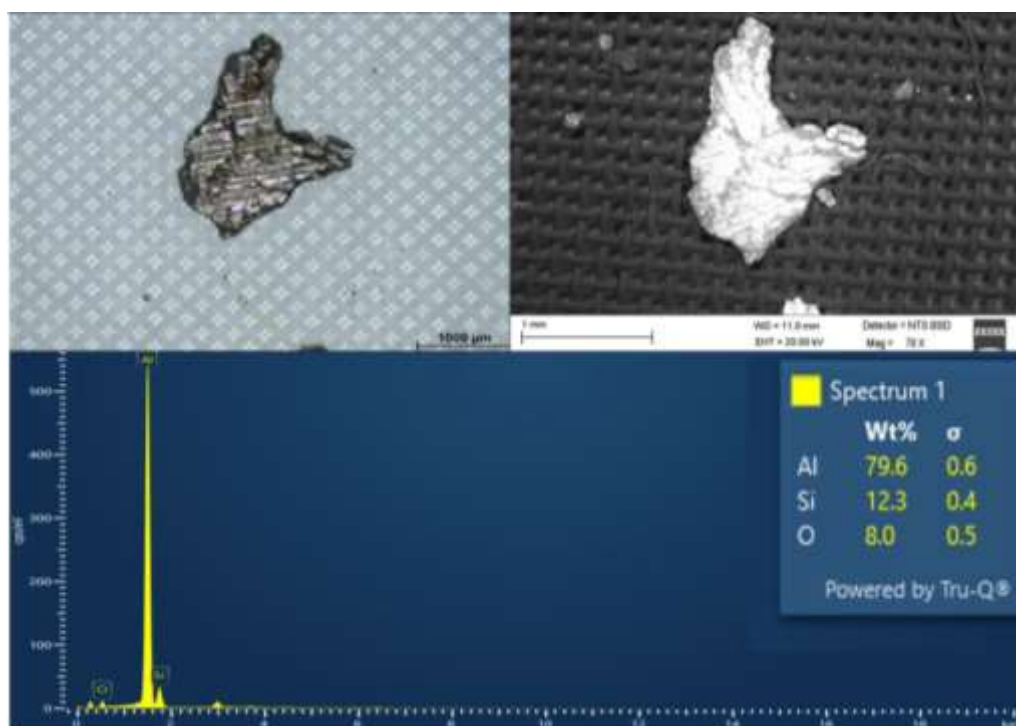


Рисунок 1.2 – Візуалізація частинки забруднення за допомогою світлової мікроскопії та рентгенівської спектроскопії

Ще одним методом, який дозволяє отримати інформацію про елементний склад частинок, а отже, і про їх фізичні характеристики, є лазерно-пробійна емісійна спектроскопія (LIBS). У цьому випадку високоенергетичний лазерний

імпульс випаровує частинку та генерує плазму, спектр якої аналізується. Цей метод дозволяє набагато швидше (менше ніж за секунду) аналізувати елементний склад, тоді як якість вимірювання методом SEM-EDX залежить від часу. Крім того, SEM-EDX вимагає багатоточкового аналізу частинок для отримання якісних результатів, що займає від однієї до кількох секунд на частинку. LIBS, як правило, є майже неруйнівним методом, оскільки лише невелика частина матеріалу видаляється з аналізованої поверхні [17].

Таким чином, цей метод дозволяє дуже швидко отримати точні результати, що важливо в багатьох сферах, коли рішення потрібно прийняти якомога швидше. LIBS, як і попередні методи, вимагає належного розділення частинок на фільтрі для отримання надійних результатів і добре підходить для аналізу частинок розміром не менше 15 мкм [19].

На відміну від LIBS, який чутливий до елементного складу, особливо чистих металів і неорганічних матеріалів, раманівська спектроскопія також заснована на лазерному збудженні, дозволяє визначати органічні та неорганічні молекули, але в цьому випадку чисті метали не генерують сигнал [20]. Ідентифікація матеріалу частинок базується на порівнянні отриманих спектрів з базою даних. Раманівська спектроскопія добре підходить для аналізу частинок розміром до 0,5 мкм, але типовий час аналізу одного забруднення коливається від 30 до 60 секунд. Це означає, що перевірка чистоти на основі раманівської спектроскопії займе стільки ж часу, скільки й типовий аналіз SEM-EDX. Однак це єдиний метод із описаних, який дозволяє ідентифікувати пластикові матеріали, що може знадобитися в деяких випадках для пошуку джерела забруднення компонентів.

Іншим методом, який також використовує вимірювання молекулярних коливань для визначення складу речовини забруднення, є інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR). Недоліком цього методу є те, що він не дозволяє аналізувати такі дрібні частинки, як раманівська спектроскопія, але є набагато більш поширеним і відносно дешевшим. FTIR чутливий до наявності органічних груп у досліджуваних молекулах і частинках, дозволяючи ідентифікувати не лише пластикові частинки, а й органічні розчинники, жири. Цей

метод не дуже підходить для аналізу неорганічних матеріалів. Загалом можна використовувати два способи інфрачервоної спектроскопії: наскрізний або ослаблення повного відбиття (ATR). Обидва способи можуть бути застосовані в ІЧ-мікроскопах та ІЧ-спектрометрах. Загалом використання ІЧ-спектрометра обмежується частинками, які можна видалити з фільтра (наприклад, за допомогою пінцета) і перенести в ІЧ-спектрометр. У випадку методу ATR частинка притискається до кристала (наприклад, кристала алмазу), що дозволяє передавати ІЧ-випромінювання на аналізований зразок і відбивати його назад на детектор. У випадку наскрізної інфрачервоної спектроскопії, яка зазвичай більш чутлива і забезпечує кращу якість спектрів, ІЧ-випромінювання проходить через частинку, затиснуту між двома кристалами.

1.6 Висновок до розділу 1

В розділі розглянуто сучасні вимоги та методи визначення технічної чистоти, а також їх застосування до виробництва виробів електронної техніки.

Розглянуто регламентацію контролю технічної чистоти, яка регулюється такими міжнародними стандартами як ISO 16232 та VDA 19, в яких визначені вимоги до процедур проведення контролю, описані методи і можливі засоби проведення досліджень, матеріали і технології контролю. Виконання вимог цього стандарту ISO 16232:2018 мінімізує ризики передчасного виходу виробів електронної техніки з ладу через забруднення в процесі виробництва.

Для роботи з електронними компонентами та іншими виробами електронної техніки найчастіше застосовується метод рідинної екстракції забруднень під тиском з подальшою фільтрацією екстракційної рідини, висушуванням фільтра, його зважуванням та подальшим дослідженням, яке може включати пришвидшений, стандартний або розширений аналіз. Для задач цієї роботи було обрано стандартний оптичний мікроскопічний аналіз, який є найбільш поширеним і важливим для контролю чистоти.

2 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ЧАСТИНОК

2.1 Визначення шляхів удосконалення методу

Базуючись на аналітичній інформації, розглянутій у розділі 1, можемо сформулювати узагальнену схему процесу контролю технічної чистоти, яка включає такі операції: екстракцію забруднень (промивання), фільтрування змиву, висушування фільтра, зважування, контроль, аналіз, формування звіту (рис. 2.1).

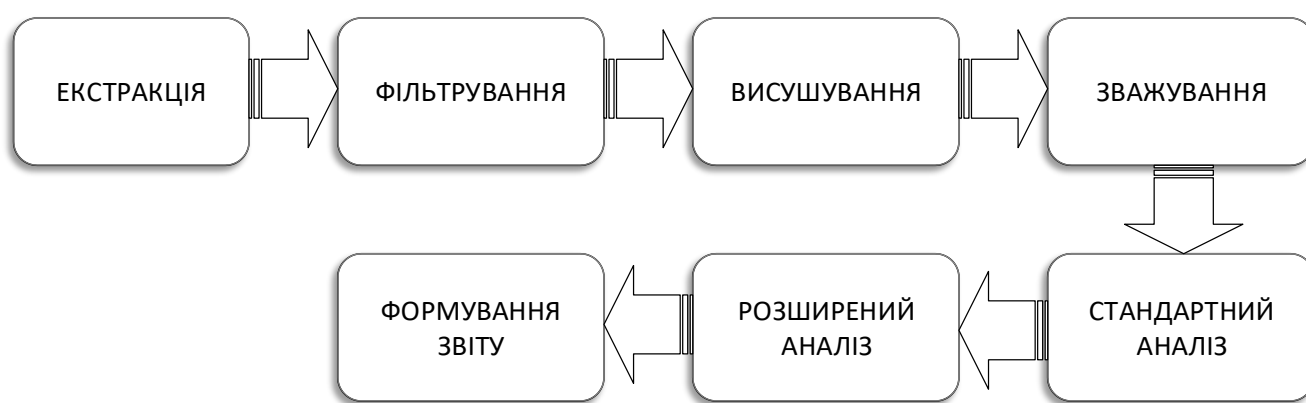


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема процесу визначення технічної чистоти

Процеси підготовки фільтра до аналізу (верхній рядок на рис. 2.1) є автоматизованими технологічними процесами. Найбільш тривалим етапом є аналіз, у процесі якого цифрові зображення висушеного фільтра вивчаються на предмет наявності частинок забруднення. Крім того, цей етап вимагає участі фахівця з контролю якості. Відповідно до сформульованої мети магістерської роботи, було вирішено провести оптимізацію цього процесу шляхом розроблення інформаційної технології автоматизованої обробки мікроскопічних цифрових зображень фільтра.

У зв'язку з обмеженим часом виконання магістерської роботи та наявними можливостями зосередимось на оптичному мікроскопічному аналізі в межах стандартної процедури контролю технічної чистоти виробів електронної техніки. Оптично-мікроскопічний аналіз включає в себе такі операції [21]:

- 1) встановлення і закріплення мембрани фільтра на предметному столику оптичного мікроскопа;
- 2) фокусування об'єктива мікроскопа на поверхні фільтра;
- 3) виконання послідовного фотографування всієї поверхні фільтра;
- 4) склеювання – суміщення всього масиву фотографій одного фільтра в єдине зображення;
- 5) пошук на цифровому зображенні фільтра частинок забруднення;
- 6) підрахунок та класифікація частинок за типами.

Операція візуального пошуку забруднень 5 без автоматизації є найбільш тривалою та вимагає значних витрат трудових і часових ресурсів фахівця-контролера. Тому автоматизація й оптимізація процесу пошуку забруднень при є важливою задачею при визначенні технічної чистоти.

За необхідності, якщо стандартний аналіз виявив наявність невстановленого типу частинок, проводиться розширений аналіз, який може бути відсутнім, якщо процес контролю технічної чистоти цього не вимагає. На основі проведеного аналізу формується звіт про стан технічної чистоти об'єкта дослідження.

2.2 Одержання зображень

Попередньо висушений і підготовлений для мікроскопічного аналізу фільтр закріплюється на предметному столику мікроскопа, після чого проводять фотографування через об'єктив мікроскопа.

Для отримання достовірних даних щодо розмірів частинок забруднення надзвичайно важливим є правильне калібрування розміру пікселів зображення. При використанні об'єктива з десятикратним збільшення роздільна здатність зображення становить близько 0,5–1 мкм [21]. Загальне збільшення мікроскопа зазвичай становить 100 разів. Типовий діаметр d фільтра складає 47 мм [15]. При площі поля зору камери $a = 100 \text{ мм}^2$, кількість окремих мікрофотографій N , які формують зображення фільтра, складе

$$N \approx \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{a} \approx 17,34 \text{ (кадри)}.$$

Насправді це число буде більшим через те, що фотографії країв фільтра будуть захоплювати площу поза фільтром, орієнтовно 22-25 кадрів.

Процес фотографування надзвичайно важливий, адже на зображення повинні потрапити усі частинки забруднення, присутні на фільтрі, але рівно один раз. Для цього мембрану фільтра потрібно поділити на комірки за розмірами полі зору цифрової камери мікроскопа камери. Це досягається шляхом використання точних крокових двигунів, які послідовно переміщують предметний столик за двома осями, охоплюючи всю поверхню фільтра (рис. 2.2).

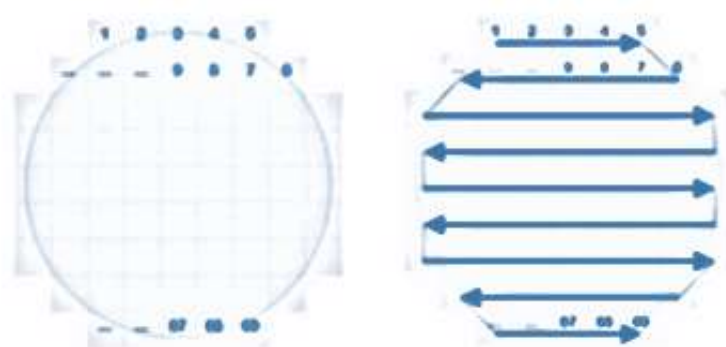


Рисунок 2.2 – Схема розбиття поверхні фільтра на квадрати відповідно до розмірів поля зору камери та проходження об'єктива мікроскопа послідовно над кожним квадратом

При зшивці не обов'язково, щоб два зображення, що межують, накладалися один на одного. Механічна точність моторизованого предметного столика забезпечує безпомилкове позиціонування мембрани фільтра [21]. Таким чином, здійснюється отримання близько 26 окремих зображень усієї поверхні фільтра. Цей процес займає до 1 хвилини.

Усі зображення повинні формуватися послідовно, а переміщення виконуватися чітко в межах координатної сітки зображення. Можливий фазовий зсув між координатною сіткою камери (зображення) та предметного столика має

компенсуватися у процесі отримання зображень (рис. 2.3). Для повного аналізу всієї мембрани фільтра важливо, щоб не втрачались ті частинки, які знаходяться на межі окремих кадрів, з яких формується зображення. Це досягається шляхом механічної або програмної корекції підсумкового зображення.

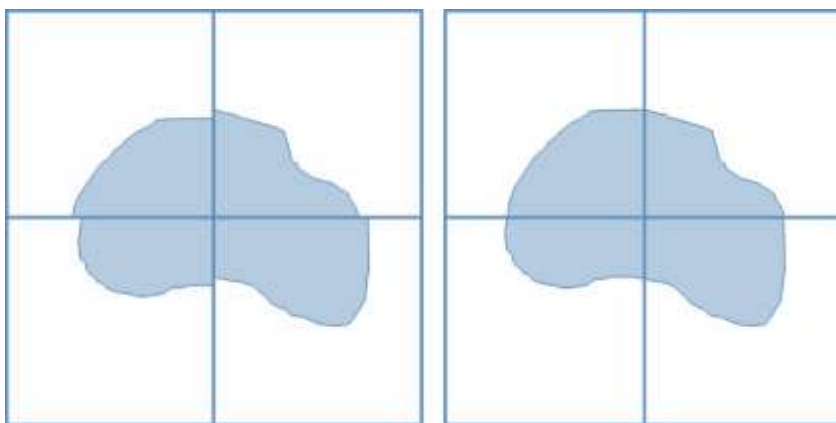


Рисунок 2.3 – Нескореговане (ліворуч) та скореговане (праворуч) зображення однієї частинки в межах чотирьох сусідніх мікрофотографій

2.3 Виявлення частинок забруднення

Виявлення частинок забруднення на зображенні здійснюється шляхом об'єднання набору пікселів, що забезпечує сегментацію зображення [21]. Область об'єднаних пікселів ототожнюється з частинкою. При візуальному дослідженні мембран фільтрів частинки зазвичай виглядають як темні точки на світлому тлі (рис. 2.4).

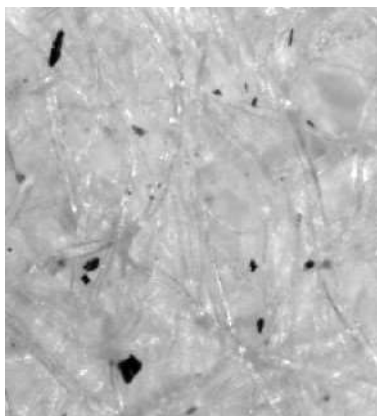


Рисунок 2.4 – Темні частинки на тлі світлого матеріалу фільтра

Діапазон значень інтенсивності пікселя для пошуку на зображенні частинок зазвичай починається з нуля (тобто чорного кольору), тобто для задачі пошуку й аналізу темних частинок необхідно лише визначити верхній поріг значення інтенсивності пікселя на зображенні, що буде пов'язуватись з частинкою.

І навпаки, металічні та інші блискучі частинки можуть давати значення інтенсивності, близьке до одиниці на відносній шкалі, і для знаходження таких частинок потрібно встановлювати нижній поріг значень інтенсивності пікселя.

Недоліком такого підходу є ручне встановлення порогу, яке визначається перед початком дослідження (апріорно), що може призвести до втрати деяких частинок під час автоматичного аналізу зображення,

Розглянемо методи визначення розміру частинки.

Кожна виявлена частинка може бути описана за допомогою декількох геометричних параметрів. Найбільш поширеними характеристиками розмірів частинок при контролі технічної чистоти є дві: максимальний діаметр Ферета і діаметр еквівалентного кола (рис. 2.5).

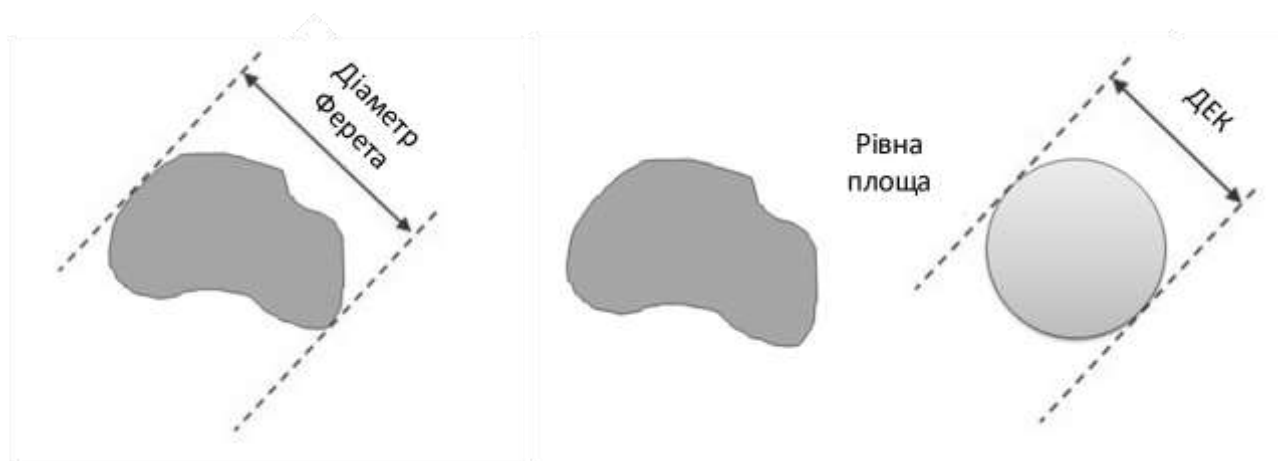


Рисунок 2.5 – Діаметр Ферета і діаметр еквівалентного кола (ДЕК) для частинки неправильної форми

Максимальний діаметр Ферета – це найбільша відстань між паралельними прямими, дотичними до протилежних сторін частинки [22]. Вимірювання цього параметра аналогічно виміру відстані лінійкою.

Діаметр еквівалентного кола – це величина діаметра кола, що описує площу, рівну площі виявленої частинки [22].

Якщо максимальний діаметр Ферета відображає максимальні лінійні розміри частинки, то діаметр еквівалентного кола відображає загальну площу проекції частинки на площину фільтра.

Залежно від потреб конкретного виробництва або контролю якості можуть також застосовуватись інші параметри для визначення форми та коефіцієнту відбиття частинки. Ці параметри використовуються для розпізнавання типу забруднення, наприклад, волокон, мікростружки, блискучих частинок тощо.

Стандартами контролю технічної чистоти ISO 16232 та VDA 19 також рекомендується вимірювати заповненість мембрани фільтра частинками. Заповненість – це сума площ усіх частинок; вона має становити приблизно 1–2 %, але не більше 7 % від загальної площі мембрани фільтра [4].

2.4 Удосконалення методу визначення частинок

При удосконаленні методу автоматизованого визначення частинок забруднення на цифрових зображеннях фільтрів у процесі контролю технічної чистоти виробів електронної техніки була поставлена задача забезпечити автоматизоване виявлення і кількісний аналіз частинок забруднення без участі фахівця-експерта та сигналізація у випадку перевищення встановлених норм наявності частинок.

За природою частинок забруднення виділяють кілька типів: металеві, неметалеві, органічні. У переважній кількості випадків вони відрізняються від тла фільтру, на якому знаходяться, за інтенсивністю (яскравістю) та кольором. Як ми пересвідчилися раніше, одні частинки можуть бути темніші за тло, інші – світліші. Тому задача їх пошуку на цифровій фотографії зводиться до виявлення ділянок, які відрізняються від тла за інтенсивністю або кольором. При цьому більшу частину фотографії буде займати саме зображення тла (поверхні фільтру), яке має рівномірне й більш стабільне значення кольору та інтенсивності. Через це

вирішено було застосувати статистичний підхід для визначення розподілу аналізованих параметрів [2]. А оскільки в контролі технічної чистоти зазвичай користуються чорно-білими зображеннями у відтінках сірого, будемо аналізувати лише інтенсивність, відзначивши потенційну можливість розширення методу для показників кольору. Для цього потрібно визначити усереднене значення параметру інтенсивності пікселя зображення фільтру $\bar{X}$:

$$\bar{X} = \frac{1}{K \cdot M \cdot N} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X(k, m, n), \quad (2.1)$$

де K – кількість кадрів, що формують зображення одного фільтру;

$M \times N$ – розмірність однієї фотографії (кадру) зображення;

$X(k, m, n)$ – значення параметру (інтенсивності) одного пікселя зображення фільтру.

Слід наголосити, що необхідно проводити статистичний аналіз зображення всієї поверхні фільтру, яке складається з K окремих фотографій.

Після цього застосовуємо процедуру інтенсифікації зображення [23] з метою підвищення його контрасту і виділення пікселів, значення яскравості яких відхиляються від середнього значення. Для цього спершу проведемо фазифікацію – перерахунок значень параметра для кожного пікселя так, щоб значенню $\bar{X}$ відповідало значення 0,5, а максимальному відхиленню від середнього – 0 або 1 залежно від знаку відхилення:

$$X^*(k, m, n) = \begin{cases} (X(k, m, n) - X_{min}) \cdot \frac{0,5}{\bar{X} - X_{min}}, & \bar{X} - X_{min} > X_{max} - \bar{X}, \\ 1 - (X_{max} - X(k, m, n)) \cdot \frac{0,5}{X_{max} - \bar{X}}, & \bar{X} - X_{min} < X_{max} - \bar{X}, \end{cases} \quad (2.2)$$

де X_{min} та X_{max} – відповідно мінімальне та максимальне значення інтенсивності пікселя для всього зображення фільтру.

Після цього застосуємо наступне перетворення для кожного пікселя

$$X^{**}(k, m, n) = \begin{cases} 2 \cdot X^*(k, m, n), & 0 \leq X^*(k, m, n) \leq 0,5 \\ 1 - (2 \cdot (1 - X^*(k, m, n))^2), & 0,5 < X^*(k, m, n) \leq 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

і одержимо зображення з підвищеною контрастністю, на якому темні пікселі стають ще темнішими, а світлі – ще світлішими.

Далі проводимо оцінювання дисперсії $\bar{D}$ для значень пікселів зображення:

$$\bar{D} = \frac{1}{K \cdot M \cdot N} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (X^{**}(k, m, n) - 0,5)^2. \quad (2.4)$$

Останнім кроком буде порівняння квадратичного відхилення для кожного пікселя з величиною $\bar{D}$, в результаті чого знаходимо кількість пікселів C , які відображають частинки забруднення за правилом:

$$C = \begin{cases} C = 0, & k = m = n = 0 \\ C = C + 0, & (X^{**}(k, m, n) - 0,5)^2 \leq \bar{D} \\ C = C + 1, & (X^{**}(k, m, n) - 0,5)^2 > \bar{D} \end{cases} \quad (2.5)$$

Цей показник одразу дозволяє визначити заповненість Z фільтра частинками, що є контрольним показником:

$$Z = \frac{C}{K \cdot M \cdot N}. \quad (2.6)$$

Порівнюючи одержаний результат з встановленим допустимим рівнем наявності забруднень, система в автоматичному режимі виявляє зразки, які не відповідають вимогам.

Подальшим кроком є виділення знайдених пікселів на результуючому зображенні та об'єднання їх у об'єкти (частинки забруднення) за ознакою наявності сусідніх з ними пікселів, які увійшли у число C . На рис. 2.6 представлено формування трьох зв'язних об'єктів із сусідніх пікселів. Сусіднім вважається піксель, що увійшов у число C і який знаходиться в одній з восьми позицій навколо аналізованого пікселя.

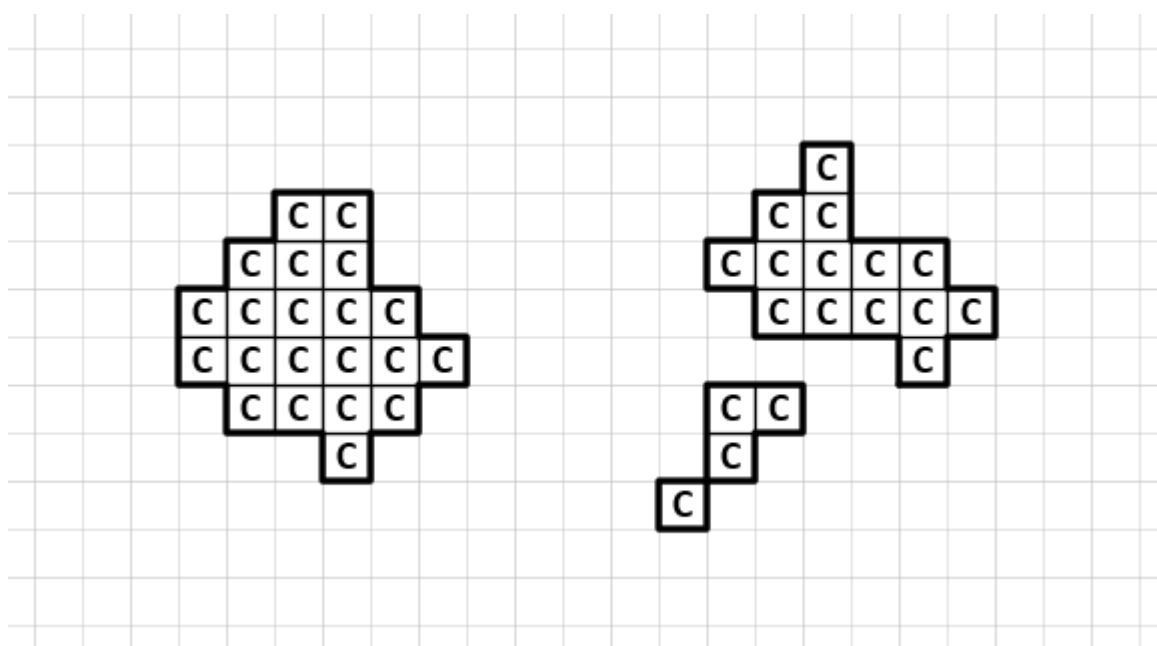


Рисунок 2.6 – Формування зв'язних об'єктів за ознакою сусідства пікселів, ідентифікованих як частинки

Для кожного зв'язного об'єкта, ідентифікованого як частинка, можна знайти класифікаційний геометричний параметр – діаметр еквівалентного кола (ДЕК):

$$\text{ДЕК} = 2 \cdot \sqrt{\frac{c \cdot a}{\pi \cdot M \cdot N}}, \quad (2.7)$$

де c – кількість пікселів, що об'єднані в один зв'язний об'єкт;

a – площа поля зору камери (зазвичай 1 мм^2);

$M \times N$ – розмірність одного кадру;

При цьому параметри a , M і N є постійними для системи контролю технічної чистоти, а відношення $a / M \cdot N$ – це площа одного пікселя.

Таким чином, запропонований метод забезпечує з високою достовірністю, швидкістю та в автоматизованому режимі знаходження частинок забруднення на зображенні фільтра під час стандартного аналізу в процесі контролю технічної чистоти та об'єднувати їх у зв'язні об'єкти, що дозволяє проводити їх подальшу ідентифікацію та аналіз.

2.5 Висновок до розділу 2

В розділі було визначено шляхи удосконалення методу визначення зображень частинок забруднень при контролі технічної чистоти виробів електронної техніки в межах стандартного мікроскопічного аналізу, а саме оброблення мікрофотографій фільтра. Операція візуального пошуку забруднень є найбільш тривалою та вимагає значних витрат трудових і часових ресурсів фахівця-контролера. Тому автоматизація й оптимізація процесу пошуку забруднень при є важливою задачею при визначенні технічної чистоти.

Було сформовано метод одержання зображень з камери мікроскопа та розраховано орієнтовну кількість кадрів, з яких формується зображення фільтра, запропоновано шлях для послідовного проходження об'єктива мікроскопа над всією поверхнею фільтра шляхом точного руху предметного столика.

Запропоновано виявлення і первинну класифікацію частинок забруднення за відхиленням від середнього значення інтенсивності пікселів на зображенні фільтра. Розміри частинок будуть оцінюватись на основі геометричного параметра діаметра еквівалентного кола, рівного за площею площі проекції частинки.

Удосконалення методу виявлення і визначення частинок полягає в поєднанні статистичної і нечіткої обробки зображень, яка передбачає визначення середнього значення інтенсивності по зображенню, фазифікацію та інтенсифікацію

зображення для підвищення контрасту і виявлення частинок, дисперсійний аналіз з одночасним розрахунком величини заповненості фільтра, площі кожної частинки, попереднє віднесення її до класу металічних або неметалічних частинок забруднення.

Результати, отримані в розділі, були представлені на III Міжнародній науково-практичній конференції «Вища технічна освіта XXI століття: виклики, проблеми, перспективи» (13 грудня 2024 року) та опубліковані в роботі [2].

3 АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЧИСТОТИ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

3.1 Синтез системи контролю технічної чистоти

Відповідно до узагальненої схеми процесу контролю технічної чистоти виробів електронної техніки (див. рис. 2.1) для забезпечення цієї процедури необхідне таке обладнання:

- 1) екстракційна шафа, розташована у чистій кімнаті;
- 2) установка фільтрувальна вакуумна (може бути суміщена з екстракційною шафою);
- 3) сушильна шафа для висушування фільтра;
- 4) прецизійні ваги для зважування фільтра;
- 5) мікроскоп з цифровою камерою для одержання зображень;
- 6) робоче місце інженера з якості (комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням для вивчення зображень фільтра і формування звітної документації.

Для задач контролю технічної чистоти виробів електронно техніки найчастіше використовується рідинна екстракційна шафа для екстракції методом промивання під тиском. Приклад такої екстракційної шафи наведено на рис. 3.1. Важливо, щоб установка була розташована у приміщенні, що відповідає вимогам до чистої кімнати відповідного класу.

Фільтрація здійснюється за допомогою вакуумної фільтрувальної установки. Вона може бути виконана у вигляді окремого технічного блоку (рис. 3.2) або бути суміщеною з екстракційною шафою (див. рис. 3.1, *а*). В такому випадку не потрібно переносити екстракційну рідину з однієї установки на іншу, що мінімізує втрати частинок забруднення при фільтруванні.

*а**б*

Рисунок 3.1 – Екстракційне обладнання для рідинного промивання під тиском: *а* – екстракційна шафа JS767 [24]; *б* – промивання у чистій кімнаті [25]

*а**б*

Рисунок 3.2 – Лабораторні фільтрувальні апарати [26]: *а* – Chemker 300 – VF 12; *б* – Rocker 300C

Після завершення фільтрування екстракційної рідини фільтр з осадженими частинками забруднення потрібно висушити, щоб усунути всю рідину. Для цього використовуються ексикатор, сушильні шафи, лабораторна піч або інше обладнання, яке підтримує температуру 70–80 °С та низьку вологість (рис. 3.3).

*a**б*

Рисунок 3.3 – Електричні сушильні шафи: *a* – DHG-9013A(S) [24]; *б* - промислова піч з циркуляцією гарячого повітря RT-100 [27]

Час сушіння при вказаній температурі складає 30 хвилин. Висушений фільтр зважується на прецизійних вагах з роздільною здатністю принаймні 0,001 грам для того, щоб визначити загальну масу всіх частинок забруднення (рис. 3.4). Маса чистого фільтру заздалегідь відома або вимірюється перед фільтруванням.

*a**б*

Рисунок 3.4 – Прецизійні електронні ваги: *a* – ADAM Highland HCB 123; *б* - BSM-1.204 1/10000 [24]

Розглянуте вище обладнання є обов'язковою складовою лабораторного технічного забезпечення процесу контролю технічної чистоти. Ці прилади є технічно завершеними блоками і не підлягають вдосконаленню в цій роботі, тобто не є предметом безпосереднього дослідження. Однак їх наявність та правильне використання є обов'язковою умовою визначення технічної чистоти виробів електронної техніки, тому що забезпечує підготовку до безпосереднього визначення частинок забруднення.

3.2 Мікроскопічна система для одержання зображень фільтра

Для мікроскопічного аналізу використовують мікроскопи, які працюють у відбитому світлі та забезпечують збільшення принаймні у 100 разів. Вони повинні бути обладнані камерою для фотографування і рухомих предметним столиком, який забезпечує переміщення фільтра відносно об'єктива мікроскопа за схемою, показаною на рис. 2.2. Приклад мікроскопічної системи для контролю технічної чистоти представлено на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – Мікроскопічна система для контролю технічної чистоти
OLYMPUS CIX100 [21]

Такі цілісні мікроскопічні системи є дорогими і складнодоступними для невеликих виробництв або стартап-проектів. Саме тому було вирішено запропонувати систему на базі поширених мікроскопів загального призначення, наприклад, металографічного стереомікроскопа або інших аналогічних.

Обов'язковою вимогою до такого мікроскопа є можливість встановлення камери і забезпечення точного переміщення предметного столика з кроком в 10 мм або менше. Вибір тринокулярного або цифрового монокулярного мікроскопа забезпечує виконання першої вимоги.

Друга умова – наявність програмно керованого предметного столика – вимагає модифікації мікроскопа шляхом встановлення програмно керованих крокових двигунів на гвинти керування переміщення предметним столиком.

Наведеним вимогам відповідає металографічний мікроскоп VM4500 з верхньою підсвіткою, який призначений для дослідження непрозорих предметів (рис. 3.6). Він оснащений чотирма планахроматичними дальнофокусними об'єктивами зі збільшенням 5х, 10х, 20х, 50х, які призначені для роботи з препаратами без покривного скла. Окуляр WF 10х (Ф 18 мм). Розмір предметного столика 210 мм на 140 мм, діапазон переміщення столика 63 мм на 50 мм. Мінімальний крок тонкого фокусування 2,0 мкм [28].

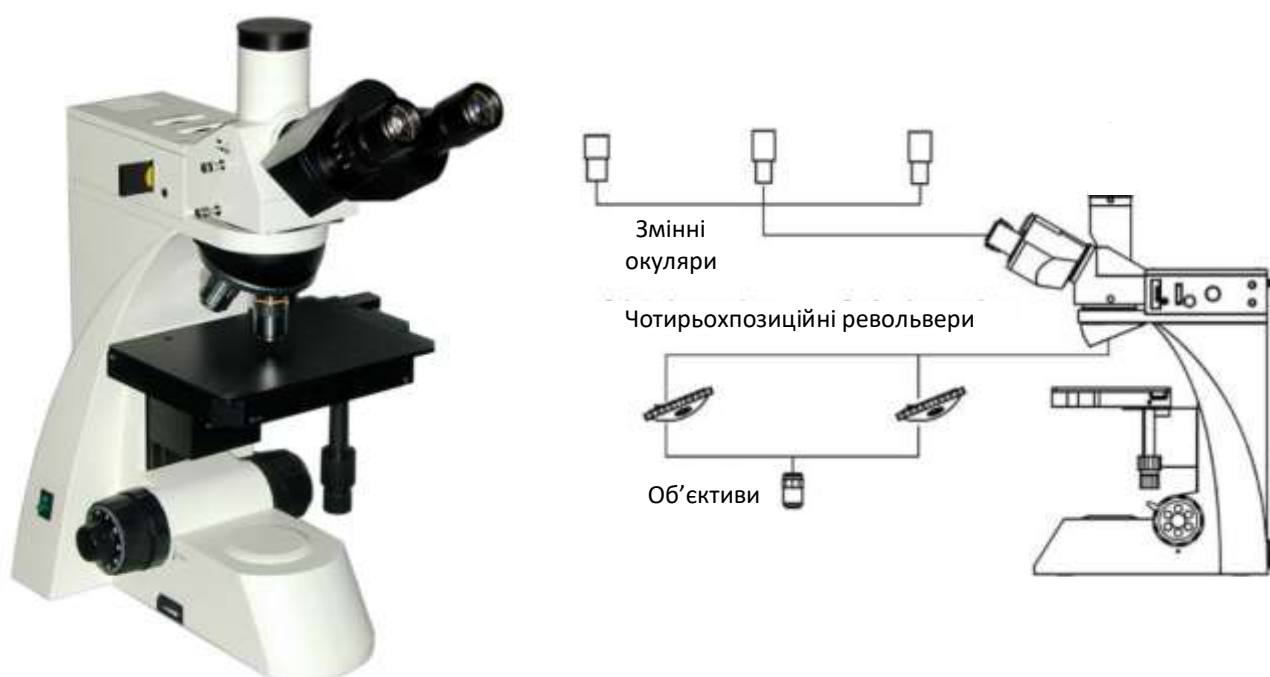


Рисунок 3.6 – Металографічний мікроскоп VM4500 [28]

Крокові двигуни обираються залежно від необхідної точності переміщення і величини об'єкта, що переміщується. Як показали наші дослідження, для задачі керування предметним столиком можуть підійти двигуни з поворотним кроком $1,8^\circ$ (200 кроків на оберт) або $0,9^\circ$ (400 кроків на оберт для більшої точності). Крім того, завдяки мікрокроковому режиму роботи сучасних драйверів можна ділити крок на 8, 16 або більше частин [29], що значно підвищує точність переміщення.

Предметний столик мікроскопа зазвичай переміщується за допомогою гвинтового механізму з використанням ходового або кулькового гвинта. Механізм забезпечує плавне переміщення столика мікроскопа. Зазвичай повний оберт гвинта забезпечує переміщення предметного столика біологічного мікроскопа на 1 мм [30]. Для металографічних мікроскопів це переміщення може бути більшим і складати 2–5 мм. До прикладу, для гвинта з кроком 1 мм за оберт і двигуна з кутовим кроком $1,8^\circ$ (200 кроків за оберт) переміщення за один крок s складе

$$s = \frac{1 \text{ мм}}{200 \text{ кроків/об.}} = 0,005 \text{ мм} = 5 \text{ мкм.}$$

Виходячи з того, що для задачі контролю технічної чистоти потрібний крок в 10 мм, достатньо буде забезпечити крокове переміщення s рівним 1 мм. Знайдемо достатній кутовий крок двигуна KK , який забезпечить потрібну точність переміщення предметного столика металографічного мікроскопа з кроком гвинта 40 мм за оберт:

$$KK = \frac{40 \text{ мм}}{1 \text{ мм}} = 40 \text{ кроків/об.}$$

$$\text{або в градусах: } KK = \frac{360^\circ}{40 \text{ кроків/об.}} = 9^\circ.$$

Таким чином, достатньо буде використати кроковий двигун з кутовим кроком 9° . Режим мікрокрокування застосовувати немає потреби. Таким чином,

замість високоточних гібридних двигунів можна використати більш дешеві крокові двигуни на постійних магнітах або реактивного типу [31].

Для цієї задачі підходить поширена модель біполярного крокового двигуна на постійних магнітах PM35S-048 (рис. 3.7) від NMB Technologies Corporation. Він живиться від напруги 24 В, струм споживання до 600 мА, оборотний момент 0,49 Н·м, тобто він досить потужний для переміщення предметного столика мікроскопа. Ним можна керувати за допомогою стандартного драйвера L298N.



Рисунок 3.7 – Кроковий двигун PM35S-048

Для одержання якісних мікрофотографій за допомогою мікроскопа необхідно встановити спеціальну цифрову камеру, яка, відповідно до технічного завдання (додаток Б) повинна задовольняти такі вимоги:

- роздільна здатність не менше 2400 на 1800 пікселів (4,3 мегапікселів);
- розмір пікселя – не менше 2,5 на 2,5 мкм;
- частота кадрів – не менше 5 кадрів за секунду при максимальній роздільній здатності;
- спектральний діапазон – від 400 нм до 900 нм;
- активний діапазон – не менше 70 дБ;
- протокол зв'язку з ПК – USB 2.0 і вище (живлення через USB);
- наявність адаптера до стереомікроскопа.
- забезпечення балансу білого кольору, автоматична і ручна експозиція.

Встановленим вимогам відповідає цифрова камера MDC-500 5,0 мегапікселів (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Цифрова камера до мікроскопа MICROmed MDC-500

Сучасний ПК для роботи з фотографіями має відповідати певним вимогам, щоб забезпечити комфортну, швидку й ефективну роботу з програмами для зберігання, оброблення та аналізу цифрових зображень. Робота з фотографіями вимагає багатоядерного процесора середньої потужності, адже сучасні програми активно використовують багатопотоковість. Хоча обробка зображень більше залежить від процесора, потужна відеокарта значно пришвидшує рендеринг, обробку великих файлів і використання додаткових ефектів. Робота з великими RAW-файлами або одночасно з декількома програмами вимагає достатнього обсягу оперативної пам'яті. Дисковий накопичувач повинен забезпечувати швидкий доступ до великих файлів, їх редагування і прискорену обробку даних. Крім того, робота з зображеннями вимагає високоякісного монітора з точним відображенням відтінків, навіть при тому, що обробляються чорно-білі зображення.

До основних рекомендацій щодо вибору ПК можна віднести:

- процесор Intel Core i7 чи i9 (12-го чи 13-го покоління) або процесор AMD Ryzen 7 чи Ryzen 9 (5000 чи 7000 серій);
- кількість ядер від 6 до 12, із підтримкою багатопотоковості (Hyper-Threading або SMT);
- частота процесора 3,5–5,0 ГГц (в турбо-режимі).

- відеокарта NVIDIA RTX 3060 / 4060 або AMD Radeon RX 6600 / 7600 (середній рівень продуктивності) або вище, відеопам'ять (VRAM) не менше 6 ГБ;
- оперативна пам'ять (RAM) не менше 16 ГБ, бажано 32 ГБ;
- твердотільний дисковий накопичувач SSD NVMe (швидкість читання / запису 3000–5000 МБ/с) обсягом 1 ТБ для операційної системи та програм, можна використати додатковий накопичувач (SSD або HDD) для архівації та зберігання файлів зображень;
- монітор з розміром діагоналі 24–32 дюйми, роздільна здатність: 2K (2560×1440) або 4K (3840×2160), матриця: IPS або OLED;
- операційна система Windows 11 Pro або macOS Ventura (для Mac).

3.3 Програмне забезпечення системи

Програмне забезпечення системи контролю технічної чистоти виробів електронної техніки повинне забезпечувати керування кроковими двигунами для переміщення предметного столика мікроскопа і синхронного одержання зображень з камери. Одержані фотографії передаються на вхід інформаційної технології, яка реалізує розроблений в розділі 2 метод аналізу зображень фільтра. На виході ми отримуємо зображення фільтра з виділеними частинками забруднення і попередню класифікацію цих частинок на світлі (металічні) та темні (неметалічні). Узагальнений алгоритм роботи програмного забезпечення наведено на рис. 3.9.

Програмне забезпечення реалізоване у вигляді кількох модулів: модуля керування одержанням вхідних зображень, модуля оброблення зображення, модуля користувацького інтерфейсу та модуля побудови гістограм і збереження (архівування) результуючих зображень (рис. 3.10).

Графічний інтерфейс системи забезпечує доступ користувача до решти програмних модулів і представлення результатів роботи системи для аналізу. Цей модуль забезпечує коректне відображення первинних і оброблених зображень фільтра, а також роботу користувача з цими зображеннями.

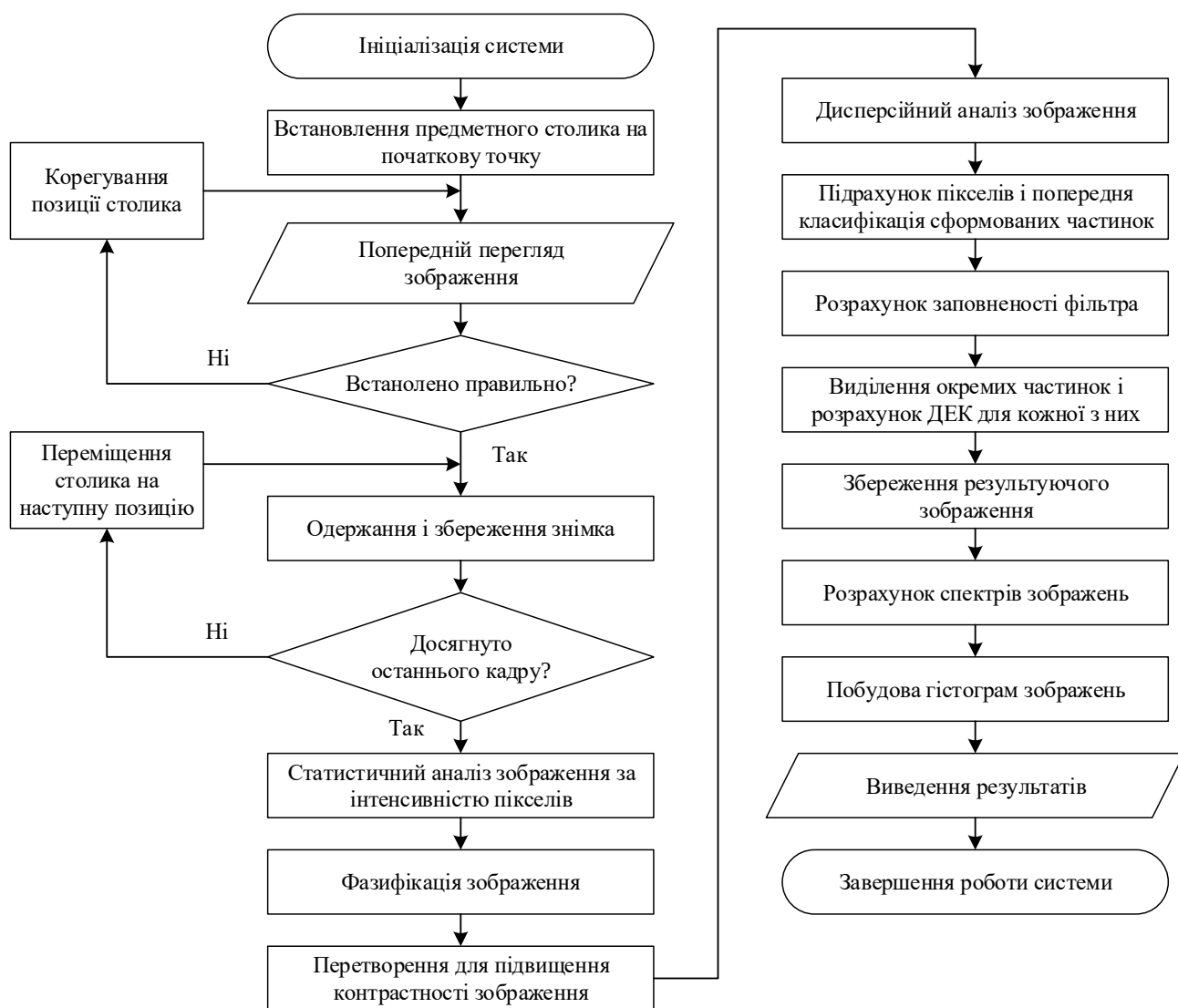


Рисунок 3.9 – Узагальнений алгоритм роботи програмного забезпечення системи

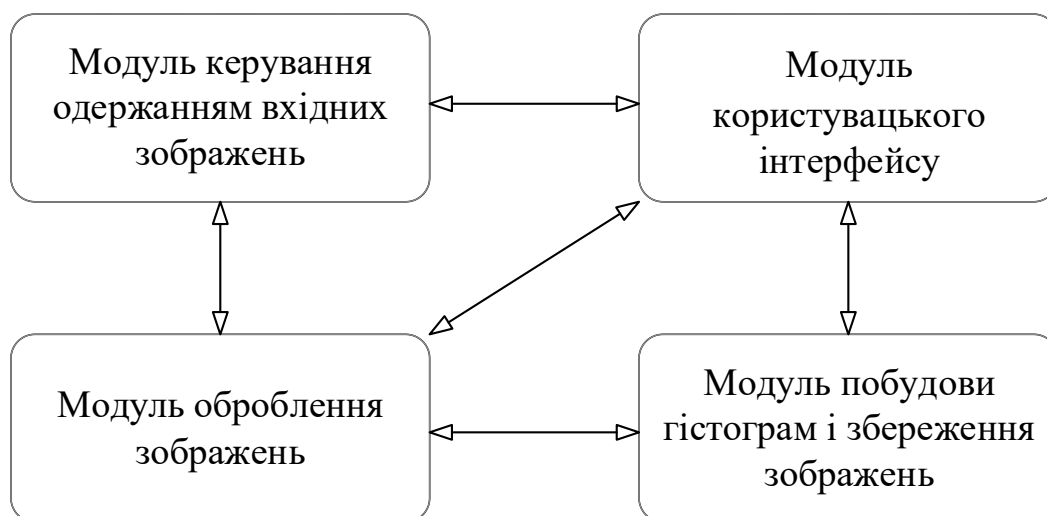


Рисунок 3.10 – Структура програмного забезпечення системи

Модуль керування одержанням вхідних зображень одночасно забезпечує управління кроковими двигунами через драйвер L298N і одержанням фотографій з камери мікроскопа. За потреби користувач може відкорегувати початкове положення для зйомки (перший кадр). Цей модуль передає введене зображення на модуль оброблення для подальшої роботи.

Модуль оброблення зображень опрацьовує вхідне зображення за розробленим методом та інформаційною технологією контролю технічної чистоти виробів електронної техніки. Він забезпечує допоміжні перетворення зображення (фазифікацію та підвищення контрастності), статистичний та дисперсійний аналіз зображення за значеннями інтенсивності пікселів, ідентифікацію частинок забруднення та їх попередню класифікацію на металічні й неметалічні, забезпечує розрахунок площі частинок і визначення параметру заповненості фільтра.

Модифіковане зображення передається на модуль побудови гістограм і збереження зображень, який забезпечує розрахунок амплітудного і фазового спектру зображення й побудову відповідних гістограм. Цей модуль носить допоміжний характер для більш повного аналізу зображення і представлення результатів у графічній формі. Також модуль забезпечує збереження одержаного зображення на дисковому накопичувачі і за потреби архівацію.

Для реалізації програмного забезпечення була обрана мова програмування Java, яка забезпечує принцип об'єктно-орієнтованого програмування та має такі переваги:

- Java забезпечує портативність і кросплатформність, адже побудована за принципом «write once, run anywhere» завдяки Java Virtual Machine (JVM) [32], тобто програма буде працювати на будь-якій платформі, яка підтримує JVM (наприклад, Windows, macOS, Linux);

- Java має велику екосистему бібліотек, які значно полегшують роботу із зображеннями, такі як Java 2D API (реалізує базові операції із зображеннями – відтворення, зміну розміру, фільтрацію), ImageIO (забезпечує читання й запис зображень у різних форматах – JPEG, PNG, BMP, GIF тощо) [33] та інші, зокрема бібліотеки сторонніх розробників;

- вбудована підтримка багатопотоковості, що дозволяє ефективно обробляти великі зображення або виконувати паралельну обробку кількох файлів у режимі реального часу;

- підтримка об'єктно-орієнтованого програмування – зручна реалізація модульної структури (наприклад, для роботи із шарами, масками, фільтрами), зручне створення класів для об'єктів з можливістю легко модифікувати їх поведінку;

- легкість розробки графічних інтерфейсів – завдяки таким бібліотекам, як JavaFX і Swing, можна легко створювати GUI-додатки для роботи з зображеннями;

- програми на Java легко масштабувати завдяки зрозумілій архітектурі та наявності інструментів для тестування, профілювання та документування;

- надійність та безпека при роботі з даними і використання пам'яті.

Недоліками мови програмування Java можуть бути:

- більш повільна робота Java у порівнянні з мовами C/C++ у високопродуктивних задачах, таких як обробка відео (чого немає в нашій задачі);

- деякі мови програмування (наприклад, Python) мають більшу кількість спеціалізованих бібліотек для оброблення зображень, однак для нашої задачі достатньо тих, які наявні в Java;

- програми на Java можуть споживати більше оперативної пам'яті для виконання подібних задач.

Переваги мови програмування Java зумовили її вибір для реалізації інформаційної системи контролю технічної чистоти виробів електронної техніки. Фрагменти програмного коду, розбиті на класи, наведені в додатку.

3.4 Висновок до розділу 3

У розділі було проведено синтез системи контролю технічної чистоти виробів електронної техніки, яка повинна включати такі елементи: екстракційна шафа або установка для промивання, вакуумна фільтрувальна установка, сушильна шафа або інше обладнання для висушування фільтра, прецизійні ваги, мікроскоп з

цифровою камерою та рухомим предметним столиком, комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

На базі металографічного мікроскопа VM4500 з цифровою камерою MICROmed MDC-500 розроблено мікроскопічну систему для контролю технічної чистоти. Точний рух предметного столика забезпечується кроковими двигунами PM35S-048, які приєднані до гвинтів мікроскопа і керуються драйвером L298N. Мікроскопічна система включає персональний комп'ютер, вимоги до якого визначаються роботою з великими зображеннями.

Розроблене програмне забезпечення, яке реалізує розроблений в розділі 2 метод визначення частинок забруднення на цифровому зображенні фільтра. Воно написане на мові програмування Java і забезпечує одержання масиву мікрофотографій фільтра, відповідне оброблення зображення, пошук частинок, розрахунок класифікаційних параметрів, побудову спектрів зображення із формуванням відповідних гістограм, відображення та збереження зображень. Програмне забезпечення складається з чотирьох модулів: модуля керування одержанням вхідних зображень, модуля оброблення зображення, модуля користувацького інтерфейсу та модуля побудови гістограм і збереження (архівування) результуючих зображень.

Розроблена система реалізує розроблений метод і дозволяє автоматизувати процес контролю технічної чистоти виробів електронної техніки без використання дороговартісного спеціалізованого обладнання.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ І СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОЇ ЧИСТОТИ

4.1 Оцінювання ефективності системи контролю технічної чистоти

Сформована в роботі система контролю технічної чистоти виробів електронної техніки на основі розробленого методу та інформаційної технології аналізу мікроскопічних зображень фільтрів після екстракції частинок забруднення оцінювалась на ефективність відповідно до її цільової функції.

Ефективність – це здатність системи забезпечувати високу точність, надійність і відтворюваність результатів аналізу частинок забруднень на поверхні чи в структурі виробів, при оптимальному використанні ресурсів (часу, матеріалів, енергії). Ефективність характеризується сукупністю параметрів, які впливають на якість, швидкість і достовірність контролю [34]. Ефективність залежить від низки параметрів, які ми розглянемо нижче.

Технічні параметри, які впливають на ефективність системи:

- роздільна здатність мікроскопа, яка визначає здатність системи виявляти частинки забруднень найменших розмірів. Висока ефективність досягається при можливості розрізнення частинок розміром від кількох мікрометрів і менше;
- контрастність зображення, яка важлива для точного визначення контурів і характеристик частинок, адже ефективна система повинна забезпечувати чітке розпізнавання навіть дрібних і слабкоконтрастних забруднень;
- автоматизація процесів розпізнавання – система з автоматичним аналізом зображень і класифікацією частинок значно підвищує ефективність, зменшуючи час на ручний аналіз та ймовірність помилок, викликаних людським фактором;
- точність вимірювань, яка показує, наскільки близький результат вимірювань (в нашому випадку кількість та площа частинок забруднення) реальному або істинному значенню і характеризується величиною похибки;

- достовірність контролю, яка показує, наскільки надійно отримані результати відображають реальну ситуацію, враховуючи усі можливі джерела похибок, наскільки можна довіряти результатам контролю.

Методологічні характеристики ефективності:

- надійність виявлення частинок забруднення, яка забезпечується стабільністю параметрів мікроскопа та дотриманням стандартизованих методик підготовки зразків (наприклад, правильна обробка фільтрів);

- повнота контролю – система повинна гарантувати повне охоплення контрольованої поверхні аналізованого фільтру (без «сліпих зон»);

- відтворюваність результатів – результати контролю повинні залишатися однаковими за повторного проведення аналізу в аналогічних умовах.

На загальну ефективність системи впливають її аналітичні можливості:

- автоматизована класифікація частинок за розмірами та типом – ефективність підвищується завдяки можливості визначати не лише розміри, але й тип забруднень (металеві, неметалеві, волокнисті тощо);

- вимірювання концентрації частинок – система повинна забезпечувати визначення кількості та/або площі частинок на одиницю площі чи об'єму з високою точністю;

- виявлення критичних частинок – ефективність системи підвищується при її здатності фокусуватися на найбільш небезпечних для виробу забрудненнях (наприклад, металевих частинках, які можуть створити небажане електричне з'єднання.

На ефективність системи впливає оцінка економічності та витрат часу:

- швидкість аналізу, яка характеризується часом, потрібним для отримання результатів. Цей час при дотриманні всіх вимог контролю повинен бути мінімальним для забезпечення високої пропускної здатності виробничої лінії;

- оптимальне використання витратних матеріалів – застосування енергоефективного обладнання та мінімізація витрат на екстракційну рідину, фільтри тощо.

В цілому ефективність системи можна кількісно або якісно оцінити за такими показниками [35]: чутливість (мінімальний розмір частинки, яку здатна виявити система); точність (характеристика ступеня близькості результатів вимірювання кількості або площі частинок до істинного значення вимірюваної величини). достовірність (ступінь відповідності результатів контролю реальному стану та відтворюваність результатів); продуктивність (кількість проаналізованих зразків за одиницю часу); рівень автоматизації (кількість операцій, які виконуються без втручання оператора у відношенні до загальної кількості операцій).

4.2 Метрологічні показники системи

Проведено оцінювання системи за характеристиками, визначеними в підрозділі 4.1.

4.2.1 Роздільна здатність

Роздільна здатність системи визначається характеристиками металографічного мікроскопа VM4500 і визначається співвідношенням довжини хвилі світла λ до нумеричної апертури об'єктива A [36] і становить

$$L = \frac{\lambda}{2A} = \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (4.1)$$

де n – показник заломлення світла у середовищі між фільтром і об'єктивом (для повітря $n = 1$);

α – отвірний кут, тобто кут між двома крайніми променями, які потрапляють до оптичної системи об'єктива від однієї точки на фільтрі.

Оскільки при дослідженні використовується біле світло, то для розрахунків довжину хвилі світла можна прийняти $\lambda \approx 550$ нм (середина спектра видимого світла). Таким чином, при збільшенні у 100 разів роздільна здатність оптичного мікроскопа складає близько 500 нм або 0,5 мкм.

4.2.2 Контрастність

Контрастність у мікрофотографії визначається ступенем різниці в яскравості між найсвітлішими та найтемнішими частинами зображення. Контрастність зображення залежить від оптичної системи мікроскопа і досліджуваного зразка, умов освітлення, але найбільше – від характеристик камери. Вона визначає, наскільки чітко можна розрізнити об'єкти на загальному тлі. На контрастність впливає чутливість сенсора камери (ISO), глибина кольору цифрового зображення (24 біт для відтінків сірого), динамічний діапазон (співвідношення між найяскравішими та найтемнішими тонами, які може відобразити камера – близько 70 дБ). Контрастність оцінюється за стандартними тестами (наприклад, з використанням тест-об'єкта – сітки з відомою амплітудою оптичного сигналу) із розрахунком коефіцієнта контрастності K [37]:

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (4.2)$$

де I_{max} та I_{min} – відповідно максимальна й мінімальна інтенсивність яскравості (найсвітліша і найтемніша частина зображення).

Відповідно до проведених експериментів коефіцієнт контрастності для зображень, отриманих з камери, склав близько 0,64, що є прийнятним для задач контролю технічної чистоти. Слід зауважити, що завдяки використовуваному в роботі методу оброблення зображень досягається підвищення контрастності об'єктів, які відрізняються від екстремальних та середніх значень інтенсивності по зображенню.

4.2.3 Точність

Точність вимірювань для системи контролю технічної чистоти визначає, наскільки близький результат вимірювань (тобто кількість та площа частинок забруднення) реальному або істинному значенню і характеризується величиною похибки [38];

За результатами проведених досліджень, точність автоматизованого визначення кількості частинок забруднення визначалась на тестових знімках ділянок фільтра, які піддавались автоматичному контролю за допомогою розробленої системи і перевірялись за допомогою експертного контролю оператором (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Визначення точності підрахунку частинок забруднення

Тестовий зразок	Кількість частинок, виявлених системою, M	Кількість частинок, виявлених експертом, E	Відношення M / E
1	57	59	0,9661
2	67	71	0,9437
3	52	55	0,9455
4	61	63	0,9683
5	60	62	0,9677
Середнє значення			0,9582

Для розрахунку точності визначення площі проекції частинок забруднення важливим є калібрування мікроскопічної системи, що характеризується калібрувальним коефіцієнтом k , який визначається шляхом фотографування об'єкта з відомими розмірами (наприклад, калібрувальної сітки):

$$k = \frac{P_{real}}{P_{pixel}}, \quad (4.3)$$

де P_{real} – реальний розмір зразка в мікрометрах;

P_{pixel} – розмір об'єкта в пікселях.

Площа проекції частинки S розраховується шляхом підрахунку кількості пікселів Np , що складають її зображення, і множення цього числа на площу одного пікселя:

$$S = Np \cdot k^2. \quad (4.4)$$

Похибка визначення площі (ΔS) формується з двох складових [36]:

1) похибки дискретизації ΔS_d , яка залежить від роздільної здатності камери, а точніше від розміру одного пікселя I_p та кількості пікселів N_k , що формують контур (край) частинки:

$$\Delta S_d = N_k \cdot I_p^2 ; \quad (4.5)$$

2) похибка через шум та сегментацію $\Delta S_{ш}$, яка залежить від похибки визначення меж частинки Δx через шум (зазвичай це 1 піксель):

$$\Delta S_{ш} = 2 \cdot N_k \cdot \Delta x \cdot I_p . \quad (4.6)$$

Тоді загальна похибка визначення площі ΔS розраховується як

$$\Delta S = \sqrt{\Delta S_d^2 + \Delta S_{ш}^2} . \quad (4.7)$$

Точність вимірювання площі визначається відносною похибкою ε визначенні площі частинки, яка розраховується за формулою

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S_q} \cdot 100 \% . \quad (4.8)$$

де S_q – кількість пікселів, що формують проекцію частинки на зображенні.

Таким чином, точність визначення площі частинки буде залежати від розміру частинки (для менших за розміром частинок вона буде меншою), а також від форми частинок (для частинок округлої форми похибка буде малою, а для частинок складної форми з вигнутими контурами – вищою). Усереднені дані щодо розрахунку відносної похибки визначення площі частинок наведено у табл. 4.2.

Варто зазначити, що підвищити точність визначення площі частинок можна такими способами:

- 1) збільшити роздільну здатність камери (зменшуючи розмір пікселя);
- 2) застосовувати алгоритми зменшення шуму під час обробки зображень;
- 3) використовувати якісне освітлення та калібрувальні зразків.

Таблиця 4.2 – Визначення відносної похибки визначення площі частинок

Розмір частинки	Кількість аналізованих частинок	Усереднені значення		Відносна похибка
		ΔS	S_q	
10-100 мкм	26	267	2238	11,9 %
100-500 мкм	38	413	6432	6,4 %
500-1000 мкм	32	645	14346	4,5 %
Середнє значення				7,6 %

Як видно з таблиці, в середньому відносна похибка визначення площі частинки не перевищує 10 %, що відповідає вимогам технічного завдання.

4.2.4 Достовірність

Достовірність контролю можна оцінити як комплексний показник надійності і точності визначення кількості й площі частинок на мікрофотографіях фільтра за допомогою автоматизованої системи контролю технічної чистоти виробів електронної техніки з урахуванням хибно-позитивних результатів, тобто визначення частинок там, де їх немає. Такі випадки трапляються рідше, ніж хибно-негативні результати, особливо при застосуванні кольорових фільтрів (жовтих, світло-зелених, блакитних тощо).

Помилка виявлення [39] розраховується за формулою

$$D = 1 - \frac{N_x + N_0}{N_E}, \quad (4.9)$$

де N_x – кількість хибно виявлених частинок на зображенні;

N_0 – кількість невиявлених (пропущених) частинок на зображенні;

N_E – реальна кількість частинок на зображенні-еталоні.

Таким чином, достовірність системи контролю залежить від точності визначення частинок, точності розрахунку площі частинок, помилки виявлення, а також від відтворюваності результатів. Відповідно до проведених розрахунків, узагальнена оцінка достовірності системи склала 94,4 %.

Для підвищення достовірності системи, крім шляхів, описаних в п. 4.2.3, доцільною є розширена перевірка і налаштування алгоритму на тестових наборах даних з еталонними результатами. Також в подальшому для підвищення достовірності контролю технічної чистоти виробів електронної техніки рекомендується розглянути можливості застосування штучних нейронних мереж.

4.3 Висновок до розділу 4

В розділі розглянуті способи оцінювання ефективності роботи системи контролю технічної чистоти виробів електронної техніки, проведені відповідні дослідження та здійснені розрахунки її метрологічних характеристик (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Метрологічні характеристики системи контролю чистоти

Характеристика	Значення	Примітка
Роздільна здатність	0,5 – 1 мкм	Залежить від об'єктива
Коефіцієнт контрастності	0,64	Контрастність підвищується в процесі обробки зображень
Точність підрахунку кількості частинок	0,9582	Точність усереднена
Точність визначення площі частинок	0,924	Від 0,955 до 0,881 залежно від розміру частинки
Достовірність	0,944	По виявленню частинок

Точність системи в частині виявлення частинок склала 96 %, в частині визначення площі частинок точність залежить від розміру частинки і в середньому складає 92,4 %. Оцінка достовірності системи – 94,4 %. В цілому, можемо зробити висновок, що система є ефективною, тому що відповідає визначеним у розділі критеріям ефективності за технічними, методологічними, аналітичними та економічними характеристиками.

5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

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

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

5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Система контролю чистоти виробів електронної техніки» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 5.1 [40].

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

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування

10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	5	4	5
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	4	3
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	4	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	4	3	4
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	2	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	2
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	3	2
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	3	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	4	3
Сума балів	40	41	40
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	40,3		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 5.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 5.3 [40].

Таблиця 5.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

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

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Система контролю чистоти виробів електронної техніки» становить 40,3 бала, що, відповідно до таблиці 5.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Окрім комерційного аудиту розробки доцільно також розглянути технічний рівень якості розробки, розглянувши її основні технічні показники. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [41]:

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (5.1)$$

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу i -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом і при цьому має виконуватись умова $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$;

β_i – відносне значення i -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення β_i для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки:

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (5.2)$$

де I_{ni} та I_{na} – чисельні значення конкретного i -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки:

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (5.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
1 Збільшення	разів	150	250	1,7	0,15
2 Роздільна здатність	мкс	10	5	2	0,3
3 Точність діагностування	%	95	96	1,01	0,2
4 Достовірність	%	94	94	1	0,1
5 Автоматичне фокусування	-	немає	є	2	0,25

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе:

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 1,7 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,3 + 1,01 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,25 = 1,66.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,66 рази.

5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Система контролю чистоти виробів електронної техніки», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.3.1 Витрати на оплату праці

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

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (3_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [40]:

$$3_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.4)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

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

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

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

$$Z_o = 18400,00 \cdot 24 / 24 = 18545,52 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Науковий керівник дослідної роботи	18400,00	772,73	24	18545,52
Інженер-розробник систем автоматизованого контролю	17600,00	750,00	24	18000,00
Консультант (фахівець відділу контролю якості продукції)	17600,00	681,82	6	4090,92
Провідний фахівець	9000,00	375,00	12	4500,00
Всього				45136,44

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Система контролю чистоти виробів електронної техніки» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.5)$$

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

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

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.6)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [40];

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

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

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,15 / (24 \cdot 8) = 52,71 \text{ грн.}$$

$$З_{р1} = 52,71 \cdot 5,20 = 274,08 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Установка обладнання для проведення досліджень	5,20	2	1,10	52,71	274,08
Підготовка робочого місця розробника систем автоматизованого контролю якості продукції	8,00	3	1,35	64,69	517,50
Встановлення програмного забезпечення розробки електронних схем	5,60	4	1,50	71,88	402,50

Підготовка бази даних	8,20	3	1,35	64,69	530,44
Монтаж компонентів пристрою оптичного контролю параметрів чистоти	8,80	5	1,70	81,46	716,83
Випробування компонентів експериментальних блоків	6,20	5	1,70	81,46	505,04
Налагодження системи	4,30	6	2,00	95,83	412,08
Технічна підтримка експериментів	11,40	3	1,35	64,69	737,44
Всього					4095,92

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (5.7)$$

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

$$Z_{\text{доп}} = (45136,44 + 4095,92) \cdot 10 / 100\% = 4923,24 \text{ грн.}$$

5.3.2 Відрахування на соціальні заходи

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

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.8)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (45136,44 + 4095,92 + 4923,24) \cdot 22 / 100\% = 11914,23 \text{ грн.}$$

5.3.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Система контролю чистоти виробів електронної техніки».

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

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (5.9)$$

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

n – кількість видів матеріалів;

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

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

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

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

$$M_1 = 3,0 \cdot 195,00 \cdot 1,12 - 0 \cdot 0 = 655,20 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Багатофункціональний білий офісний папір OFFICE-500 A4	195,00	3,0	0	0	655,20
Папір для записів OFFICE 70 A5-250	86,00	3,0	0	0	288,96
Органайзер офісний OFFICE 100	175,00	2,0	0	0	392,00
Набір офісний DATUM 300	200,00	3,0	0	0	672,00
Картридж для принтера HP-5500	1012,00	1,0	0	0	1133,44
Склотекстоліт СТФ 2–1.5	101,00	0,1	0	0	11,31

Хлорне залізо	185,00	0,1	0	0	10,36
Дріт монтажний	80,00	0,1	0	0	4,48
Лак УР-231	360,00	0,1	0	0	20,16
Спирт етиловий	155,00	0,3	0	0	43,40
Припій ПОС-61	590,00	0,03	0	0	19,82
Флюс БС-2	120,00	0,0100	0	0	1,34
Кабель силовий	62,00	0,2100	0	0	14,58
Всього					3267,06

5.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Система контролю чистоти виробів електронної техніки», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.10)$$

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

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

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

$$K_6 = 1 \cdot 7200,00 \cdot 1,12 = 8064,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Камера до мікроскопу MICROmed MDC-500 5,0MP, USB2.0	1	7200,00	8064,00
Інтерфейс комп'ютерний	1	1100,00	1232,00
Монітор 23.8" Acer VG243YEBii (UM.QV3EE.E01)	1	3719,00	4165,28
Всього			13461,28

5.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спеу}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.11)$$

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

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

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

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спеу}} = 38162,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 42741,44 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.9:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Стереомікроскоп металографічний ММУ прямий	1	38162,00	42741,44
Установка для миття деталей та інструменту - 620-6240-2	1	6820,00	7638,40
Всього			50379,84

5.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (5.12)$$

де C_{inpr} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{prg.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{prg} = 360,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 399,60 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.10:

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Доступ до мережі Internet (високошвидкісний) грн/місяць	1	360,00	399,60
Прикладний пакет моделювання процесів MatLab	1	7646,00	8487,06
Всього			8886,66

5.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

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

$$A_{obl} = \frac{C_{\delta}}{T_{\epsilon}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.13)$$

де C_{δ} – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

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

T_{ϵ} – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (6600,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 183,33 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
ОС Windows 11	6600,00	3	1	183,33
Прикладний пакет Microsoft Office 2019	6650,00	3	1	184,72
Персональний комп'ютер	25370,00	2	1	1057,08
Обчислювально-графічна система моделювання	22490,00	2	1	937,08
Робоче місце розробника	9580,00	5	1	159,67
Пристрій графічного виводу інформації	8765,00	4	1	182,60
Оргтехніка	8925,00	4	1	185,94
Приміщення лабораторії	310000,00	25	1	1033,33
Мікроскоп металографічний прямий ВН200М-Р (відбите світло)	73000,00	7	1	869,05
Всього				4792,81

5.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.14)$$

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

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

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

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

$$B_e = 0,25 \cdot 170,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 466,65 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер	0,25	170,0	466,65
Обчислювально-графічна система моделювання	0,42	170,0	783,97
Робоче місце розробника	0,10	170,0	186,66
Пристрій графічного виводу інформації	0,24	10,0	26,35
Оргтехніка	0,45	4,0	19,76
Установка для миття деталей та інструменту - 620-6240-2	0,10	15,0	16,47
Мікроскоп металографічний прямий ВН200М-Р (відбите світло)	0,08	42,0	36,89
Монітор 23.8" Acer VG243YEBii (UM.QV3EE.E01)	0,06	42,0	27,67
Всього			1564,43

5.3.9 Службові відрядження

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

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

.

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

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

5.3.11 Інші витрати

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

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

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{ів}}}{100\%}, \quad (5.15)$$

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

$$I_{\text{в}} = (45136,44 + 4095,92) \cdot 50 / 100\% = 24616,18 \text{ грн.}$$

4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.16)$$

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

$$B_{нзв} = (45136,44 + 4095,92) \cdot 100 / 100\% = 49232,36 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Система контролю чистоти виробів електронної техніки» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 45136,44 + 4095,92 + 4923,24 + 11914,23 + 3267,06 + 13461,28 + 50379,84 + 8886,66 + 4792,81 + 1564,43 + 0,00 + 0,00 + 24616,18 + 49232,36 = 222270,44 \text{ грн.}$$

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

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

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

$$ЗВ = 222270,44 / 0,95 = 233968,89 \text{ грн.}$$

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

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи

іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Система контролю чистоти виробів електронної техніки» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку. *Розробка чи суттєве вдосконалення машини (механізму, приладу, пристрою) для використання кінцевими споживачами.*

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

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

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	50	50	75	50

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 2500 осіб;

C_o – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 15000,00 грн;

$\pm \Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 355,00 грн.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta \Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [40]:

$$\Delta \Pi_i = (\pm \Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho}{100}\right), \quad (5.19)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2024 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).

Прийmemo $\rho = 40\%$;

ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2024 році $\vartheta = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (355,00 \cdot 2500,00 + 15355,00 \cdot 50) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 450625,26 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (355,00 \cdot 2500,00 + 15355,00 \cdot 100) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 659637,52 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (355,00 \cdot 2500,00 + 15355,00 \cdot 175) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 973155,91 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (355,00 \cdot 2500,00 + 15355,00 \cdot 225) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 1182168,17 \text{ грн.}$$

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

$$\Pi\Pi = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.20)$$

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

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

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,1$;

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

$$\begin{aligned} \Pi\Pi &= 450625,26/(1+0,1)^1 + 659637,52/(1+0,1)^2 + 973155,91/(1+0,1)^3 + \\ &+ 1182168,17/(1+0,1)^4 = 409659,33 + 545154,98 + 731146,44 + 807436,77 = 2493397,51 \text{ грн.} \end{aligned}$$

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

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (5.21)$$

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

$3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 233968,89 грн.

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 233968,89 = 467937,77 \text{ грн.}$$

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

$$E_{абс} = III - PV \quad (5.22)$$

де III – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 2493397,51 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 467937,77 грн.

$$E_{абс} = III - PV = 2493397,51 - 467937,77 = 2025459,74 \text{ грн.}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_{ϵ} , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$E_{\epsilon} = \sqrt[T_{жс}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (5.23)$$

де $E_{абс}$ – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 2025459,74 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 467937,77 грн;

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

$$E_g = \sqrt[T_{жс}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 = (1 + 2025459,74/467937,77)^{1/4} = 0,52.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій τ_{min} :

$$\tau_{min} = d + f, \quad (5.24)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2024 році в Україні $d = 0,1$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, приймемо 0,3.

$\tau_{min} = 0,1 + 0,3 = 0,4 < 0,52$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_g , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Система контролю чистоти виробів електронної техніки» доцільно.

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

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (5.25)$$

де E_g – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 0,52 = 1,93 \text{ р.}$$

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

5.5 Висновки до розділу 5

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Система контролю чистоти виробів електронної техніки» становить 40,3 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,66 рази.

Також термін окупності становить 1,93 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Система контролю чистоти виробів електронної техніки».

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто сучасні вимоги та методи визначення технічної чистоти, а також їх застосування до виробництва виробів електронної техніки.

Розглянуто регламентацію контролю технічної чистоти, яка регулюється такими міжнародними стандартами як ISO 16232 та VDA 19, в яких визначені вимоги до процедур проведення контролю, описані методи і можливі засоби проведення досліджень, матеріали і технології контролю. Виконання вимог цього стандарту ISO 16232:2018 мінімізує ризики передчасного виходу виробів електронної техніки з ладу через забруднення в процесі виробництва.

Для роботи з електронними компонентами та іншими виробами електронної техніки найчастіше застосовується метод рідинної екстракції забруднень під тиском з подальшою фільтрацією екстракційної рідини, висушуванням фільтра, його зважуванням та подальшим дослідженням, яке може включати пришвидшений, стандартний або розширений аналіз. Для задач цієї роботи було обрано стандартний оптичний мікроскопічний аналіз, який є найбільш поширеним і важливим для контролю чистоти.

В роботі було визначено шляхи удосконалення методу визначення зображень частинок забруднень при контролі технічної чистоти виробів електронної техніки в межах стандартного мікроскопічного аналізу, а саме оброблення мікрофотографій фільтра. Операція візуального пошуку забруднень є найбільш тривалою та вимагає значних витрат трудових і часових ресурсів фахівця-контролера. Тому автоматизація й оптимізація процесу пошуку забруднень при є важливою задачею при визначенні технічної чистоти.

Було сформовано метод одержання зображень з камери мікроскопа та розраховано орієнтовну кількість кадрів, з яких формується зображення фільтра, запропоновано шлях для послідовного проходження об'єктива мікроскопа над всією поверхнею фільтра шляхом точного руху предметного столика.

Запропоновано виявлення і первинну класифікацію частинок забруднення за відхиленням від середнього значення інтенсивності пікселів на зображенні фільтра.

Розміри частинок будуть оцінюватись на основі геометричного параметра діаметра еквівалентного кола, рівного за площею площі проекції частинки.

Удосконалення методу виявлення і визначення частинок полягає в поєднанні статистичної і нечіткої обробки зображень, яка передбачає визначення середнього значення інтенсивності по зображенню, фазифікацію та інтенсифікацію зображення для підвищення контрасту і виявлення частинок, дисперсійний аналіз з одночасним розрахунком величини заповненості фільтра, площі кожної частинки, попереднє віднесення її до класу металічних або неметалічних частинок забруднення.

В магістерській роботі було проведено синтез системи контролю технічної чистоти виробів електронної техніки, яка повинна включати такі елементи: екстракційна шафа або установка для промивання, вакуумна фільтрувальна установка, сушильна шафа або інше обладнання для висушування фільтра, прецизійні ваги, мікроскоп з цифровою камерою та рухомим предметним столиком, комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

На базі металографічного мікроскопа VM4500 з цифровою камерою MICROmed MDC-500 розроблено мікроскопічну систему для контролю технічної чистоти. Точний рух предметного столика забезпечується кроковими двигунами PM35S-048, які приєднані до гвинтів мікроскопа і керуються драйвером L298N. Мікроскопічна система включає персональний комп'ютер, вимоги до якого визначаються роботою з великими зображеннями.

Розроблене програмне забезпечення, яке реалізує розроблений в розділі 2 метод визначення частинок забруднення на цифровому зображенні фільтра. Воно написане на мові програмування Java і забезпечує одержання масиву мікрофотографій фільтра, відповідне оброблення зображення, пошук частинок, розрахунок класифікаційних параметрів, побудову спектрів зображення із формуванням відповідних гістограм, відображення та збереження зображень. Програмне забезпечення складається з чотирьох модулів: модуля керування одержанням вхідних зображень, модуля оброблення зображення, модуля

користувачького інтерфейсу та модуля побудови гістограм і збереження (архівування) результуючих зображень.

Розроблена система реалізує розроблений метод і дозволяє автоматизувати процес контролю технічної чистоти виробів електронної техніки без використання дороговартісного спеціалізованого обладнання.

В роботі розглянуті способи оцінювання ефективності роботи системи контролю технічної чистоти виробів електронної техніки, проведені відповідні дослідження та здійснені розрахунки її метрологічних характеристик.

Точність системи в частині виявлення частинок склала 96 %, в частині визначення площі частинок точність залежить від розміру частинки і в середньому складає 92,4 %. Оцінка достовірності системи – 94 %. В цілому, можемо зробити висновок, що система є ефективною, тому що відповідає визначеним в роботі критеріям ефективності за технічними, методологічними, аналітичними та економічними характеристиками.

В економічному розділі було розраховано термін окупності системи, який становить 1,93 роки, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження цієї розробки та виведення її на ринок. Показано, що проведення науково-дослідної роботи за темою «Система контролю чистоти виробів електронної техніки» доцільне і перспективне.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Faber J., Brodzik K., Nycz M. Understanding technical cleanliness: importance, assessment, maintenance. *Combustion Engines*, 2021. 186 (3). P. 41–50.
2. Матвійчук В. Л., Карась О. В. Інформаційна технологія визначення технічної чистоти виробів електронної техніки. *Вища технічна освіта XXI століття: виклики, проблеми, перспективи: III Міжнародна науково-практична конференція*. 13 грудня 2024 р. Івано-Франківськ : Донбаська національна академія будівництва і архітектури, 2024. 5 с. URL: <https://peers.international/paper/informaciyna-tekhnologiya-viznachennya-tekhnichnoi-chistoti-virobiv-elektronnoi-tekhniki>
3. Meurer D., Mrak A. Inspection of technical cleanliness. *International conference FLUID POWER 2017*. Maribor : University of Maribor Press, 2017. P. 121–130.
4. ISO 16232:2018 Road vehicles — Cleanliness of components and systems. Edition 1, 2018. Geneva, Switzerland, 2018. 180 p.
5. Koevi M., Ji J. Technical cleanliness in electronics manufacturing. *PCIM Asia 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. Shanghai, China : VDE, 2020. P. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9273873>
6. Tourigny J. Why applying cleanliness standards to outsourced medical electronics is important. *Medical Product Outsourcing*, 2020. 18 (8). P. 36–38.
7. Isaacs P., Munson T. Cleanliness requirements: A moving target. *2019 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*. Kauai, HI, USA : IEEE, 2019. P. 1–10. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8696733>
8. Ambat R., Piotrowska K. PCBA cleanliness as a means to improve humidity robustness of electronics. *Proceedings of SMTA international conference*. 2019. P. 1–4. URL: https://www.researchgate.net/profile/Kamila-Piotrowska-2/publication/335826888_PCBA_cleanliness_as_a_means_to_improve_humidity_robustness_of_electronics

[tnness_of_electronics/links/5d7e02a392851c87c389de23/PCBA-cleanliness-as-a-means-to-improve-humidity-robustness-of-electronics.pdf](https://www.tnness_of_electronics/links/5d7e02a392851c87c389de23/PCBA-cleanliness-as-a-means-to-improve-humidity-robustness-of-electronics.pdf)

9. What is Technical Cleanliness? / *Nanoscience Instruments*. URL: <https://www.nanoscience.com/blogs/what-is-technical-cleanliness/>
10. Dzetzić A., Nagit G. Research on importance of cleanliness in manufacturing reliable products for automotive. *IMATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2017. Vol. 112. Art. 09017. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711209017>
11. Pečman J., Luptak V. Cleanliness test for variable packing solutions in the automotive supply chain. *The Archives of Automotive Engineering*. 2021. 91 (1). P. 49–62. URL: <https://doi.org/10.14669/AM.VOL91.ART4>
12. Oravec M., Divoková A., Lipovsky P. Technical cleanliness – a requirement of precision manufacturing. *Acta Mechanica Slovaca*. 2019. 23 (4). P. 46–51. URL: <https://doi.org/10.21496/ams.2020.008>
13. Kohli R. Methods for monitoring and measuring cleanliness of surfaces. *Developments in surface contamination and cleaning*. William Andrew Publishing, 2012. P. 107–178.
14. ISO 14644-1:2015 Cleanrooms and associated controlled environments. Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration. Edition 2, 2015. Geneva, Switzerland, 2015. 44 p.
15. Rossel H. Breaking down the technical cleanliness workflow. Part 1: Preparation. *Olympus inspection solutions*. 18 December, 2017. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/insight/breaking-down-the-technical-cleanliness-workflow-preparation/>
16. Awad S. B., Nagarajan R. Ultrasonic cleaning. *Developments in surface contamination and cleaning*. William Andrew Publishing, 2010. P. 225–280.
17. *Developments in surface contamination and cleaning*. Volume 12: Methods for assessment and verification of cleanliness of surfaces and characterization of surface contaminants / Eds.: R. Kohli, K. L. Mittal. Amsterdam : Elsevier, 2019. 256 p.
18. Moschner C., Kopp A. The influence of clothing in Technical Cleanliness / Dastex Reinraumzubehör. 13 October, 2022. URL:

https://www.dastex.de/fileadmin/2_Media/3_Veroeffentlichungen/en/Technische_Sauberkeit_Body-Box_Studie_09-2022_E.pdf

19. Laser-induced breakdown spectroscopy / Eds.: J. P. Singh, S. N. Thakur. Elsevier, 2020. 602 p.
20. Smith E., Dent G. Modern Raman spectroscopy: a practical approach. John Wiley & Sons, 2019. 244 p.
21. Rossel H. Breaking Down the Technical Cleanliness Workflow Part 2: Image Acquisition and Particle Measurement. *Olympus inspection solutions*. 22 January, 2018. URL: <https://www.olympus-ims.com/it/insight-old/breaking-down-the-technical-cleanliness-workflow-part-2/>
22. Merkus H. G. Particle size measurements: fundamentals, practice, quality. (Vol. 17). Springer Science & Business Media, 2009. 532 p.
23. Кобилін О. А., Творошенко І. С. Методи цифрової обробки зображень : навч. посібник. Харків : ХНУРЕ, 2021. 124 с.
24. Technical Cleanliness Inspection Solution. *JETBLUE CleanTec*. URL: <https://www.jetbluecleantec.com/products/technical-cleanliness-analysis-solution>
25. Büscher P. An Overview of the Washing Method in Component Cleanliness Inspections. *Olympus inspection solutions*. 5 January, 2023. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/insight/an-overview-of-the-washing/>
26. Cleanliness Testing. *Rocher Scientific*. URL: https://www.rocker.com.tw/en/application/components_and_parts_cleanliness_test/
27. Industrial hot air circulation oven. *Dongguan Liyi Environmental Technology*. URL: <https://mart.ecer.com/liyitech/pz67f8108-industrial-hot-air-circulation-oven-rt-100-c-within-10-min-200-600-temperature-range.html>
28. VM4500 Non-transparent Object Research Metallurgical Microscope with Epi-illumination System. *Microscope X*. URL: <https://www.microscopex.com/1769-vm4500.html>
29. Silaban F. A., Budiyo S., Raharja W. K. Stepper motor movement design based on FPGA. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020. 10 (1). P. 151–159.

30. Bradbury S. The evolution of the microscope. Oxford : Pergamon Press, Elsevier, 2014. 357 p.
31. Acarnley P. Stepping motors: a guide to theory and practice. 4th edition. (Control engineering series no. 63). Milton Keynes : Lighting Source UK Ltd., 2007. 160 p.
32. Stärk R. F., Schmid J., Börger E. Java and the Java virtual machine: definition, verification, validation. Springer Science & Business Media, 2012. 380 p.
33. Васильєв О. М. Програмування мовою Java. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2021. 696 с.
34. Ефективність інформаційних систем / уклад. О. Я. Мишишин. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2017. 98 с.
35. Мустецов Т. М., Нечипоренко А. С. Теорія біотехнічних систем : навчальний посібник. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2015. 188 с.
36. Bajcsy P., Chalfoun J., Simon M., Kociolk M., Brady M. Object measurements from 2D microscopy images. *Computer Vision for Microscopy Image Analysis*. Academic Press, 2021. P. 159–183.
37. Грицик В. В. Основні оцінки якості зображення, які сьогодні використовуються при розв’язуванні проблеми автоматичної обробки образів. *Штучний інтелект*. 2017. № 1. С. 38–44
38. Барибін О. І. Основи метрології : конспект лекцій. Вінниця : ДонНУ, 2015. 150 с.
39. Методичні вказівки до виконання курсових і кваліфікаційних робіт для студентів напряму підготовки «Опtotехніка» і спеціальності «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» спеціалізації «Лазерна техніка та оптоінформатика» / уклад.: Г. Д. Дорощенко, Н. І. Заболотна. Вінниця : ВНТУ, 2017. 57 с.
40. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / уклад. В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.

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

Додаток А
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи
на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: Система контролю чистоти виробів електронної техніки

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
(МКР, БДР)

Підрозділ: кафедра БМІОЕС, ФІЕС, група ЛТО-23м

Керівник: Карась О. В., старший викладач каф. БМІОЕС

Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	99 %
Загальна схожість	1 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

У 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату

☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на дорацювання.

☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень

Заявляю, що ознайомлений з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор


(підпис)

Матвійчук В. Л.

(прізвище, ініціали)

Керівник


(підпис)

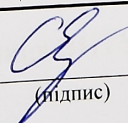
Карась О. В.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Допущено до захисту

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Тужанський С. Є.
(прізвище, ініціали)

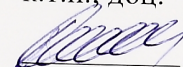
ДОДАТОК Б
(Обов'язковий)

Вінницький національний технічний університет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. каф. БМІОЕС,

К.Т.Н., доц.

 Л. Г. Коваль

« 17 » 09 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

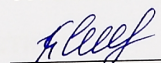
«Система контролю чистоти виробів електронної техніки»

08-41.МКР.005.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д-р філософії,

ст. викл. кафедри БМІОЕС

 Карась О. В.

Виконавець: ст. гр. ЛТО-23м

 Матвійчук В. Л.

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від 17.09.2024 р., № 310 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 17.09.2024 р.

Дата закінчення: 29.11.2024 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є удосконалення процесу визначення технічної чистоти виробів електронної техніки шляхом автоматизації виявлення частинок забруднення на цифрових мікрофотографіях поверхні фільтрів та розроблення системи контролю технічної чистоти.

В магістерській кваліфікаційній роботі для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такий перелік завдань:

- проаналізувати методи і засоби визначення технічної чистоти;
- розробити метод визначення і класифікації зображень частинок забруднення на мікрофотографіях поверхні фільтра;
- розробити автоматизовану систему контролю технічної чистоти виробів електронної техніки на базі неспеціалізованого мікроскопа;
- провести дослідження методу і системи контролю технічної чистоти, оцінити її метрологічні характеристики.

Об'єкт дослідження – процес визначення технічної чистоти виробів електронної техніки.

Предмет дослідження – метод і система для автоматизованого визначення і контролю рівня технічної чистоти виробів електронної техніки.

3 ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ МКР

1. ISO 16232:2018 Road vehicles — Cleanliness of components and systems. Edition 1, 2018. Geneva, Switzerland, 2018. 180 p.

2. Meurer D., Mrak A. Inspection of technical cleanliness. International conference FLUID POWER 2017. Maribor : University of Maribor Press, 2017. P. 121-130.
3. Koevi M., Ji J. Technical cleanliness in electronics manufacturing. PCIM Asia 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Shanghai, China : VDE, 2020. P. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9273873>
4. Isaacs P., Munson T. Cleanliness requirements: A moving target. 2019 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific). Kauai, HI, USA : IEEE, 2019. P. 1–10. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8696733>
5. Ambat R., Piotrowska K. PCBA cleanliness as a means to improve humidity robustness of electronics. Proceedings of SMTA international conference. 2019. P. 1–4. URL: https://www.researchgate.net/profile/Kamila-Piotrowska-2/publication/335826888_PCBA_cleanliness_as_a_means_to_improve_humidity_robustness_of_electronics/links/5d7e02a392851c87c389de23/PCBA-cleanliness-as-a-means-to-improve-humidity-robustness-of-electronics.pdf

4 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Основними вимогами є:

- 1 Функціональне призначення системи: визначення та контроль частинок забруднення на мікрофотографіях фільтрів.
2. Мікроскоп: кристалографічний, тринокулярний, роздільна здатність не більше 1 мкм.
3. Камера: роздільна здатність не менше 4,3 МП, спектральний діапазон – від 400 нм до 900 нм, активний діапазон не менше 70 дБ, інтерфейс USB.
4. Функції оброблення й аналізу отриманих зображень: статистичний аналіз, нечіткий аналіз, класифікація.
5. Точність вимірювання і достовірність контролю – не менше 90 %.

5 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	закінчення	
1.	Розробка, погодження та затвердження технічного завдання (ТЗ)	17.09.2024	30.09.2024	Розроблене ТЗ
2.	Аналіз методів і засобів визначення технічної чистоти	17.09.2024	4.10.2024	Розділ 1
3.	Розроблення методу визначення і класифікації зображень частинок	4.10.2024	25.10.2024	Розділ 2
4.	Розроблення архітектури системи для контролю чистоти виробів електронної техніки	15.10.2024	08.11.2024	Розділ 3
5.	Дослідження методу і системи контролю технічної чистоти	08.11.2024	22.11.2024	Розділ 4
6.	Економічна частина	09.11.2024	29.11.2024	Розділ 5
7.	Оформлення необхідної технічної документації. Підготовка МКР до публічного захисту	29.11.2024	19.12.2043	МКР

6 ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ І ПРИЙМАННЯ

Контроль за виконанням МКР та її етапів покладається на керівника. Приймання МКР здійснюється шляхом публічного захисту перед екзаменаційною комісією, призначеною наказом ректора ВНТУ.

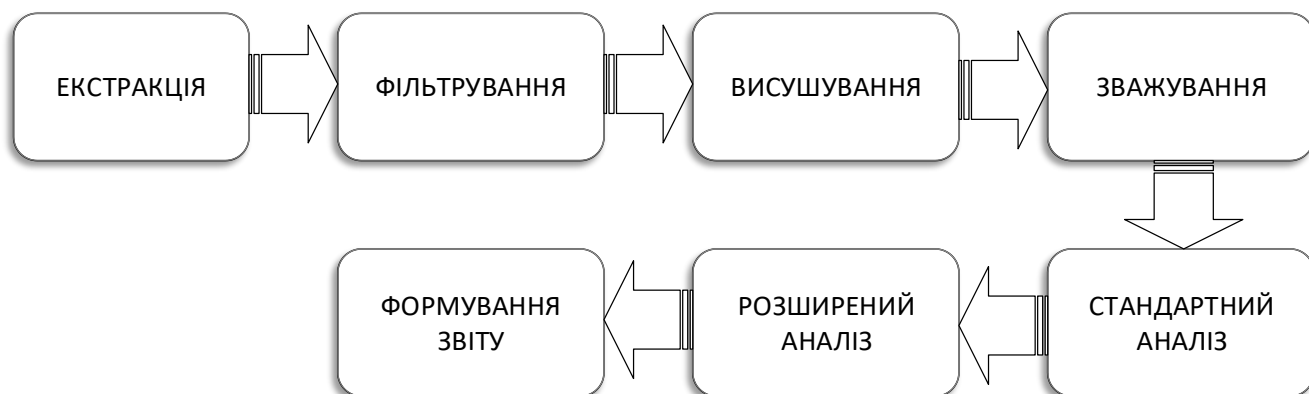
7 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

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

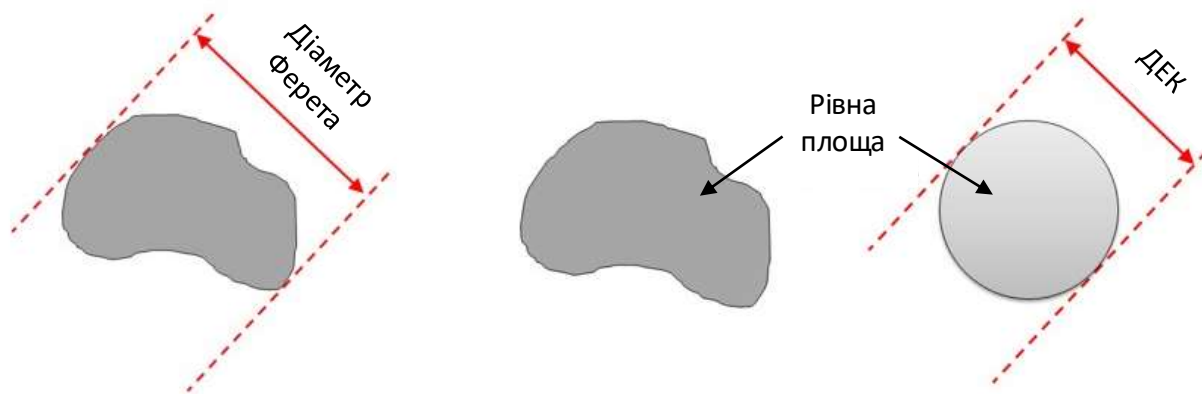
Додаток В
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЧИСТОТИ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Процес визначення технічної чистоти



Оцінювання розмірів частинок



Метод визначення частинок за зображеннях

Цифрове зображення – фото $M \times N$, цілий фільтр – K фотографій.

Визначення статистичного розподілу параметру інтенсивності.

1) Визначення усередненого значення інтенсивності:

$$\bar{X} = \frac{1}{K \cdot M \cdot N} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X(k, m, n),$$

2) Перетворення до середнього:

$$X^*(k, m, n) = \begin{cases} (X(k, m, n) - X_{\min}) \cdot \frac{0,5}{\bar{X} - X_{\min}}, & \bar{X} - X_{\min} > X_{\max} - \bar{X}, \\ 1 - (X_{\max} - X(k, m, n)) \cdot \frac{0,5}{X_{\max} - \bar{X}}, & \bar{X} - X_{\min} < X_{\max} - \bar{X}, \end{cases}$$

3) Підвищення контрасту зображення:

$$X^{**}(k, m, n) = \begin{cases} 2 \cdot X^{*2}(k, m, n), & 0 \leq X^*(k, m, n) \leq 0,5 \\ 1 - (2 \cdot (1 - X^*(k, m, n))^2), & 0,5 < X^*(k, m, n) \leq 1 \end{cases}$$

4) Оцінка вибіркової дисперсії:

$$\bar{D} = \frac{1}{K \cdot M \cdot N} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (X^{**}(k, m, n) - 0,5)^2.$$

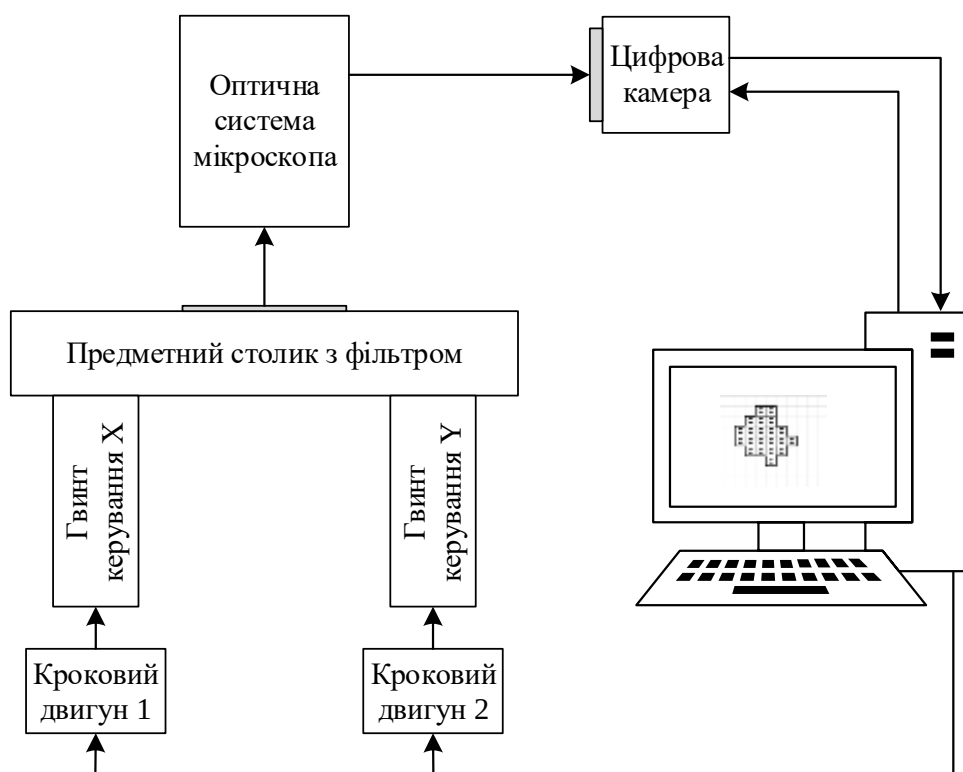
5) Підрахунок пікселів, які формують частинки:

$$C = \begin{cases} C = 0, & k = m = n = 0 \\ C = C + 0, & (X^{**}(k, m, n) - 0,5)^2 \leq \bar{D} \\ C = C + 1, & (X^{**}(k, m, n) - 0,5)^2 > \bar{D} \end{cases}$$

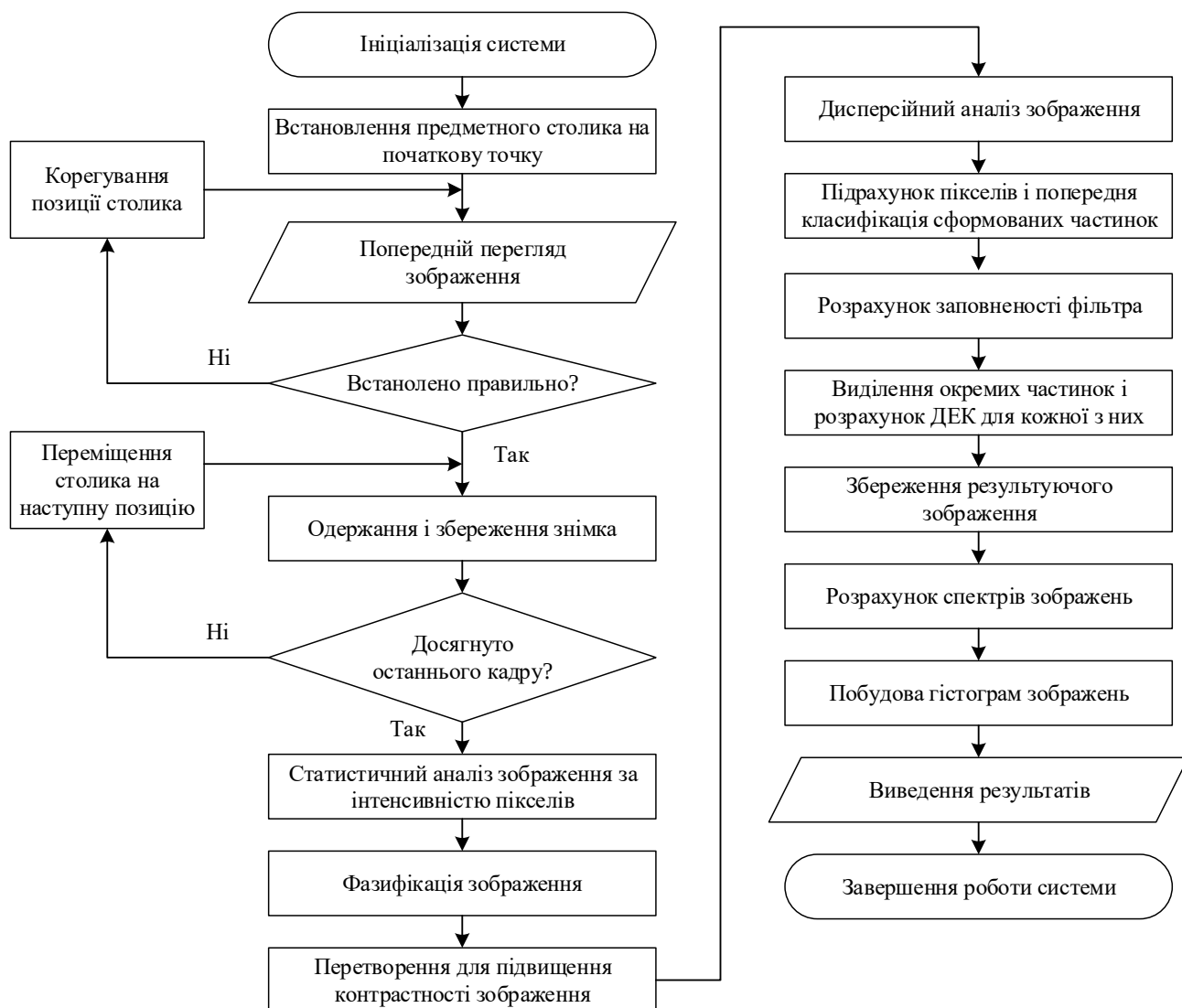
6) Заповненість фільтра (критерій контролю):

$$Z = \frac{C}{K \cdot M \cdot N}.$$

Структура системи контролю технічної чистоти



Алгоритм роботи системи і програмного забезпечення



Додаток Г
(довідковий)
Лістинг програми

Клас Main

```
import java.io.File; public class
Main {
    public static int nomK, nomG, max; public static
    File img;
    public static int col[] = new int[256]; public static
    int persent;

    public static void main(String[] args) {
        // TODO Auto-generated method stub MainG
        maG = new MainG();

        maG.stvor();
    }
}
```

Клас MainG

```
import java.awt.Color; import
java.awt.Dimension; import
java.awt.Font;
import java.awt.GridBagConstraints; import
java.awt.GridBagLayout; import
java.awt.Insets;
import java.awt.event.ActionEvent; import
java.awt.event.ActionListener; import
java.sql.ResultSet;
import java.sql.SQLException; import
javax.swing.*;
public class MainG {
    public static ImageIcon image; public
    static JFrame frame; public static
    JLabel label;

    public static JComboBox combo;

    // this.EXIT_ON_CLOSE; MainG() {
        image = new ImageIcon(getClass().getResource("f1.jpg"));
    }
    public void stvor() {
        frame = new JFrame(); frame.setTitle("Обробка
        зображень"); frame.setSize(400, 300);
        frame.setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE); frame.setLocationRelativeTo(null);

        Font font = new Font("TimesRoman", Font.BOLD, 30); Font font1
        = new Font("TimesRoman", Font.BOLD, 24);
        // zaput.setBackground(Color.RED); label = new
        JLabel(); label.setLayout(new GridBagLayout());
        label.setVisible(true);
        label.setBackground(Color.BLUE);
        label.setIcon(image);

        JButton btnAuto = new JButton();

        btnAuto.setText("Почати аналіз"); btnAuto.setFont(font);
    }
}
```

```

        label.add(btnAuto, new GridBagConstraints(0, 1, 1, 1, 0.0, 0.9,
        GridBagConstraints.NORTH,
        GridBagConstraints.HORIZONTAL, new Insets(100, 10, 10, 10), 0, 0));
        btnAuto.addActionListener(new Listener());
        frame.add(label); frame.setVisible(true);

    }

    public void shov() { frame.setVisible(false);
        frame.remove(label);
    }
    public class Listener implements ActionListener { @Override
        public void actionPerformed(ActionEvent JCom) { JFileChooser
            fileChooser = new JFileChooser();
            fileChooser.showDialog(label, "Open");

            Main.img=fileChooser.getSelectedFile(); shov();

            Men m = new Men(); m.stvor();
        }
    }
}

Клас Men

import java.awt.Color;
import java.awt.Font;
import java.awt.GridBagConstraints; import
import java.awt.GridBagLayout; import
import java.awt.Insets;
import java.awt.event.ActionEvent; import
import java.awt.event.ActionListener;

import javax.swing.ImageIcon; import
import javax.swing.JButton; import
import javax.swing.JFrame; import
import javax.swing.JLabel;
import javax.swing.JPasswordField; import
import javax.swing.JTextField;

public class Men {
    public static ImageIcon image; public
    static JFrame frame; public static
    JLabel label;

    public JTextField textLogin;
    public JPasswordField textPassword;
    // this.EXIT_ON_CLOSE; Men() {
        image = new ImageIcon(getClass().getResource("f1.jpg"));
    }

    public void stvor() {
        frame = new JFrame(); frame.setTitle("Обработка
        изображень"); frame.setSize(800, 600);
        frame.setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE); frame.setLocationRelativeTo(null);

        Font font = new Font("TimesRoman", Font.BOLD, 30); Font font1
        = new Font("TimesRoman", Font.BOLD, 24);
        // zaput.setBackground(Color.RED); label = new
        JLabel(); label.setLayout(new GridBagLayout());
        label.setVisible(true);
        label.setBackground(Color.BLUE);
        label.setIcon(image);
    }
}

```



```

import javax.imageio.ImageIO; import
javax.swing.ImageIcon;          import
javax.swing.JFrame;
public class Gist {
    public static ImageIcon image; public
    static JFrame frame;
    public static int day, month, year; public static
    String dat;

    Gist() {
        image = new ImageIcon(getClass().getResource("f1.jpg"));
        // setTitle("Прогнозування завантаженості сервера");
        // setSize(800, 600);
        // setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
        // setLocationRelativeTo(null);
        // setVisible(true);
    }
    public void stvor() {
        frame = new JFrame(); String
        s="";
        if(Main.nomG==4){
            s="Гістограма інтенсивності";
        }
        frame.setTitle(s);
        frame.setSize(800, 600);
        frame.setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
        frame.setLocationRelativeTo(null);
        frame.setLayout(new GridBagLayout()); try {

            File file = Main.img;
            BufferedImage source = ImageIO.read(file);

            BufferedImage result = new BufferedImage(source.getWidth(), source.getHeight(),
source.getType());

            for (int x = 0; x < source.getWidth(); x++) {
                for (int y = 0; y < source.getHeight(); y++) {

                    System.out.println("Файл не знайдено або не вдалось зберегти");
                }
            }

            frame.setVisible(true);

            GraphicsPanel graphicsPanel = new GraphicsPanel();

            frame.add(graphicsPanel, new GridBagConstraints(0, 0, 1, 1, 1, 1,
GridBagConstraints.CENTER,
GridBagConstraints.BOTH, new Insets(0, 0, 0, 0), 0, 0)); frame.setVisible(true);
        }
    }
}

```

Клас GraphicsPanel

```

import java.awt.BasicStroke; import
java.awt.Color;
import java.awt.Font; import
java.awt.Graphics;
import java.awt.Graphics2D; import
java.awt.Rectangle;
import java.awt.geom.RoundRectangle2D.Double; import
java.util.Random;

```

```

import javax.swing.JPanel; import
org.w3c.dom.css.Rect;
public class GraphicsPanel extends JPanel { private
    Line line;
    public GraphicsPanel() {
        line = new Line(25, 100, 30, 20);
    }

    @Override
    public void paintComponent(Graphics g) { Graphics2D
        g2 = (Graphics2D) g;
        // g2.draw(line);
        Color newColor = new Color(139, 0, 0);
        g2.setStroke(new BasicStroke(6.0f));
        g2.setColor(newColor);
        g2.drawLine(9, 530, 777, 530);
        Font font1 = new Font("TimesRoman", Font.BOLD, 14); Font font =
        new Font("TimesRoman", Font.BOLD, 10); Font font2 = new
        Font("TimesRoman", Font.BOLD, 18);
        g2.setStroke(new BasicStroke(3.0f));
        Color newColor1 = new Color(0, 58, 250, 100);
        g2.setColor(newColor1);
        for (int i = 0; i < 255; i++) {
            float h = 500f / (float) Main.max * (float) Main.col[i]; int hh = (int)
            h;
            g2.drawLine(9 + i * 3, 527, 9 + i * 3, 527 - hh); Main.col[i]=0;
        }
        // g2.setStroke(new BasicStroke(6.0f));
        /*
        * g2.setColor(newColor1); g2.drawLine(30, 505, 750, 505);
        * g2.drawLine(30, 480, 750, 480); g2.drawLine(30, 455, 750, 455);
        * g2.drawLine(30, 430, 750, 430); g2.drawLine(30, 405, 750, 405);
        * g2.drawLine(30, 380, 750, 380); g2.drawLine(30, 355, 750, 355);
        * g2.drawLine(30, 330, 750, 330); g2.drawLine(30, 305, 750, 305);
        * g2.drawLine(30, 280, 750, 280); g2.drawLine(30, 255, 750, 255);
        * g2.drawLine(30, 230, 750, 230); g2.drawLine(30, 205, 750, 205);
        * g2.drawLine(30, 180, 750, 180); g2.drawLine(30, 155, 750, 155);
        * g2.drawLine(30, 130, 750, 130); g2.drawLine(30, 105, 750, 105);
        * g2.drawLine(30, 80, 750, 80); g2.drawLine(30, 55, 750, 55);
        * g2.setColor(Color.BLUE);
        */

        // g2.drawRect(30, 50, 250, 250);

        // g2.drawLine(750, 530, 750, 30);

    }
}
import javax.imageio.ImageIO; import java.io.File;
import java.awt.Color;
import java.awt.image.BufferedImage; import java.io.IOException;
public class Image {
    public static void main(String[] args) { try {

```

Knac Image

```

        BufferedImage source = ImageIO.read(file);
        BufferedImage result = new BufferedImage(source.getWidth(), source.getHeight(),
source.getType());
        for (int x = 0; x < source.getWidth(); x++) {

```



```

    for (int y = 0; y < source.getHeight(); y++) {
        Color color = new Color(source.getRGB(x, y));

        int blue = color.getBlue();
        int red = color.getRed();
        int green = color.getGreen();

        int grey = (int) (red * 0.299 + green * 0.587 + blue * 0.114);
        int newRed = grey; int
        newGreen = grey; int
        newBlue = grey;

        Color newColor = new Color(newRed, newGreen, newBlue);

        result.setRGB(x, y, newColor.getRGB());
    }
}

File output = new File("grey.jpg");
ImageIO.write(result, "jpg", output);

} catch (IOException e) {

    System.out.println("Помилка");
}
}
}

```

Клас Line

```

import java.awt.geom.Line2D; import
java.awt.geom.Point2D; import
java.awt.geom.Rectangle2D;
public class Line extends Line2D{ private
    Point p1;
    private Point p2;

    public Line(){
        p1 = new Point(); p2 =
        new Point();
    }

    public Line(double x1, double y1, double x2, double y2){ p1 = new
        Point(x1, y1);
        p2 = new Point(x2, y2);
    }

    @Override
    public Rectangle2D getBounds2D() {
        // TODO Auto-generated method stub return null;
    }

    @Override
    public Point2D getP1() {
        // TODO Auto-generated method stub return p1;
    }

    @Override
    public Point2D getP2() {
        // TODO Auto-generated method stub
        return p2;
    }
}

```

```

@Override
public double getX1() {
    // TODO Auto-generated method stub return
    p1.getX();
}

@Override
public double getX2() {
    // TODO Auto-generated method stub return
    p2.getX();
}

@Override
public double getY1() {
    // TODO Auto-generated method stub return
    p1.getY();
}

@Override
public double getY2() {
    // TODO Auto-generated method stub return
    p2.getY();
}

@Override
public void setLine(double x1, double y1, double x2, double y2) {
    // TODO Auto-generated method stub
    p1.setLocation(x1, y1); p2.setLocation(x2, y2);
}
}

```

Knac Point

```

import java.awt.geom.Point2D; public class
Point extends Point2D{
    private double x; private
    double y;

    public Point() {
        // TODO Auto-generated constructor stub
    }

    public Point(double x, double y) { this.x=x;
        this.y=y;
    }

    @Override
    public double getX() {
        // TODO Auto-generated method stub return x;
    }

    @Override
    public double getY() {
        // TODO Auto-generated method stub return y;
    }

    @Override
    public void setLocation(double arg0, double arg1) {
        // TODO Auto-generated method stub this.x=x;
        this.y=y;
    }
}

```