

*І.Ш. НЕВЛЮДОВ, д-р техн. наук, О.М. ЛІСТРАТЕНКО, канд. техн. наук, І.В. БОРЦОВ*

## **АВТОМАТИЗОВАНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ОПТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ГНУЧКИХ НАДТОНКИХ МІКРОКАБЕЛІВ**

### **Вступ**

Сьогодні важко уявити подальший розвиток багатьох галузей промисловості без розвитку досягнення найбільшої точності при вимірюваннях, меншої кількості помилок при контролі та підвищенні ймовірності виявлення критичних дефектів при виробництві. Таким чином, підвищення ефективності в умовах промислової революції Індустрії 4.0 насамперед пов'язане з автоматизацією технологічних процесів, які використовуються на сучасному етапі промислового розвитку [1]. Сучасні високотехнологічні електронні засоби (ЕЗ) створюються на основі друкованого монтажу, коли згідно з існуючими прогнозами у подальші роки очікується збільшення використання гнучких друкованих плат (ДП) для різноманітного використання [2]. Максимально високі вимоги щодо надійності вимагають ЕЗ спеціального призначення, в тому числі сенсорні модулі для приймачів електромагнітних випромінювань, а саме рентгенівського і гамма-випромінювання, концентрованого сонячного випромінювання та ін. Це відноситься також до багатосенсорних матричних приймачів, які мають жорсткі вимоги до точності їх встановлення на друковані плати. Останні інновації в галузі кремнієвих технологій візуалізації подій в експериментах фізики високих енергій відкрили виняткові можливості для нових концепцій детекторних систем, у тому числі можливість використання інтеграції кремнієвих піксельних сенсорів, електроніки зчитування та обробки інформації для створення єдиного чутливого кремнієвого елемента. Такий підхід був прийнятий та успішно реалізований при створенні монолітних активних піксельних сенсорів (MAPS) ALPIDE 4 для вирішення одного з основних завдань сучасної фізики високих енергій, яка полягає у вивченні фазової діаграми стану сильно взаємодіючої матерії. Зокрема MAPS піксельні сенсори ALPIDE 4 також успішно застосовуються у детекторних системах нового покоління для дослідження частинок високих енергій на основі гнучких тонких безадгезивних алюміній-поліімідних (Al-Pi) між'єднань (мікрокабелів) зі значно зниженою матеріаломісткістю та підвищеною роздільною здатністю [3].

Оптичні методи контролю гнучких Al-Pi мікрокабелів з надтонкими алюмінієвими (Al) провідниками (15 – 30 мкм), що застосовуються для перевірки якості мікрокабелів, дозволяють забезпечити відповідність продукції встановленим вимогам ще до її надходження у виробництво. Оптичний метод дослідження мікрокабелів ґрунтується на таких явищах, як відображення, поглинання, інтерференція та дифракція світла. При виготовленні фотошаблонів та мікрокабелів застосовуються різні матеріали, які по-різному взаємодіють із оптичним випромінюванням. Вони знайшли широке застосування під час виробництва мікрокабелів спеціального призначення для виявлення таких дефектів як раковини, тріщини, вириви на тонких провідниках і навіть неточностей розміщення контактних майданчиків і провідників; зміни ширини провідників; підтравлювання та нависання провідників; дефекти металізації та ін. Однак оптичний контроль за допомогою оператора має ряд недоліків – суб'єктивність і низька достовірність, а також низька продуктивність для складних виробів з надтонкою топологією, що може призвести до пропуску критичних дефектів. Метод автоматичного оптичного контролю (автоматична перевірка зовнішнього вигляду) всебічно використовує технологію аналізу зображення та автоматичного управління процесом виявлення дефектів, що виникають у виробництві різноманітних гнучких друкованих плат та друкованих вузлів. Таким чином, можливості автоматизованих систем для оптичного контролю мікрокабелів спеціального призначення з надтонкою топологією дозволяють здійснювати більш якісний контроль на всіх етапах виробництва компонентів і складання друкованих виробів з виключенням грубих помилок, які допускаються під час ручного візуального контролю [4, 5].

Метою даної роботи є створення інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) автоматизованого оптичного контролю для розширення її функціональних можливостей за рахунок комплексної автоматизації отримання та обробки інформації при виявленні критичних поверхневих дефектів, що впливають на якість і надійність надтонких гнучких АІ-Рі мікрокабелів та перевірки відповідності провідних малюнків розроблених мікрокабелів вимогам конструкторської документації.

## **1. Предмет та методи дослідження**

### **1.1. Завдання роботи**

1) Проведення аналізу видів критичних та малозначних дефектів АІ-Рі гнучких ДП та ДВ на їх основі та розроблення їх систематизації.

2) Проведення аналізу методів виявлення дефектів та отримання і обробка інформації, що реалізують ці методи.

3) Розробка структурної схеми ІВС для оптичного контролю гнучких надтонких мікрокабелів для гнучко-жорстких сенсорних модулів та друкованих виробів (ДВ) для цифрових трекових калориметрів у протонних комп'ютерних томографах.

4) Розробка програмного забезпечення для автоматизації контрольних-перевірочних операцій гнучких надтонких мікрокабелів на основі стандартних методів програмування.

5) Технічне забезпечення та оснащення робочого місця для автоматизованого оптичного контролю гнучких надтонких мікрокабелів.

### **1.2. Методи дослідження**

Методи дослідження в рамках даної роботи базуються на використанні теорії інформаційно-вимірювальних систем, обробки зображень, а також принципів системного аналізу. Для автоматизації процесів контролю використовуються стандартне програмне забезпечення, розроблене із застосуванням сучасних методів програмування, а також спеціалізовані алгоритми для аналізу топології провідників та ідентифікації дефектів. Апаратне забезпечення базується на методах схемотехніки для забезпечення точності й надійності оптичного контролю.

### **1.3. Критерії виявлення дефектів при оптичному контролі друкованих мікрокабелів**

Основним стандартом за вимогами до дефектів ДП є IPC-A-600H "Acceptability of Printed Boards", в якому описано прийнятні (і неприйнятні) дефекти для різних класів точності та критеріїв при прийманні мікрокабелів. У стандарті IPC-A-600H виділено критерії приймання друкованих мікрокабелів за зовнішніми ознаками – ознаками дефектів, які можна спостерігати та вимірювати з поверхні мікрокабелю. До характеристик критеріїв надтонких гнучких мікрокабелів за зовнішніми ознаками, контрольованих на поверхні відносять:

- дефекти поверхні – задирки, вибоїни, подряпини, виїмки, забруднення, частинки, що налипли, та інші;

- дефекти під поверхнею – включення сторонніх матеріалів, розшарування, порожнечі у ламінаті тощо;

- дефекти провідного малюнка – втрата адгезії, зменшення ширини чи товщини провідника через вибоїни, мікроотвори, подряпини, дефекти металізації чи захисного покриття поверхні. Характеристики отворів – діаметр, помилка усунення, сторонній матеріал та дефекти металізації чи захисного покриття;

- дефекти маркування – положення, розмір та точність;

- розмірні характеристики – розміри та товщина мікрокабелів, розміри отворів та точність їх розташування, ширина та відстань між провідниками, точність положення монтажних площин.

Поділ дефектів за значимістю на критичні, значні та малозначні має велике значення при обґрунтуванні планів при проведенні оптичного контролю мікрокабелів. Критичним називається дефект, за наявності якого використання виробу за призначенням є практично неприпустимим. Значний дефект – це дефект, який суттєво впливає на використання виробу за призначенням та (або) на його довговічність, але він не є критичним. Малозначним називається дефект, який суттєво не впливає на використання виробу за призначенням та його довговічність.

При оптичному контролі гнучки надтонки мікрокабелі повинні проходити 100 %-ну перевірку зовнішнього вигляду на відповідність конструкторській документації, перевірку на відсутність видимих забруднень поверхні мікрокабелів та пошкоджень елементів топології у провідних малюнках та відсутність налиплих частинок.

#### **На гнучких мікрокабелях не допускаються:**

- забруднення, які не знімаються пензликом;
- відсутність маркування;
- відшарування алюмінієвих Al елементів від поліімідної (Pi) плівки, які визначаються візуально по задирці країв алюмінієвих елементів;
- розрив Al провідників та закоротки між ними;
- наявність залишків Pi плівки на Al провідниках у вікнах в Pi плівці;
- наскрізні протрави в Al провідниках у зонах зварювання;
- деформація мікрокабелів, що призводить до заломів;
- деформація Al провідників у зонах зварювання.

#### **На гнучких мікрокабелях допускаються:**

- локальні подряпини, вириви і раковини в Al провідниках як наскрізні до Pi шару, так і не наскрізні поза зоною зварювання, якщо частина Al провідника, що залишилася, не менше 0,5 його ширини;
- локальне зменшення ширини зазору між сусідніми провідниками Al не більше 0,5 ширини зазору;
- раковини у Pi діелектрику з розмірами не більше 200 мкм на 1см<sup>2</sup> при кількості не більше 2 шт.;
- протрави в Pi діелектрику з розмірами не більше ширини Al провідника;
- розрив сусідніх перемичок у перфорації при кількості не більше 4 шт.

### **1.4. Критичні дефекти та пошкодження при зовнішньому огляді та контролі мікрокабелів на відповідність конструкторській документації**

- 1) Забруднення, які не знімаються пензликом.
- 2) Наскрізні протрави Al провідників у зонах зварювання.
- 3) Наявність розривів Al провідників та закороток у провідному малюнку мікрокабелю.
- 4) Відшарування Al провідників від Pi покриття.
- 5) Залишки Pi у зоні зварювання.
- 6) Деформація мікрокабелів, що призводить до зламів.
- 7) Деформація Al провідників у зонах зварювання.
- 8) Відсутність маркування.
- 9) Відстань між знаками суміщення по осі X, мм.
- 10) Відстань між знаками суміщення по осі Y, мм.
- 11) Ширина перфорації, що відокремлює технологічні області, мм.
- 12) Ширина Al провідників у зонах зварювання, мм.
- 13) Розміри вікон у Pi шарах у зонах зварювання, мм.
- 14) Відстань між Al провідниками у верхніх частинах зон зварювання, мм.
- 15) Відстань між Al провідниками у нижніх частинах зон зварювання, мм.

## 2. Розробка структурної схеми та програмного забезпечення ІВС оптичного контролю гнучких Al-Pi надтонких мікрокабелів

### 2.1. Структурна схема автоматизованої ІВС

До складу ІВС для автоматизованого оптичного контролю гнучких мікрокабелів входять: оптична система, система освітлення, система фіксації та позиціонування а також програмне забезпечення. За допомогою цифрової відеокамери здійснюється оптичний огляд мікрокабелів, а також здійснюється перевірка наявності сторонніх включень до них. Система побудована на основі цифрової відеокамери з матриці на приладах з зарядовим зв'язком (CCD – charge-coupled devices). Кольорове зображення з високою роздільною здатністю виводиться на монітор персонального комп'ютеру. Область захоплення зображення та програмне забезпечення, що застосовується, дозволяють здійснювати огляд, створювати базу даних зображень і проводити вимірювання геометричних параметрів елементів мікрокабелів.

Розроблена укрупнена блок-схема алгоритму виявлення та класифікації критичних дефектів і пошкоджень при загальному зовнішньому огляді мікрокабелів представлена на рис. 1.

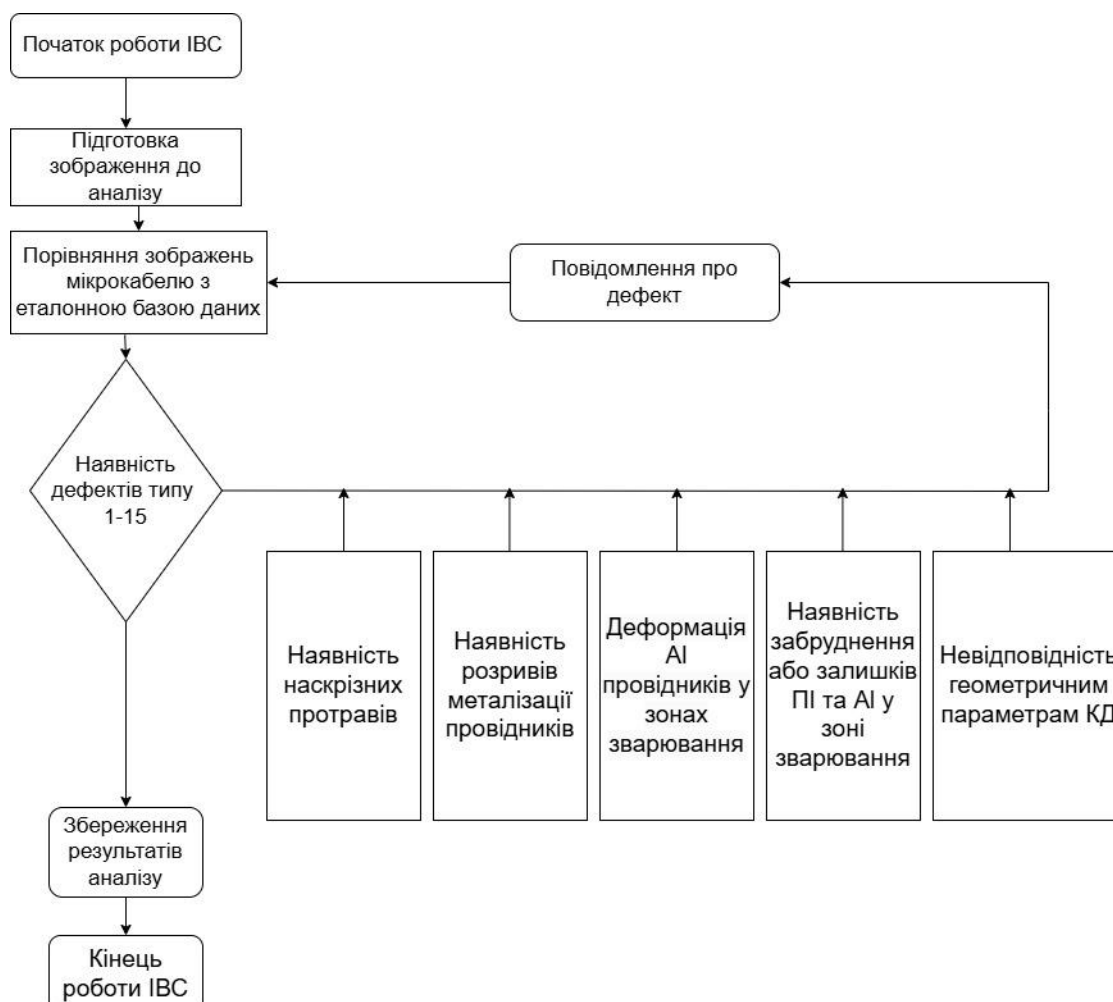


Рис. 1. Блок-схема алгоритму виявлення та класифікації дефектів

### 2.2. Програмне забезпечення автоматизованої ІВС

Програмне забезпечення ІВС на основі середовища MATLAB поєднує високорівневу технічну обчислювальну мову та інтерактивне середовище для автоматизованого детектування поверхневих дефектів гнучких мікрокабелів, що може використовуватися на виробництві.

тві. Дана система надає користувачеві багатофункціональне та ефективне середовище цифрової обробки двовимірних зображень Image Processing Toolbox як сукупність функцій, написаних мовою MATLAB, для вирішення широкого кола завдань цифрової обробки зображень, що значно розширює базову функціональність середовища програмування. У середовищі MATLAB розробляються алгоритми для автоматизованого аналізу зображень гнучких AI-Pi мікрокабелів для виявлення ключових критеріїв дефектів і параметрів. Алгоритми передобробки відповідають за покращення якості зображень, видалення шуму та підготовку до подальшого аналізу. Сегментація об'єктів виділяє зони інтересу, такі як провідники та зварювальні області, для детального дослідження. Алгоритми вимірювання геометричних параметрів забезпечують автоматичне визначення відстаней, розмірів вікон та ширини провідників з подальшою перевіркою на відповідність технічної документації. Для виявлення дефектів застосовуються методи аналізу провідного малюнка, що дозволяє виявляти розриви, наскрізні протрави, забруднення та деформації. Також реалізуються алгоритми класифікації дефектів за їх значимістю та автоматизована система формування звітів, де фіксуються результати контролю та місцезнаходження виявлених дефектів.

### 3. Технічне забезпечення та оснащення робочого місця для автоматизованої ІВС

У табл. 1 представлено перелік типів пристроїв, які включені до складу ІВС.

Таблиця 1

Перелік та типи пристроїв для ІВС

Найменування	Тип
Цифрова кольорова ПЗЗ відеокамера для отримання зображення	AmScope MU1403
Світлодіодний освітлювач	ГУ-60
Мікроскоп	Konus Crystal
Система фіксації та позиціонування мікрокабелю	Пластиковая рамка TAB-70022
Ноутбук	Lenovo IdeaPad 520-15 Ikb

#### 3.1. Основні характеристики пристроїв, які включені до складу ІВС

**Вимірювальний мікроскоп Konus Crystal.** Сучасний модульний вимірювальний мікроскоп відбитого світла з тринокулярною насадкою складається з високоякісних компонентів та надійного і міцного штатива. Мікроскоп поставляється з освітлювачем падаючого світла з тринокулярною насадкою для підключення цифрової кольорової відеокамери. Мікроскоп призначений для проведення візуального контролю та вимірювання дрібних об'єктів та має серійний вихід для передачі даних статистичного контролю технологічного процесу на комп'ютері.

**Відеокамера для отримання зображення AmScope MU1403.** Для вибору камери проведено аналіз існуючих моделей відеокамер за основними характеристиками, що забезпечують точність і зручність контролю: роздільна здатність не гірша за 1920 x 1080, розміри не більше 75 x 45 мм, маса не більше 500 г. У цифровій камері AmScope MU1403 забезпечується необхідна якість зображення, також вона має прийнятні габаритні розміри і вагу, що визначає можливість її встановлення в блоці переміщення.

**Світлодіодний освітлювач ГУ-60.** Ефективне висвітлення має вирішальне значення для оптичного контролю. Різні системи освітлення (наприклад, світлодіодні матриці) використовуються для освітлення гнучкого мікрокабелю, покращуючи видимість потенційних дефектів. Швидкість обробки зображення менше 10 мс.

**Составна пластикова рамка ТАВ-70022** для фіксації та позиціонування гнучкого мікрокабелю. Пластикова рамка ТАВ-70022 забезпечує механічну стійкість та стабільність положення мікрокабелю у площині.

Фіксація та позиціонування гнучких Al-Pi мікрокабелів при оптичному контролі здійснюється достатньо просто за допомогою пластикової рамки ТАВ-70022. Пластикова рамка ТАВ-70022 від адаптера socket IC51-4364-1221-1 забезпечує механічну стійкість та стабільність положення мікрокабелю у площині. Составна пластикова рамка ТАВ-70022 для фіксації та позиціонування гнучкого мікрокабелю має розміри вікна у рамці 52 x 52 мм. У рамку встановлюється гнучкий Al-Pi мікрокабель з розмірами не більше 70 x 70 мм.

На рис. 2 представлено основні пристрої для оснащення робочого місця з ІВС для автоматизованого оптичного контролю гнучких Al-Pi надтонких мікрокабелів.

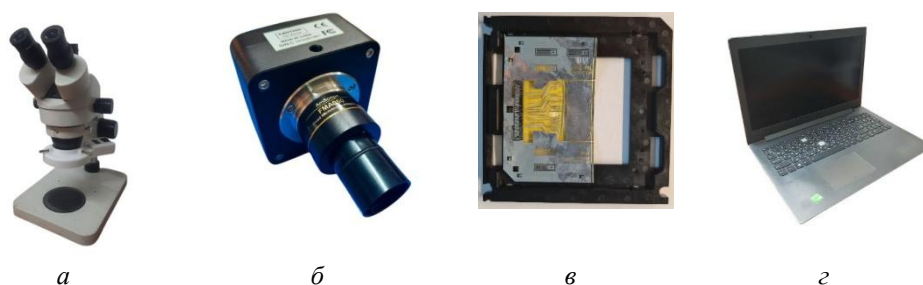


Рис. 2. Основні пристрої для оснащення робочого місця: *а* – мікроскоп Konus Crystal з світлодіодним освітлювачем TY-60; *б* – відеокамера AmScore MU1403; *в* – составна рамка ТАВ-70022 у зборі з мікрокабелем; *г* – ноутбук Lenovo IdeaPad 520-15 Ikb

Процес встановлення гнучкого надтонкого Al-Pi мікрокабелю у составну рамку показано на рис. 3.

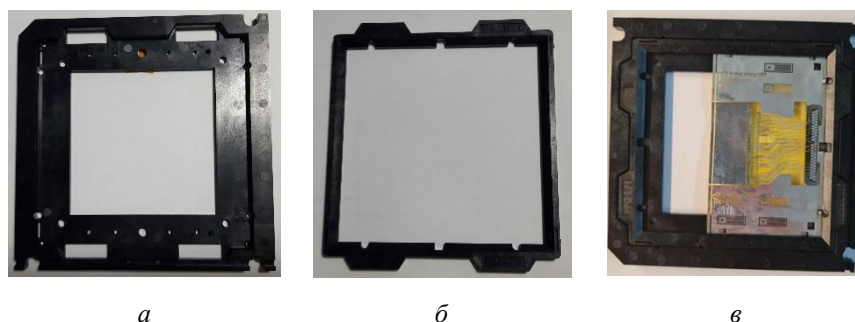


Рис. 3. Процес встановлення гнучкого надтонкого Al-Pi мікрокабелю у составну рамку ТАВ-70022 для фіксації та позиціонування: *а* – нижня рамка-основа; *б* – верхня рамка для кріплення мікрокабелю; *в* – составна рамка ТАВ-70022 у зборі з мікрокабелем

#### 4. Результати та їх обговорення

У роботі створено ІВС автоматизованого оптичного контролю, що може використовуватися на виробництві для розширення функціональних можливостей за рахунок комплексної автоматизації отримання та обробки інформації при виявленні критичних дефектів, що впливають на якість і надійність гнучких Al-Pi надтонких мікрокабелів та перевірки відповідності їх вимог до конструкторської документації, що надходять до складально-монтажних операцій.

ІВС має широкий набір функцій та характеристик, які дозволяють ефективно виявляти різноманітні дефекти при забезпеченні якості та надійності виготовлення мікрокабелів.

У тому числі:

- висока роздільна здатність, що дозволяє точно визначати розміри та положення дефектів на гнучких мікрокабелях;
- спеціалізоване програмне забезпечення, яке забезпечує автоматичний процес виявлення дефектів;
- висока швидкодія виявлення дефектів;
- надійність та точність виявлення дефектів, що дозволяє впевнено встановлювати якість мікрокабелів та уникати дефектних екземплярів.

Програмне забезпечення ІВС виявлення дефектів гнучкого Al-Pi мікрокабелю реалізовано у вигляді виконуваного файлу, який призначений для запуску на комп'ютері зі встановленою ОС Windows 10 і вище та за наявності необхідних зовнішніх бібліотек. Процес автоматизованого оптичного контролю гнучкого Al-Pi надтонкого мікрокабелю починається з ініціалізації ІВС та підготовки її до аналізу. Після запуску система формує зображення мікрокабелю, яке потім проходить попередню обробку для покращення якості зображення поверхні та підготовки його до детального аналізу. На наступному етапі система порівнює отримане зображення з еталонними даними бази, щоб виявити відхилення від норми. У процесі оптичного контролю перевіряється наявність критичних дефектів та пошкоджень у мікрокабелі при зовнішньому огляді поверхні, а також забруднень, які не знімаються пензликом. Додатково система контролює відповідність геометричних розмірів вимогам конструкторської документації. При виявленні будь-якого критичного дефекту система формує повідомлення, фіксуючи інформацію про характер і місцезнаходження дефекту (проблеми). Отримана інформація зберігається для формування звітів та для подальшого аналізу.

Робоче місце для оптичного контролю параметрів надтонких Al-Pi мікрокабелів наведено на рис. 4.

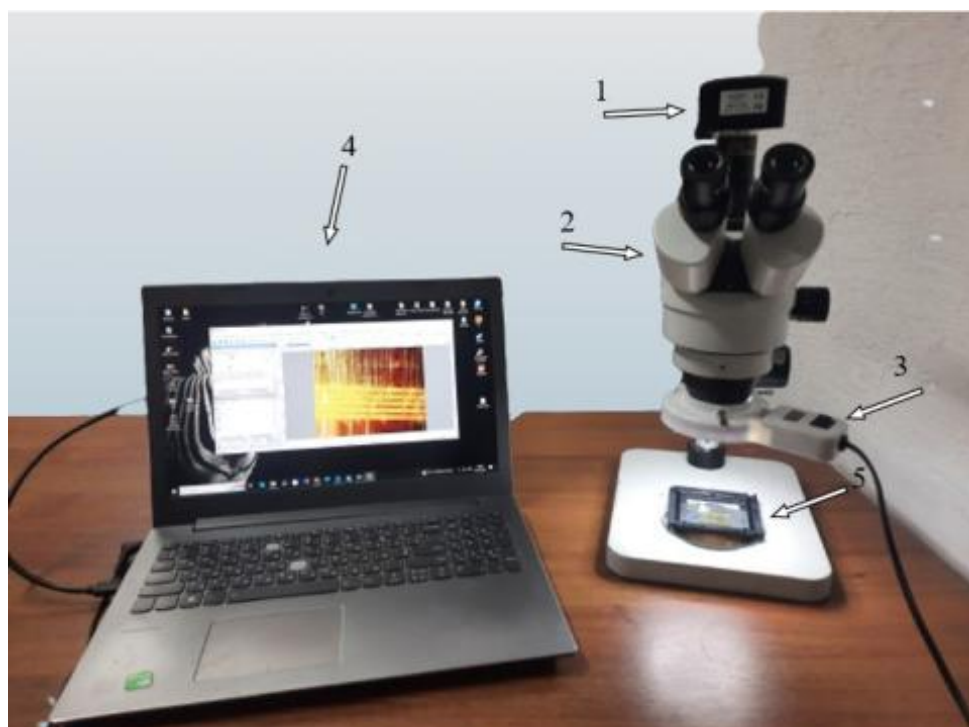


Рис. 4. Робоче місце для автоматизованого оптичного контролю мікрокабелів:

1 – цифрова кольорова відеокамера для отримання зображення (AmScope MU1403); 2 – Мікроскоп (Konus Crystal); 3 – світлодіодний освітлювач (TY-60); 4 – ноутбук (Lenovo IdeaPad 520-15 Ikb); 5 – мікрокабель у рамці (Пластикова рамка TAB-70022)

Надтонкі мікрокабелі розроблені та виготовлені на основі нового типу безадгезивного Al-Pi лакофольгового діелектрику власного виробництва марки ЛТУ-ФПА15-10

(Al – 15 мкм, Pi – 10 мкм) компанії ТОВ «НВП «ЛТУ» для тестування ІВС. Тестування ІВС виконано при оптичному контролі партії надтонких мікрокабелів, кожний з яких має 128 тонких Al ланцюгів з шириною порядку 60 – 95 мкм, кроком 200 мкм та відстанню між Al провідниками близько 140 – 105 мкм. У тому числі:

- відстань між знаками суміщення по осі X,  $64,06 \pm 0,030$  мм;
- відстань між знаками суміщення по осі Y,  $30,03 \pm 0,015$  мм;
- розміри вікна у ПІ (Зона II),  $0,15 \pm 0,015$  мм;
- розміри вікна у ПІ (Зона III),  $(0,25 \times 0,4) \pm 0,02$  мм;
- розмір вікна у ПІ (Зона V),  $(0,25 \times 0,4) \pm 0,02$  мм;
- відстань між Al провідниками у верхній частині зони,  $17,6 \pm 0,01$  мм;
- відстань між Al провідниками в нижній частині зони,  $25,96 \pm 0,01$  мм.

ІВС забезпечує виконання основних вимог до перевірки геометричних розмірів високотехнологічних гнучких надтонких Al-Pi мікрокабелів на відповідність конструкторській документації та отримання і обробки інформації при виявленні критичних поверхневих дефектів, що впливають на якість і надійність надтонких гнучких Al-Pi мікрокабелів MAPS піксельних сенсорів детекторних модулів нового покоління зі значно зниженою матеріаломісткістю та підвищеною роздільною здатністю для частинок високих енергій, що досліджуються у детекторних системах нового покоління для досліджень у фізиці високих енергій.

Проте, для ще більшого поліпшення якості автоматизованої системи оптичного контролю гнучких Al-Pi мікрокабелів, яка була розроблена та протестована для виробництва, перспективним напрямком є включення до складу ІВС глибоких нейронних мереж. Наприклад, у роботі [6] успішно використана нейронна мережа YOLOv5 – одна з найпотужніших та найефективніших глибоких нейронних мереж для оптичного огляду об'єктів, яка поєднує високу швидкість та точність роботи. Серед доступних рішень модель YOLOv5 виявилася оптимальною, оскільки забезпечує високу швидкість і точність аналізу, що критично важливо для контролю дефектів ДП у виробничих умовах. Завдяки своїй ефективності YOLOv5 дозволяє виконувати аналіз зображень у реальному часі, виявляючи та класифікуючи дефекти із мінімальними затримками.

YOLO (You Only Look Once) – це серія моделей глибокого навчання, призначених для швидкого та точного виявлення об'єктів на зображеннях. Основна ідея моделей YOLO полягала в тому, щоб замість традиційних підходів, які розбивають процес на кілька етапів (спочатку пошук об'єкта, а потім його класифікація), виконується вся обробка за один прохід через нейронну мережу. Це зробило YOLO однією з найшвидших архітектур для детекції об'єктів у ДП. YOLO знайшла широке застосування у різних сферах, включаючи автоматизовані системи відео спостереження, безпілотні транспортні засоби, медичну діагностику, контроль виробничих дефектів та аналіз супутникових зображень.

Впровадження цього підходу дозволяє значно підвищити точність і швидкість виявлення дефектів, автоматизувати класифікацію різних типів пошкоджень та мінімізувати кількість хибних спрацьовувань. Однією з ключових переваг YOLOv5 є її здатність до роботи в режимі реального часу, що особливо важливо для промислових процесів, де необхідний швидкий і точний аналіз кожного контрольованого зразка. Дана модель дозволяє не лише детектувати наявність дефектів, а й класифікувати їх на основі навчальних вибірок, що включають різні типи механічних пошкоджень, забруднень, порушень геометрії тощо. Впровадження YOLOv5 у систему контролю дасть можливість адаптувати її до нових видів дефектів шляхом до навчання моделі на актуальних даних, що підвищить її ефективність при зміні технологічних параметрів виробництва. Технологічна реалізація цього підходу базується на використанні OpenCV для попередньої обробки зображень, що включає фільтрацію шумів, корекцію контрастності та підсилення видимості дефектів перед передачею в нейромережу. Використання платформи PyTorch забезпечить ефективне навчання та виконання моделі YOLOv5, а при застосуванні апаратного прискорення на базі CUDA або TensorRT можна значно підвищити швидкість системи. Це дозволить інтегрувати рішення в реальні вироб-



ничі умови, де критичними параметрами є швидкість аналізу та надійність контролю. Принцип роботи вдосконаленої системи передбачає кілька основних етапів. На першому етапі здійснюється автоматизований збір зображень мікрокабелів у процесі контролю, після чого вони проходять попередню обробку для покращення якості аналізу. Далі підготовлені зображення передаються в модель YOLOv5, яка виконує детекцію дефектів і класифікує їх відповідно до типів. Отримані результати порівнюються з еталонними зображеннями, що дозволяє виявляти навіть незначні відхилення від норми та корелювати виявлені дефекти з відповідною конструкторською документацією. Після завершення аналізу формується автоматизований звіт, який містить інформацію про типи виявлених дефектів, рівень браку та можливі причини їх виникнення. Очікувані результати впровадження YOLOv5 включають значне скорочення часу аналізу зображень, що підвищить продуктивність контролю без зниження його якості. Гнучкість та адаптивність моделі дозволить автоматично підлаштовувати систему до змін у виробничому процесі, а глибоке навчання на нових даних сприятиме підвищенню точності детекції навіть складних та нетипових дефектів. Важливим аспектом є й підвищення загальної ефективності оптичного контролю, що забезпечить зменшення відсотка браку та покращення якості виготовлених мікрокабелів. Попередні обчислення показали, що після впровадження цієї технології час на контроль однієї плати скорочується до 0,1 с, якщо використовувати потужні прискорювачі обчислень – блоки обробки тензорів (TPU) та графічні процесори (GPU) [6, 7].

### **Висновки**

Виконано аналіз видів критичних та малозначних дефектів гнучких Al-Pi мікрокабелів та розроблено їх систематизацію. Проведено детальне дослідження методів виявлення дефектів, отримання та обробки інформації, що дозволило вибрати оптимальні підходи для автоматизованого оптичного контролю. Розроблено структурну схему ІВС оптичного контролю, яка забезпечує ефективне виявлення дефектів у гнучких надтонких мікрокабелів, що застосовуються у сенсорних модулях та цифрових трекових детекторних калориметрів. Виконано технічне забезпечення та оснащення робочого місця ІВС, що включає сучасні засоби оптичного аналізу та комп'ютерної обробки даних.

Створено ІВС автоматизованого оптичного контролю, що може використовуватися на виробництві і має широкий набір функцій та характеристик, які дозволяють ефективно виявляти різноманітні поверхневі дефекти при забезпеченні високої якості та надійності гнучких надтонких Al-Pi мікрокабелів.

Проаналізовано сучасні методи покращення точності та швидкості оптичного контролю системи, що була розроблена та протестована, що дозволило визначити перспективні напрями подальшого вдосконалення системи.

Зокрема, досліджено можливість впровадження у ІВС, сучасної нейронної мережі YOLOv5, яка дозволяє значно підвищити ефективність аналізу, скоротити час обробки зображень та ще більше автоматизувати процес класифікації дефектів. Впровадження YOLOv5 забезпечує швидке виявлення найдрібніших дефектів у реальному часі та адаптацію системи до дослідження та перевірки нових типів дефектів завдяки можливості до навчання моделі. Розробка та навчання нейронної мережі та впровадження елементів штучного інтелекту до складу ІВС оптичного контролю гнучких Al-Pi надтонких мікрокабелів дозволяють надійно поєднати автоматизацію, високу швидкість та точність роботи розробленої системи оптичного контролю у промисловому виробництві.

### **Список літератури:**

1. Сторожик Д.В. Технології опрацювання зображень на основі комплексування даних : огляд / Д. В. Сторожик, А. Г. Протасов // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. 2022. № 4. С. 17–26.
2. Романов В. Перспективи розвитку друкованих плат // Електронні компоненти і системи. 2024. № 1. С. 40–42.

3. Innovative microelectronic technologies for high-energy physics experiments / V. M. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko, I.T. Tymchuk I. et al. // Functional materials. 2017. Vol. 24, № 1. P. 143–153. (включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus).
4. Sharma A, Garg S. Automated Optical Inspection Systems for Defect Detection on Printed Circuit Boards Garg // The international journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. P. 32–37.
5. Khan M., Khan K., Anwar N. Automated Visual Inspection for Quality Control of Printed Circuit Boards // Annual technical Symposium. 2022. P. 9–19.
6. Крецул В.В. Прилад для автоматизованого контролю друкованих плат : дипломна робота бакалавра. 2023. 85с.
7. Qin, L. Printed Circuit Board Defect Detection Methods Based on Image Processing, Machine Learning and Deep Learning // Survey. 2021. P. 449–458

*Надійшла до редколегії 07.01.2025*

*Відомості про авторів:*

**Невлюдов Ігор Шакирович** - д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки; Україна; e-mail: [igor.nevliudov@nure.ua](mailto:igor.nevliudov@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

**Лістратенко Олександр Михайлович** – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», провідний науковий співробітник; Україна; e-mail: [sasha.listratenko.12@gmail.com](mailto:sasha.listratenko.12@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-5295>

**Борщов Ілля Вячеславович** – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки; Україна; e-mail: [illia.borshchov1@nure.ua](mailto:illia.borshchov1@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6598-6988>.