

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Факультет електроніки  
Кафедра електронних приладів та пристроїв**

«На правах рукопису»  
УДК 621.386.8

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
зі спеціальності 171 –Електроніка  
Спеціалізація «Електронні прилади та пристрої»**

на тему: **«Автоматизація технології рентгенівського контролю  
якості виробів»**

**Виконав:**

Студент 6 курсу, гр. ДЕ-61М **Волощенко Володимир Вікторович** \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

Доцент, канд. техн. наук

**Терлецький О.В.**

\_\_\_\_\_

**Нормоконтроль:**

Доцент, канд. техн. наук., с.н.с.

**Жовнір М.Ф.**

\_\_\_\_\_

**Рецензент:**

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2018

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

Факультет (інститут) \_\_\_\_\_ Е л е к т р о н і к и

Кафедра \_\_\_\_\_ Електронні прилади та пристрої

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – **171– Електроніка (Електронні прилади та пристрої)**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко  
«\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Волощенко Володимира Вікторовича**

**1. Тема дисертації** «Автоматизація технології рентгенівського контролю якості виробів» і науковий керівник дисертації Терлецький Олександр Володимирович, доцент, к.т.н.

затверджені наказом по університету від «\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 р. №\_\_\_\_\_

**2. Термін подання студентом дисертації:** «\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 р.

**3. Об'єкт дослідження:** спеціалізований відеопроцесор рентгенівського тіньового зображення

**4. Предмет дослідження:** На базі порівняльного огляду науково-технічної літератури щодо методів рентгенівського контролю якості виробів розробити алгоритми роботи, електричну принципову схему, друковану плату спеціалізованого відеопроцесора рентгенівського тіньового зображення. Вхідний телевізійний сигнал 625 рядків, 50 полів, черзрядкова розгортка. Амплітуда телевізійного відеосигналу 1В. Вихід – телевізійний, композитний відеосигнал амплітудою 1В. Схема відеопроцесора має забезпечити статичну обробку вхідного телевізійного сигналу, методом накопичення кадрів телевізійного

зображення за час регульованої експозиції. Потрібно забезпечити автоматичний вибір тривалості експозиції. Живлення 5В.

**5. Перелік завдань, які потрібно розробити:** Огляд науково-технічної літератури по методах рентгенівського контролю якості: рентгенографія, комп'ютерна рентгенографія, рентгеноскопія; розробка алгоритмів роботи відеопроцесора в режимі накопичення та прямого каналу; розробка структурної та функціональної схем відеопроцесора; розробка електричної принципової схеми та друкованої плати.

**6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:** Функціональна та структурна схеми відеопроцесора; плакати з електричною принциповою, функціональною та структурною схемами.

#### **7. Перелік публікацій:**

1. Волощенко В. В., к.т.н. Терлецький О.В. «Система керування відеопроцесором на мікроконтролері STM-32», перспективні напрямки сучасної електроніки : збірник матеріалів X-ї науково-практичної конференції. НТУУ КПІ, ФЕЛ, 7-8 квітня 2016р. С. 150-154

2. Волощенко В. В., к.т.н. Терлецький О.В. «Адаптація аналогового сигнального процесора до параметрів відеосигналу», перспективні напрямки сучасної електроніки : збірник матеріалів XI-ї науково-практичної конференції. НТУУ КПІ, ФЕЛ, 6-7 квітня 2017р. С. 167-172

3. Волощенко В. В., Городецький Б.М., к.т.н. Терлецький О.В. «спеціалізований відеопроцесор для радіоскопічних систем промислового призначення», перспективні напрямки сучасної електроніки : збірник матеріалів XII-ї науково-практичної конференції. НТУУ КПІ, ФЕЛ, 6-7 квітня 2018р. С. 155-161

**8. Дата видачі завдання : 12.02.2018**

### Календарний план

| №<br>з/п | Назва етапів виконання<br>магістерської дисертації                               | Термін<br>виконання<br>етапів магістер-<br>ської дисертації | Примітка |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------|
| 1.       | Огляд науково-технічної літератури по методам рентгенівського контролю якості    | 10.04.2018                                                  |          |
| 2.       | Розробка функціональної, та структурної схеми                                    | 20.04.2018                                                  |          |
| 3.       | Розробка електричної принципової схеми та розводка друкованої плати              | 30.04.2018                                                  |          |
| 8.       | Оформлення пояснювальної записки, креслення та плакатів.<br>Підготовка доповіді. | 15.05.2018                                                  |          |

Студент гр. ДЕ-61 М

В.В. Волощенко

Науковий керівник дисертації

О.В. Терлецький

## РЕФЕРАТ

**Автоматизація технології рентгенівського контролю якості виробів/** Магістерська дисертація зі спеціальності 171– Електроніка спеціалізації «Електронні прилади та пристрої». **Волощенко Володимир Вікторович.** НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-61М : НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. – 130 с., іл. 39, табл. 27.

**Ключові слова:** автоматизація, рентгеноскопія, дефектоскопія, фільтрація шумів, аналогово-цифрове перетворення, обробка в реальному масштабі часу, мікроконтроллер, STM32.

**Короткий зміст роботи:** в дипломній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по рентгеноскопії, рентгенографії, шумам рентгенівського випромінювання.

Показано перспективи використання відеопроцесора для автоматизації технології рентгенівського контролю якості виробів, а також для обробки рентгенотелевізійного зображення.

Приведено результати вимог та характеристик спеціалізованого відеопроцесора.

Розроблена конструкція пристрою, структурна, функціональна, електрична принципова схеми, а також розведена друкована плата відеопроцесора для обробки рентгенотелевізійного зображення.

## А Н О Т А Ц І Я

У роботі проведений аналіз можливості автоматизації технології рентгнівського контролю якості, у вигляді відеопроцесора, який входить до складу рентгнотелевізійної системи.

В основі системи, яка дає можливість автоматизувати дану технологію, використовується мікроконтроллер STM32F405OG. Розглянуті і досліджені основні джерела шуму рентгнотелевізійного зображення, які впливають на чутливість контролю якості.

Викладені вимоги, у створенні апаратних засобів фільтрації шумів рентгнотелевізійного зображення. Досліджена можливість створення пристрою для автоматичної фільтрації шумів на основі сучасної елементної бази. Приводиться опис роботи пристрою. Досліджується алгоритм автоматизації технології адаптації відеопроцесора до параметрів відеосигнала.

## S U M M A R Y

The work analyzes the possibility of automation of X-ray quality control technology, in the form of a video processor, which is part of the X-ray television system.

At the heart of the system, which makes it possible to automate this technology, the microcontroller STM-32F405OG is used. The main sources of noise of the X-ray television image that influence the sensitivity of quality control are considered and studied.

The requirements are set out in the creation of hardware for noise filtration of the X-ray television image. The possibility of creating a device for the automatic filtration of noise on the basis of a modern element base has been explored. The description of the device is given. The algorithm of automation of the technology of adaptation of the video processor to the video signal parameters is studied.

## **Перелік позначень, символів та скорочень**

НК – неруйнівний контроль

ПРЗ – підсилювач рентгенівського зображення

ЕОП – електронно-оптичний перетворювач

SMD – surface mount technology (технологія поверхневого монтажу)

ІМС – інтегральна мікросхема

BGA – Ball grid array (масив сітки з кульок)

CSP – Chip-scale package (розмір близький до розміру кристала)

QFP – Quad Flat Package (квадратне плоске упакування)

РТС – рентгенотелевізійна система

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

АСП – аналоговий сигнальний процесор

РЕОП – рентгенівський електронно-оптичний перетворювач

I2C – Inter-Integrated Circuit

SPI – Serial Peripheral Interface

E2PROM – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

## ЗМІСТ

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                                 | 12 |
| 1. РАДІАЦІЙНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ .....                                                          | 15 |
| 1.1. Фізичне явище рентгенівського випромінювання .....                                                     | 16 |
| 1.2. Рентгенографія з використанням рентгенівської плівки .....                                             | 17 |
| 1.2.1. Суть методу рентгенографії з використанням рентгенівської плівки ...                                 | 17 |
| 1.2.2. Технологія проведення рентгенографії з використанням рентгенівської плівки .....                     | 18 |
| 1.2.3. Фотографічні характеристики рентгенівських плівок .....                                              | 25 |
| 1.2.3.1. Будова промислової рентгенівської плівки .....                                                     | 25 |
| 1.2.3.2. Фотографічна щільність рентгенівської плівки .....                                                 | 25 |
| 1.2.3.3. Характеристична крива рентгенівської плівки .....                                                  | 26 |
| 1.2.3.4. Світлочутливість рентгенівської плівки .....                                                       | 27 |
| 1.2.3.5. Середній градієнт рентгенівських плівок .....                                                      | 29 |
| 1.2.3.6. Вуаль рентгенівської плівки .....                                                                  | 30 |
| 1.2.3.7. Різкість або чіткість зображення .....                                                             | 30 |
| 1.2.3.8. Зернистість рентгенівської плівки .....                                                            | 31 |
| 1.2.4. Обладнання для проведення рентгенографії з використанням рентгенівської плівки .....                 | 32 |
| 1.2.5. Недоліки та переваги рентгенографії з використанням рентгенівської плівки .....                      | 36 |
| 1.3. Рентгенографія з використанням багаторазових детекторів рентгенівського тіньового випромінювання ..... | 36 |
| 1.3.1. Суть методу комп'ютерної рентгенографії .....                                                        | 37 |
| 1.3.2. Фосфорні пластини багаторазового використання .....                                                  | 38 |
| 1.3.3. Динамічний діапазон фосфорних пластин .....                                                          | 39 |
| 1.3.4. Технологія отримання рентгенограми з використанням фосфорних пластин .....                           | 39 |
| 1.3.5. Сканери для багаторазових детекторів рентгенівського випромінювання .....                            | 40 |



|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.6. Недоліки та переваги рентгенографії з використанням багаторазових детекторів рентгенівського випромінювання ..... | 41 |
| 1.4. Рентгеноскопія в сфері неруйнівного контролю якості виробів.....                                                    | 42 |
| 1.4.1. Суть методу рентгеноскопії .....                                                                                  | 42 |
| 1.4.2. Технологія проведення .....                                                                                       | 43 |
| 1.4.3. Обладнання для проведення рентгеноскопії.....                                                                     | 45 |
| 1.4.4. Недоліки та переваги рентгеноскопії.....                                                                          | 46 |
| 1.5. Рентгенотелевізійні системи та чутливість неруйнівного контролю якості виробів.....                                 | 46 |
| 1.5.1. Шуми рентгенівського випромінювання.....                                                                          | 47 |
| 1.5.2. Шуми відікона .....                                                                                               | 48 |
| 1.5.3. Шуми попереднього підсилювача.....                                                                                | 50 |
| 1.5.4. Шуми аналого-цифрового перетворення.....                                                                          | 51 |
| 1.6. Усунення флуктуаційних шумів методом накопичення сигналу .....                                                      | 53 |
| 1.6.1. Накопичення періодичних аналогових сигналів .....                                                                 | 53 |
| 1.6.2. Оцінка можливого виграшу у відношенні сигнал / шум при дискретному записі сигналу.....                            | 56 |
| 1.7 Комплекс цифрової радіографії "Гرادієнт".....                                                                        | 58 |
| 1.8. Можливість реалізації статистичної обробки тіньового рентгенотелевізійного зображення.....                          | 60 |
| Висновки .....                                                                                                           | 63 |
| 2. АЛГОРИТМИ РОБОТИ ЦИФРОВОГО ВІДЕОПРОЦЕСОРА ДЛЯ ОБРОБКИ РЕНТГЕННОТЕЛЕВІЗІЙНОГО ЗОБРАЖЕННЯ.....                          | 64 |
| 2.1. Призначення і застосування пристрою .....                                                                           | 64 |
| 2.2. Вимоги, що пред'являються до пристрою .....                                                                         | 64 |
| 2.2.1. Задачі які реалізує спеціалізований відео процесор в складі рентгеноскопічного контролю якості виробів .....      | 64 |
| 2.2.2. Параметри вхідного і вихідного сигналу.....                                                                       | 65 |
| 2.3 Функціонування блоку управління відеопроектором.....                                                                 | 65 |
| 2.3.1. Загальний алгоритм роботи.....                                                                                    | 65 |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3.2. Алгоритм режиму налаштування .....                                                                       | 67  |
| 2.3.3. Алгоритм роботи в режимі прямого каналу.....                                                             | 68  |
| 2.3.4. Алгоритм роботи в режимі накопичення.....                                                                | 70  |
| 2.4. Вибір мікроконтроллера.....                                                                                | 71  |
| 2.4.1. Порівняння мікроконтролерів конкуруючих фірм.....                                                        | 72  |
| 2.4.2. Характеристики мікроконтроллера STM32F405OG.....                                                         | 76  |
| 2.4.3. Інструментальні засоби розробки і відладки програмного<br>забезпечення .....                             | 77  |
| Висновки .....                                                                                                  | 79  |
| 3. СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ ВІДЕОПРОЦЕСОР ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ<br>РАДІАЦІЙНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ.....                              | 80  |
| 3.1. Структурна схема відеопроцесора .....                                                                      | 80  |
| 3.2. Блок управління та індикації .....                                                                         | 82  |
| 3.3. Розробка схеми електричної принципової відеопроцесора для обробки<br>рентгенотелевізійного зображення..... | 84  |
| 3.4. Зв'язок мікроконтроллера з елементами відеопроцесора.....                                                  | 86  |
| 3.4.1. Клавіатура і дисплей .....                                                                               | 86  |
| 3.4.2. Зовнішня пам'ять .....                                                                                   | 92  |
| 3.4.3. АСП і ЦСП.....                                                                                           | 95  |
| 3.5. Розробка друкованої плати відеопроцесора для обробки<br>рентгенотелевізійного зображення.....              | 97  |
| Висновки .....                                                                                                  | 99  |
| 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ВІДЕОПРОЦЕСОРУ ДЛЯ ОБРОБКИ РЕНТГЕНІВСЬКОГО<br>ЗОБРАЖЕННЯ .....                                    | 100 |
| 4.1. Технічні характеристики відеопроцесора.....                                                                | 100 |
| 4.2. Функціональні можливості .....                                                                             | 101 |
| 4.3. Інструкція по використанню в реальних умовах .....                                                         | 103 |
| 4.3.1. Органи управління .....                                                                                  | 103 |
| 4.3.2. Вхідні та вихідні роз'єми .....                                                                          | 103 |
| 4.3.3. Ввімкнення пристрою.....                                                                                 | 105 |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 4.3.4Режими роботи відеопроцесора .....        | 105 |
| 4.3.4.1. Робочий режим .....                   | 105 |
| 4.3.4.2. Збереження зображень на SD-card ..... | 107 |
| 4.3.4.3. Режим налаштування .....              | 108 |
| 4.4. Стартап проект .....                      | 109 |
| 4.5. Розрахунок надійності схеми .....         | 117 |
| Висновки .....                                 | 121 |
| ВИСНОВКИ.....                                  | 123 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ..... | 124 |
| Додаток 1.....                                 | 127 |
| Додаток 2.....                                 | 130 |

## ВСТУП

Забезпечення високої якості продукції - одна з найбільш важливих науково-технічних і виробничих проблем, значення якої зростає в міру ускладнення конструкцій виробів. Однією з головних причин, що знижують якість продукції, є приховані дефекти, тобто дефекти, не виявлені при встановлених на даному підприємстві контрольних перевірок. Велика частина відмов виробів в початковий період їх експлуатації пов'язана з проявом прихованих дефектів виробництва. Цими ж дефектами викликані багато відмов і на пізніших етапах використання продукції. Тому в проблемі підвищення якості і надійності важлива роль належить неруйнівному контролю — дефектоскопії, тобто науці про принципи, методи і засоби виявлення і вимірювання дефектів. При цьому під дефектом розуміються будь-які відхилення від заданих фізичних або інших властивостей виробу в цілому або яких-небудь його частин. Ця проблема є багатогранною і вирішується в декількох напрямках. Серед них відповідальна роль належить розробці і впровадженню у виробництво методів і засобів неруйнівного контролю, ефективність яких визначається, перш за все, їх достовірністю і продуктивністю.

Основними типами дефектів, які виявляються за допомогою неруйнівних методів контролю, є порушення цілісності матеріалу виробу. Під типом дефекту розуміють природу дефекту, наприклад, тріщина, непровари зварного шва, розшарування і так далі. Кількість дефектів у виробі характеризує його дефектність [2].

Методи неруйнівного контролю розділяють на групи, об'єднані спільністю фізичних ознак. Існує дев'ять різних видів НК (неруйнівний контроль): магнітний, електричний, вихрострумовий, радіохвильовий, тепловий, оптичний, радіаційний, акустичний і проникаючими речовинами [3].

Найпоширенішим видом радіаційного неруйнівного контролю є рентгенівська дефектоскопія. Рентгенівська дефектоскопія заснована на проникаючій здатності рентгенівського випромінювання і особливостях його поглинання в матеріалах. Проникаюча здатність визначається енергією рентге-

нівських фотонів, яка залежить від прискорюючої напруги в рентгенівській трубці. Тому товсті зразки та зразки з важких металів, таких, наприклад, як золото та уран, вимагають для їх дослідження рентгенівського джерела з більш високою напругою, а для тонких зразків досить джерела і з більш низькою напругою. Реєстрація тіньового рентгенівського випромінювання здійснюється візуально, за допомогою фотографічних методів або за допомогою електронно-оптичних перетворювачів, частіше всього що входять до складу рентгенотелевізійної установки [4].

Для рентгенівських систем контролю якості характерний високий рівень шуму, обумовлений флуктуаціями рентгенівських квантів. Шуми рентгенівських квантів мають високий рівень, він може перевищувати у декілька разів рівень корисного сигналу, що сильно відображається на відношенні сигналу до шуму. Крім того, датчик телевізійного сигналу також вносить в рентгенотелевізійне зображення свою шумову складову. Тому на екрані телевізійного монітора можна спостерігати зображення контрольованого об'єкту на тлі явно виражених флуктуаційних шумів, що істотно знижує якість і інформативність зображення. Шумова складова рентгенотелевізійного зображення сильно стомлює зір оператора, і відволікає від основного досліджуваного об'єкту, що також знижує ефективність аналізу рентгенотелевізійного зображення і продуктивність рентгеноскопічного контролю.

Для підвищення якості і інформативності рентгенотелевізійних зображень є розробка методів і засобів фільтрації шумів рентгенотелевізійного каналу. Шуми рентгенівських квантів мають флуктуаційний характер, і це дозволяє ефективно боротися з ними шляхом накопичення тіньового рентгенівського зображення протягом заданого часу експозиції. флуктуаційні рентгенівські шуми інтегруються в часі, а корисний сигнал накопичується пропорційно тривалості експозиції. Саме це дозволяє одержати якісні рентгенограми на рентгенівській плівці. Цей же метод накопичення тіньового рентгенівського зображення може бути реалізований в рентгенотелевізійних дефектоскопічних системах, в яких датчик телевізійного сигналу працює в режимі регу-

льованої експозиції [5]. Накопичення тіньового рентгенівського зображення на фоточутливому сенсорі зображення здійснюється також як і на рентгенівській плівці в аналоговому вигляді. Накопичений сигнал зчитується за один кадр, запам'ятовується в оперативній пам'яті, і виводиться на екран телевізійного монітора [6]. При цьому усереднюються шуми квантів рентгенівського випромінювання, підвищується якість зображення на екрані телевізійного монітора і досягається значне підвищення чутливості дефектоскопічного контролю виробів.

Проблема реалізації методу апаратної фільтрації рентгенівських шумів за допомогою регульованої експозиції і впровадження його в промислову дефектоскопію на сьогодні є актуальною, оскільки дозволить значно поліпшити якість дефектоскопічного контролю.

В залежності від типу і товщини матеріалу, просторової схеми просвічування досліджуваного об'єкта і напруги на рентгенівській трубці час експозиції досліджуваних об'єктів завжди різний, амплітуда сигналу на виході також різна, тому автоматизація підбору часу експозиції, вибору прискорюючої напруги на рентгенівській трубці є доцільною.

Метою даної роботи є дослідження можливості реалізації методу автоматизації технології рентгенівського контролю якості, шляхом автоматичного визначення потрібного рівня почорніння рентгенограми, визначення потрібного часу експозиції, а також автоматичного підбору коефіцієнта підсилення для максимального використання динамічного діапазону АЦП. Апаратна реалізація виконана у вигляді відеопроцесора в основі якого використана сучасна елементна база. Головною задачею пристрою є апаратна фільтрація рентгенівських шумів за допомогою регульованої експозиції.

## 1. РАДІАЦІЙНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ

При використанні не руйнівних методів контролю встановлюються норми бракування, в іншому випадку вироби можуть незаслужено вибракуватися, або навпаки, проникати в експлуатацію з дефектами. Це є дуже важливим, оскільки брак в деталях може зіпсувати роботу механізму, або системи механізмів. Застосовувати методи неруйнівного контролю необхідно з урахуванням їх можливості, чутливості, продуктивності, ефективності.

За час свого розвитку неруйнівний контроль з простого контролю деталей і вузлів поступово перетворився на тісно пов'язану з процесом виробництва науку про організації контролю всього процесу виробництва і його окремих етапів. Тому вдосконалення традиційних і розробка нових методів і засобів контролю якості матеріалів і виробів з використанням сучасних досягнень науки і техніки вельми актуально.

Неруйнівний контроль заснований на отриманні інформації про якість матеріалів, що перевіряються, і виробів при взаємодії їх з речовинами або фізичними полями у вигляді електричних світлових, звукових або інших сигналів.

Найбільш поширеним видом радіаційного неруйнівного контролю є рентгенівська дефектоскопія. Вона заснована на поглинанні рентгенівських променів, яке залежить від щільності середовища і атомного номера елементів, що створюють матеріал середовища. Наявність таких дефектів, як тріщини, раковини або включення чужорідного матеріалу, призводить до того, що промені, що проходять через матеріал, ослабляються в різному ступені. Реєструючи розподіл інтенсивності променів, що проходять, можна визначити наявність і розташування різних неоднорідностей матеріалу. Реєстрація тіньового рентгенівського випромінювання здійснюється візуально, за допомогою фотографічних методів або за допомогою електронно-оптичних перетворювачів, частіше всього що входять до складу рентгенотелевізійної установки [1].

Для радіаційних систем контролю виробів характерний високий рівень шуму, обумовлений флуктуаціями рентгенівських квантів на вході детектора рентгенівського випромінювання. Шуми рентгенівських квантів мають достатньо високий рівень, який може перевищувати у декілька разів рівень корисного сигналу. Крім того, датчик телевізійного сигналу також вносить в рентгенотелевізійне зображення свою шумову складову. Тому на екрані телевізійного монітора тіньове рентгенівське зображення контрольованого об'єкту відтворюється на тлі явних виражених флуктуаційних шумів рентгенотелевізійного каналу, що істотно знижує якість і інформативність тіньового рентгенотелевізійного зображення. Шумова складова рентгенотелевізійного зображення сильно стомлює зір оператора, що також знижує ефективність аналізу рентгенотелевізійного зображення і продуктивність рентгеноскопичного контролю.

### 1.1. Фізичне явище рентгенівського випромінювання

Джерелами рентгенівського випромінювання є рентгенівські трубки, які в простіших випадках являють собою двоелектродні вакуумні прилади різних конструкцій і розмірів.

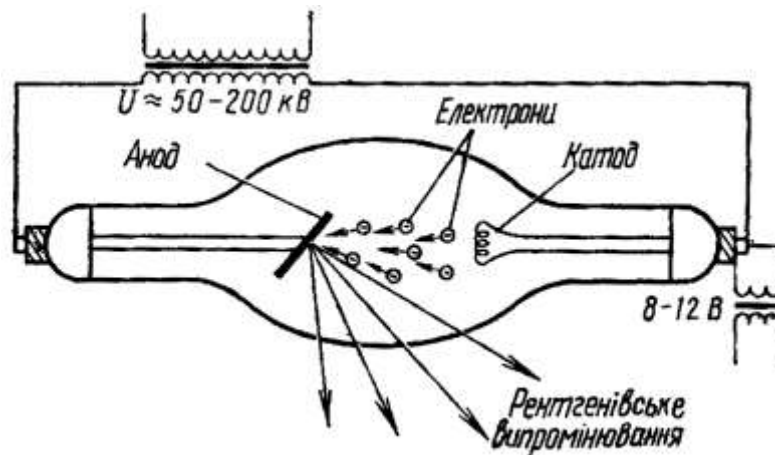


Рис 1.1. Схематичного зображення рентгенівської трубки

На рис. 1.1 наведена схема рентгенівської трубки. У скляну трубку введено електроди: К (катод) і А (анод). Катод розжарення є джерелом електронів. Між катодом і анодом підтримується різниця потенціалів  $U$  в десятки



і сотні кіловольтів. Електрони, які набули високих енергій у прискорювальному електричному полі, бомбардують анод А, площа якого утворює з напрямом руху електронів кут  $45^\circ$ . Внаслідок цього рентгенівське випромінювання, що виникає при гальмуванні електронів анодом, виходить із трубки через отвір захисного свинцевого екрану. Оскільки напруга на трубці досить висока, то вона завжди працює в режимі струму насичення. Щоб змінити інтенсивність рентгенівського випромінювання, змінюють струм розжарення катода. Коефіцієнт корисної дії рентгенівських трубок близько 1 % , тобто 99 % кінетичної енергії електронів перетворюється в тепло. За принципом одержання електронних пучків рентгенівські трубки поділяють на три типи: іонні, електронні та індукційні. Джерелами рентгенівського випромінювання можуть бути природні та штучні радіоактивні елементи [7].

## **1.2. Рентгенографія з використанням рентгенівської плівки**

Рентгенографічний метод контролю є надійним і широко поширеним методом контролю, заснованим на здатності рентгенівського випромінювання проникати через метал. Виявлення дефектів при радіаційних методах засновано на різному поглинанні рентгенівського випромінювання ділянками металу з дефектами і без них. Основною відмінністю від інших методів неруйнівного контролю якості є те, що результат виконується на плівці.

### **1.2.1. Суть методу рентгенографії з використанням рентгенівської плівки**

Зварні з'єднання просвічують спеціальними рентгенівськими апаратами. З одного боку шва на деякій відстані від нього поміщають джерело випромінювання, з протилежного боку щільно притискають касету з чутливою фотоплівкою. При просвічуванні промені проходять через зварене з'єднання і опромінюють плівку. У місцях, де є пори, шлакові включення, непровари, великі тріщини, на плівці, утворюються темні плями. Вид і розміри дефектів визначають порівнянням дефектів з дефектами на еталоні.

При просвічуванні зварних з'єднань гамма-випромінюванням джерелом випромінювання служать радіоактивні ізотопи: селен-75, кобальт-60, тулій-170, іридій-192 і ін. Ампула з радіоактивним ізотопом поміщається в свинцевий контейнер.

Технологія виконання просвічування подібна рентгенівському просвічуванню. Гамма-випромінювання відрізняється від рентгенівського більшою жорсткістю і меншою довжиною хвилі, тому воно може проникати в метал на велику глибину. Воно дозволяє просвічувати метал товщиною до 300 мм.

Недоліками просвічування гамма-випромінюванням в порівнянні з рентгенівським є менша чутливість при просвічуванні тонкого металу (менше 50 мм), неможливість регулювання інтенсивності випромінювання, велика небезпека гамма-випромінювання при необережному поводженні з гамма-дефектоскопами.

### **1.2.2. Технологія проведення рентгенографії з використанням рентгенівської плівки**

Зважаючи на складність процесів ослаблення енергії рентгенівського і  $\gamma$ -випромінювань при проходженні через контрольований метал і різноманітня перерахованих факторів врахувати одночасний вплив їх на чутливість методу є неможливим. Доцільно розглянути ці фактори окремо, оцінюючи вплив кожного з них на чутливість методу до виявлення дефектів.

**Вплив енергії** рентгенівського випромінювання і  $\gamma$ -випромінювання на чутливість контролю показано на рис. 1.2. Як видно з графіків, чутливість контролю сталі однакової товщини тим вище, чим менша енергія випромінювання. Розсіяне випромінювання в залежності від енергії первинного випромінювання змінює якість знімка, знижує чіткість і контрастність зображення, як результат, і чутливість самого методу. При відсутності розсіювання дефект на плівці буде зображуватися з чіткими межами (рис. 1.3). Однак практично завжди має місце розсіювання випромінювання, яке порушує чіткість зображення. Внаслідок цього дефекти малого розміру стають тяжкопо-

мітними і часто можуть бути не виявлені. Розсіювання випромінювання завжди сильніше в товстостінних матеріалах (див. Рис. 1.3 б), ніж в тонкостінних, тому чутливість методу значно погіршується при збільшенні товщини просвічуваного матеріалу.

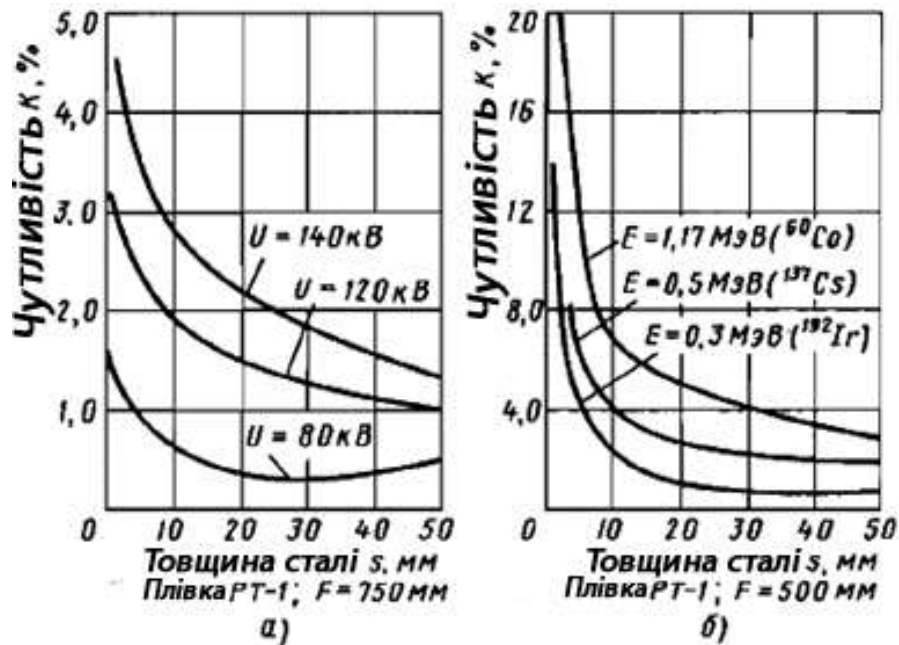


Рис. 1.2. Залежність чутливості радіографічного контролю від енергії випромінювання: а - рентгенівського апарату РУП-150-10; б - ізопопів;  
F - фокусна відстань.

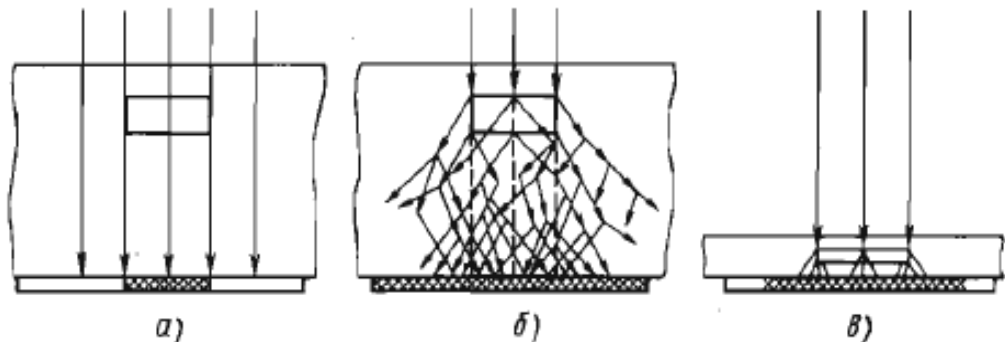


Рис.1.3. Вплив розсіяного випромінювання на контрастність зображення при просвічуванні: а - при паралельному нерозсіяному пучку випромінювання; б - погіршення контрастності від розсіяного випромінювання при просвічуванні виробів великої товщини; в - поліпшення контрастності при просвічуванні виробів малої товщини тим же пучком випромінювання.

Розсіювання випромінювання завжди сильніше в товстостінних матеріалах (див. Рис. 1.3 б), ніж в тонкостінних, тому чутливість методу значно погіршується при збільшенні товщини просвічуваного матеріалу.

Зовсім позбутися розсіювання випромінювання неможна. Зменшити його можна спеціальними фільтрами, що представляють собою тонкий шар свинцевої (від 0,075 до 0,15 мм) або олов'яної (0,025 мм) фольги, розташованої або між джерелом і контрольованим об'єктом, або між плівкою і об'єктом. Розсіювання випромінювання можливо зменшити також, зменшивши площу опромінення. Останнє досягається або за допомогою діафрагми, яка розташовується біля джерела випромінювання, або за рахунок свинцевої маски з отвором, що поміщається над просвічуванним об'єктом. Розсіювання зменшується, якщо збільшити відстань від контрольованого об'єкту до плівки.

**Товщина матеріалу.** Чутливість більш складним чином залежить від товщини контрольованого матеріалу (рис. 1.4). Спочатку чутливість зростає внаслідок того, що зі збільшенням товщини матеріалу зменшується ефективний коефіцієнт послаблення. М'які складові випромінювання послаблюються сильніше, чим жорсткі, і в наступні шари потрапляє випромінювання, вже частково відфільтроване в попередніх шарах. У міру проходження через речовину випромінювання стає все більш жорстким і при цьому одночасно заповільнюється спадання коефіцієнта ефективного послаблення: він наближається до постійного значення. Для порівняно великої товщини зростання кривої (погіршення чутливості) пояснюється ефектом розсіювання. В результаті погіршення чутливості через наявність розсіяного випромінювання визначає межу вживаності всього методу просвічування матеріалів до певної товщини (100 ... 150 мм).

**Форма дефектів і їх орієнтація в звареному шві.** Дефекти (непровари) з прямолінійними гранями, орієнтовані паралельно напрямку розповсюдженого випромінювання, виявляються значно краще через велику різкості зображення їх меж (рис. 1.5, а), ніж дефекти циліндричної форми (шлакові включення), або кульової (пори), або іншої форми (див. рис. 1.5, б, в).

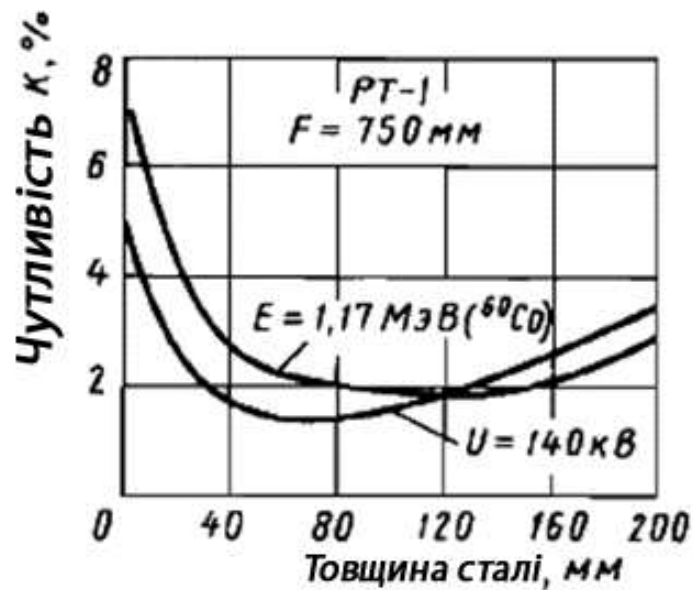


Рис. 1.4. Залежність чутливості радіографічного контролю від товщини контрольованого матеріалу.

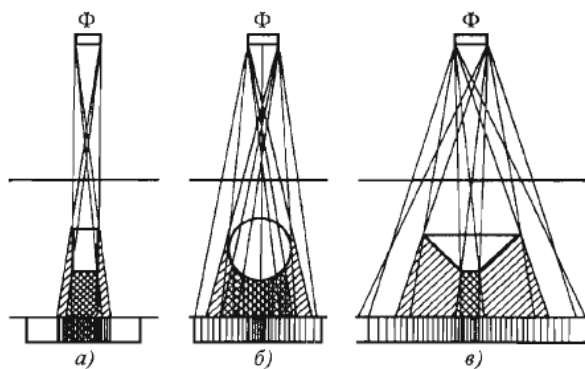


Рис. 1.5. Вплив форми  $\Phi$  дефекту на контрастність його зображення:  
а - прямокутної; б - кульової; в - трапецеїдальної.

Дійсно, непровар, як правило, має постійну висоту  $\Delta s$  по перетину падаючого пучка випромінювання, тоді як у об'ємних дефектів вона змінна,

тому щільність потемніння зображення в цьому випадку буде поступово і рівномірно знижуватися від максимуму, визначуваного діаметром дефекту до щільності потемніння всього поля плівки. Внаслідок цього різкість зображення відсутня, а отже, і контрастність знімка, сприймаюча оком, значно погіршується.

Найкраще проявлення спостерігається при проходженні випромінювання уздовж дефектів, тобто коли кут  $\alpha$  (рис. 1.6) дорівнює  $0^\circ$ .

При орієнтації дефекту під деяким кутом до напрямлення випромінювання проявлення погіршується; в цьому випадку пучок випромінювання буде проходити не всю висоту  $\Delta s$ , а тільки певну її частину. Чутливість просвічування при цьому буде визначатися шириною розкриття дефекту  $\Delta$ . На практиці дуже часто зустрічаються дефекти, у яких ширина розкриття  $\Delta$  незначна при чималій висоті  $\Delta s$ . В цьому випадку на плівці проєкції зображення дефекту не буде видно через малу різницю в щільностях потемніння плівки в бездефектному і дефектному місці.

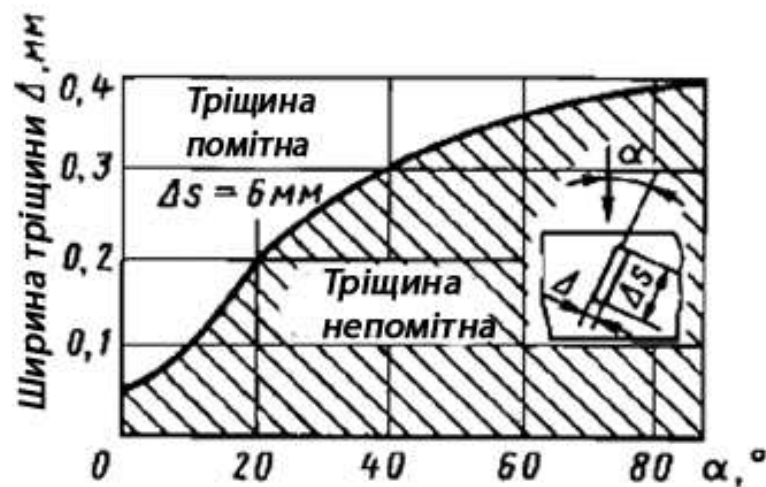


Рис. 1.6. Виявлення тріщини в залежності від орієнтації її до напрямку випромінювання

При орієнтації дефекту під деяким кутом до напрямлення випромінювання проявлення погіршується; в цьому випадку пучок випромінювання буде проходити не всю висоту  $\Delta s$ , а тільки певну її частину. Чутливість просвічування при цьому буде визначатися шириною розкриття дефекту  $\Delta$ . На практиці дуже часто зустрічаються дефекти, у яких ширина розкриття  $\Delta$  незначна при чималій висоті  $\Delta s$ . В цьому випадку на плівці проєкції зображення дефекту не буде видно через малу різницю в щільностях потемніння плівки в бездефектному і дефектному місці.

До подібних дефектів відносять, наприклад, тріщини, стягнуті непровари, несплавлення по краях. Ймовірність виявлення подібних дефектів дуже мала (35 .. 40%). Розшарування в прокатаних листах, розташовані паралельно поверхні листів, як правило, просвічуванням не

виявляються. Через цю ж причину слабо виявляються несплавлення по катетам шва в таврових, напусткових і кутових з'єднаннях.

**Фокусна відстань.** Збільшення фокусної відстані (рис. 1.7) аналогічно енергії ослаблення випромінювання робить його більш м'яким, внаслідок чого поліпшується чутливість контролю.

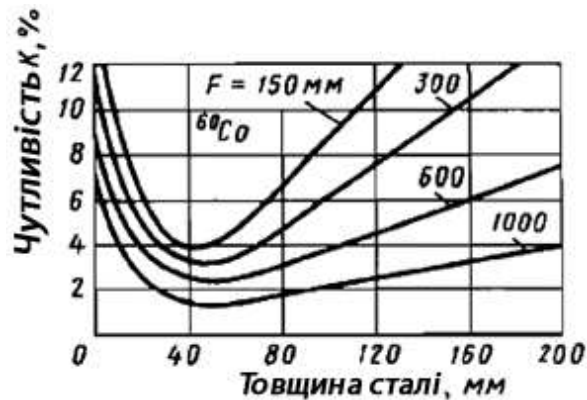


Рис. 1.7. Чутливість при просвічуванні сталі  $\gamma$ -випромінюванням на різних фокусних відстанях

Слід зауважити, що фокусна відстань  $F$  пов'язано з часом просвічування наступним співвідношенням:

$$\frac{t}{t_0} = 2 \frac{F}{F_0} \quad (1.1)$$

де  $t$  - час просвічування при обраній фокусній відстані, см;  $t_0$  час просвічування при фокусній відстані  $F_0$ , взятому по номограмі (див. рис. 1.7).

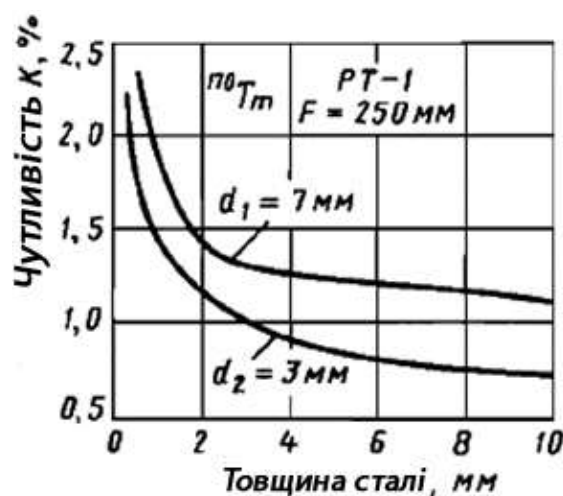


Рис. 1.8. Вплив розміру фокусу на чутливість контролю

З співвідношення видно, що при збільшенні фокусної відстані різко зростає час просвічування. Чим менше розмір фокуса, тим більш чіткій рел'єф зображення дефекту на знімку, тим менше область півтіні, тим вище чутливість контролю (рис. 1.8).

**Посилюючі екрани.** З рис. 1.9 видно, що застосування металевих екранів забезпечує певне підвищення чутливості, обумовлене зменшенням впливу вторинного випромінювання, джерелом якого є сам контрольований матеріал.

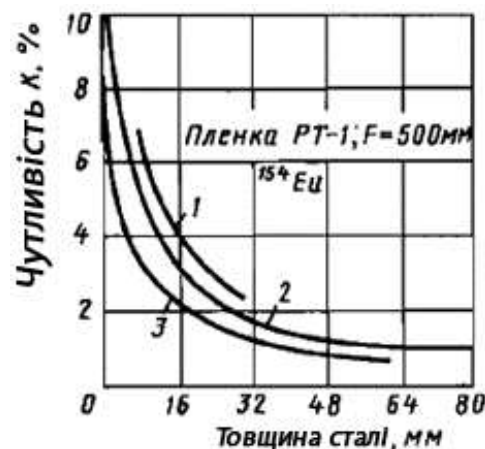


Рис. 1.9. Вплив підсилюючих екранів на чутливість радіографічного методу при просвічуванні сталі  $\gamma$ -випромінюванням  $^{154}\text{Eu}$ : 1 - флуороскопічні екрани; 2 - без екранів; 3 - металеві екрани (свинець 0,1 мм)

Розсіяне вторинне випромінювання зменшує різкість і контрастність зображення об'єкта. Розсіяне випромінювання від важких елементів, подібне свинцю, порівняльно невелике, вони виконують роль своєрідного фільтра, особливо для первинного випромінювання низьких енергій.

**Тип плівки.** В залежності від типу плівки, обумовленого розміром зерна і реакцією до випромінювання, чутливість радіографічного контролю при інших рівних умовах (енергія випромінювання, рід і товщина матеріалу) може змінюватися від 0,5 до 3% . Плівки, забезпечуючі кращу чутливість, мають дрібнозернисту структуру і слабку реакцію до випромінювання, але вимагають більшого часу для просвічування.



### **1.2.3. Фотографічні характеристики рентгенівських плівок**

Промислова рентгенівська плівка існує декількох типів - для задоволення самих різних вимог промислової радіографії і відрізняється чутливістю, контрастністю, дрібним зерном і відмінною різкістю зображення. Вибравши плівку відповідно до призначення і характеру зразків, отримують рентгенівські знімки.

#### **1.2.3.1. Будова промислової рентгенівської плівки**

Рентгенівська плівка для промислової радіографії складається з емульсії і поліефірної пластикової основи з блакитним відтінком, товщиною 175 мкм. Емульсія нанесена на обидві сторони основи і з обох сторін покрита зовнішніми захисними шарами. Емульсія складається з галогенідів срібла в якості фоточутливого матеріалу, присадок і желатину. Галогеніди срібла утворюють зображення під впливом рентгенівських або, гамма-променів. В звичайній фотоплівці світлочутлива емульсія нанесена тільки з одного боку основи, а на плівках для промислової радіографії вона покриває обидві сторони. Поглинання сильно проникаючого рентгенівського випромінювання або гамма-променів за рахунок нанесення подвійного шару емульсії збільшується, тим самим світлочутливе з'єднання срібла більш ефективно поглинає випромінювання і електрони. Крім того, два шари емульсії допомагають збільшити контрастність і щільність зображення на рентгенівських знімках.

#### **1.2.3.2. Фотографічна щільність рентгенівської плівки**

Ступінь затемнення фотографічного зображення називається фотографічною або оптичною щільністю, і вона буває двох типів. Перший тип - це оптична щільність в світлі, другий – у відбитому світлі. Перший тип щільності використовується як вираз щільності фотографічного зображення на плівці. Щільність зображення в світлі виражається як логарифм її щільності затемнення.

Припустимо, інтенсивність світла, що падає на поверхність плівки, дорівнює  $I_0$  (проходить світло), а інтенсивність світла після того, як він пройшов через плівку, дорівнює  $I$ , тоді застосовуються наступні формули:

$$\text{Прозорість: } \frac{I}{I_0}; \quad (1.2)$$

$$\text{Щільність затемнення: } \frac{I_0}{I}; \quad (1.3)$$

$$\text{Щільність: } \log \frac{I_0}{I}; \quad (1.4)$$

### 1.2.3.3. Характеристична крива рентгенівської плівки

Властивості рентгенівської плівки можна висловити декількома способами. найбільш поширеним з них є характеристична крива. під характеристичною кривою рентгенівської плівки розуміють криву, що отримується в результаті побудови графіка залежності щільності зображення від експозиції (тривалості впливу рентгенівських або гамма-променів) при прояві плівки, як показано на Рис.1.10. Ця характеристична крива дає інформацію про світлочутливість рентгенівської плівки, її контрастність (середнє значення градієнта) і вуаль. Так як абсолютну силу рентгенівських або гамма-променів виміряти важко, визначають відносну експозицію, а її логарифм відкладають по горизонтальній осі, в той час як відповідне значення щільності наносяться уздовж вертикальної осі через ті ж інтервали, що і на горизонтальній осі. Форма характеристичної кривої та її положення на графіку розрізняються залежно від типу плівки або джерела випромінювання. Крім того, при зміні умов проявлення і при використанні екранів спостерігаються зміни в характері кривих.

Традиційно характеристична крива ділиться на п'ять ділянок, як показано на Рис.1.10.

На неекспонованій ділянці плівки при проявленні з'являється ледь помітне потемніння (щільність), і це явище називається «вуаль».

Щільність в межах ділянки недовитримки, як правило, розвивається при недостатній експозиції плівки.

Правильно експонована плівка зазвичай має щільність зображення, що відповідає інтервалу, заданому прямолінійною ділянкою кривої і ділянкою недовитримки. З прямолінійною ділянкою тісно пов'язано поняття «контрастності» плівки.

Щільність зображення на занадто сильно експонованій плівці відповідає інтервалу, який задається прямолінійною ділянкою та ділянкою перевитримки.

При подальшому збільшенні експозиції (виході за межі ділянки перевитримки) щільність зображення може навіть зменшитися. Ця ділянка не враховується в експозиціях, які використовуються при створенні фотографічного зображення.

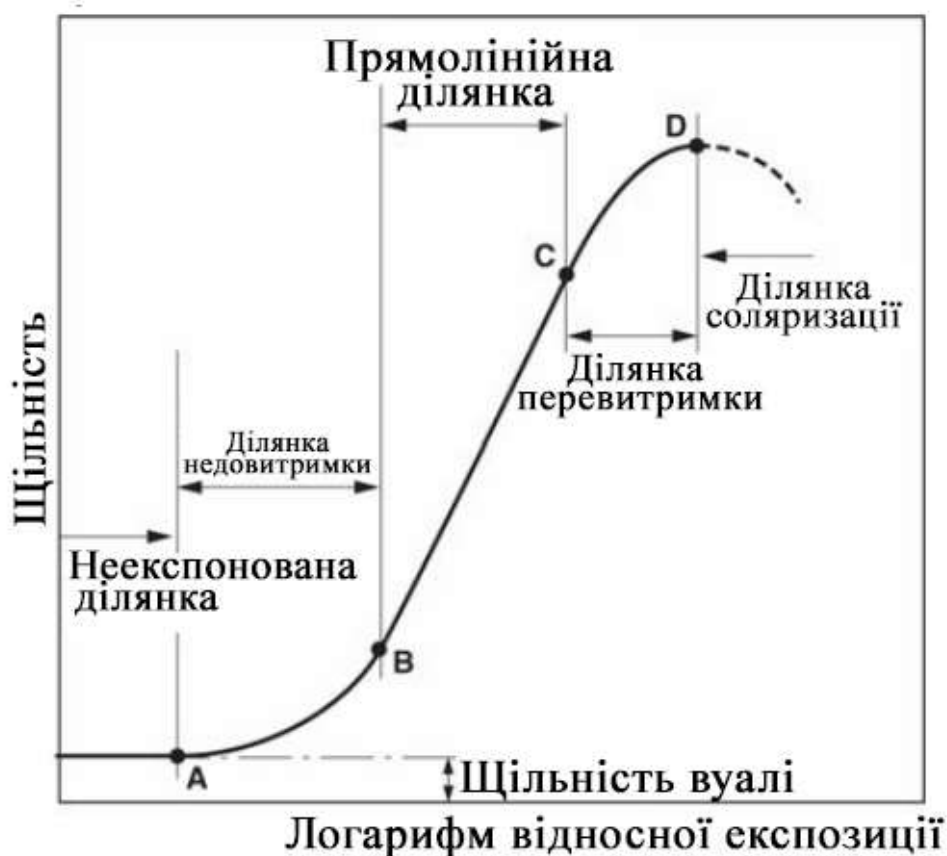


Рис.1.10. Характеристична крива рентгенівської плівки

#### 1.2.3.4. Світлочутливість рентгенівської плівки

Під світлочутливістю в радіографії розуміють чутливість рентгенівської плівки до гамма або рентгенівського випромінювання.

Світлочутливість фотоматеріалу зазвичай виражається величиною зворотної експозиції.

На Рис.1.11 показані характеристичні криві плівок чотирьох типів - А, В, С і D – які були під дією рентгенівських променів і проявлених в одних і тих же умовах.

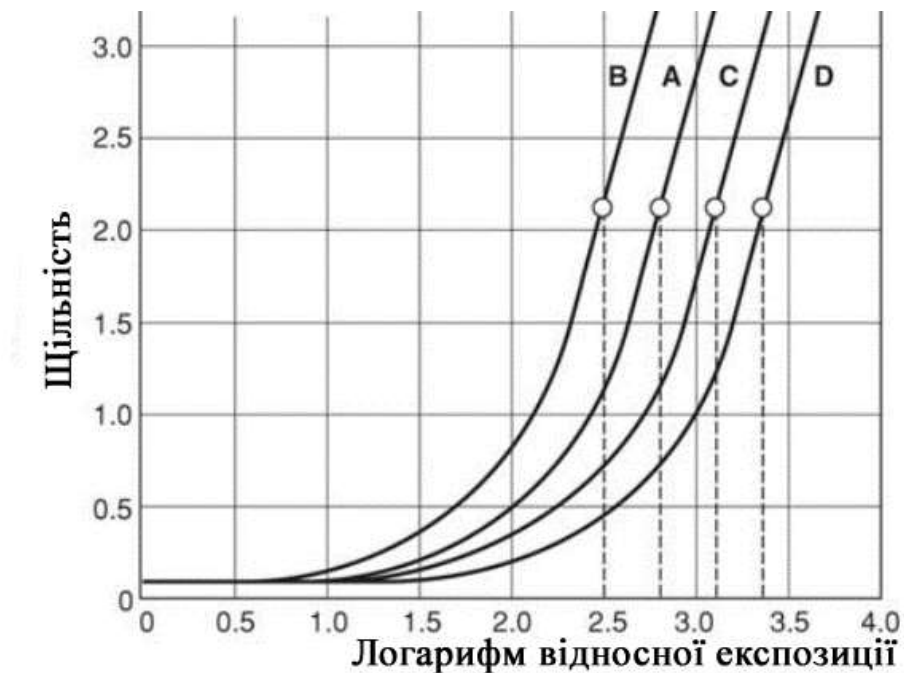


Рис.1.11. Характеристичні криві рентгенівської плівки чотирьох типів

З точки на характеричній кривій з щільністю, рівною 2,0 над величиною базової концентрації + вуалі, можна провести пряму лінію вниз до перетину з горизонтальною лінією. Визначивши відносні експозиції для чотирьох типів плівки, можна обчислити антилогарифми відповідних значень. Приймавши одну з плівок, наприклад, А, за основу при порівнянні з чутливістю, що дорівнює 100, можна отримати величини відносної світлочутливості для інших плівок з використанням параметра порівняння 100 і зворотніх відношень антилогарифмів величин, взятих з горизонтальної осі. Визначені таким чином відносні величини світлочутливості трьох типів плівок показані в Таблиці 1.1.

| Тип плівки                | A   | B   | C  | D  |
|---------------------------|-----|-----|----|----|
| Відносна світлочутливість | 100 | 209 | 48 | 26 |

Табл.1.1. Відносна світлочутливість рентгенівських плівок

### 1.2.3.5. Середній градієнт рентгенівських плівок

Контрастність промислових рентгенівських плівок виражається через середнє значення градієнта  $G$ . Певний інтервал всіх щільностей, які формують зображення, значно впливає на його контрастність. Тангенс кута нахилу прямої, яка з'єднує точки максимальної та мінімальної щільності, в цьому інтервалі на характеристичній кривій називається середнім значенням градієнта. Межа робочих щільностей ( $\Delta D$ ) для промислових рентгенівських плівок розраховується як:

$$\Delta D = (\text{вуаль} + \text{базова щільність} + 3,5) - (\text{вуаль} + \text{базова щільність} + 1,5) \quad (1.4)$$

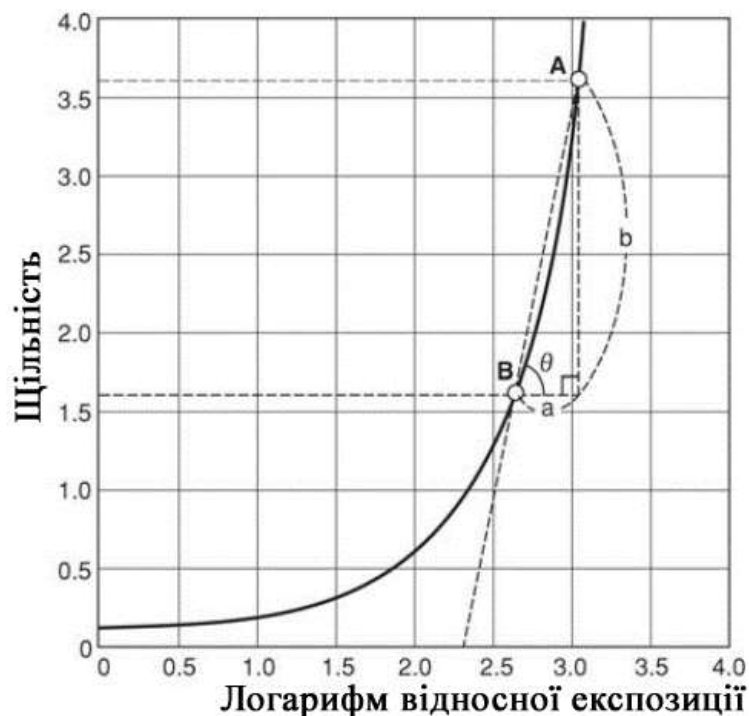


Рис.1.12. Визначення середнього градієнта з характеристичної кривої рентгенівської плівки

Точка A = вуаль + базова щільність + 3,5

Точка B = вуаль + базова щільність + 1,5

$\Delta D = b$

Тангенс кута нахилу ( $\tan \theta = b / a$ ) прямої лінії, яка об'єднує точки A і B, відносно горизонтальної осі, називається середнім градієнтом.

### 1.2.3.6. Вуаль рентгенівської плівки

На плівці може розвинутися незначне потемніння без впливу видимого світла, рентгенівського або гамма-випромінювання. Це потемніння виникає, коли галогеніди срібла в емульсії на плівці частково відновлюються, і називається «вуаллю».

Оскільки виникнення вуалі, темнішої, ніж деяке гранично допустиме значення, негативно позначається на якості знімків, її розвитку слід перешкоджати якомога сильніше.

Причин виникнення вуалі може бути кілька: грають роль і умови зберігання плівки, і склад проявника, і умови проявлення і обробка плівки.

Небажане потемніння під дією світла і тиску також називається вуаллю. Небажане затемнення плівки при занадто тривалій дії безпечного світла (навіть якщо в якості безпечного використовується світло тієї довжини хвилі, яка протягом розумного проміжку часу не надає впливу на чутливий матеріал) називається «вуаллю безпечного світла». Небажане затемнення, яке виникло внаслідок дії високого тиску на плівку, називається «вуаллю тиску».

Всі ці типи вуалі викликані впливом небажаних зовнішніх факторів, що негативно впливають на якість фотозображення і відповідно, потрібно запобігати можливості такого впливу.

### 1.2.3.7. Різкість або чіткість зображення

«Різкість» - це фотографічний термін, використовуваний для вказівки того, наскільки чітко визначаються межі між різними рівнями щільності,

а також для визначення чіткості дрібних деталей на зображенні. З недавнього часу для вираження різкості фотографічних зображень використовують просторово-частотні характеристики. В фотографії частотна характеристика являє собою графік залежності кількості чорних і білих ліній на мм (так звана «просторова частота» - за аналогією зі звуковою частотою) від співвідношення значень сигналів входу і виходу, в даному випадку,

відгуку відтвореного зображення по відношенню до видимого світла або радіоактивного випромінювання, що грає роль вхідної величини.

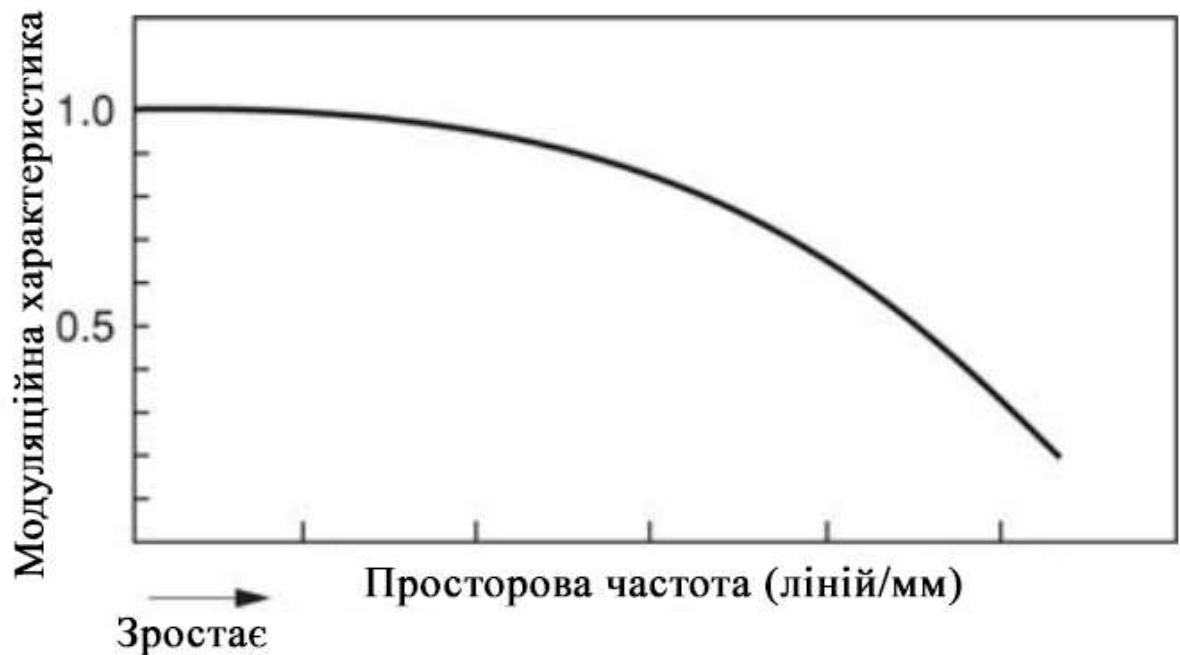


Рис.1.13. Фотографічна частотно-контрастна характеристика

#### 1.2.3.8. Зернистість рентгенівської плівки

Фотографічне зображення, отримане після проявлення, складається з частинок срібла розмірів в кілька мікронів, розташованих нерегулярно. Тому рентгенівські знімки зазвичай виглядають зернистими при розгляді неозброєним поглядом. Це називається зернистістю. «Зернистий» вид

знімку надають групи зерен срібла, а не окремі зерна. Зернистість знімка - суб'єктивне враження, а об'єктивний його аспект називається «Зернистістю фотоемulsії». Перше визначається суб'єктивно неозброєним оком при постійному освітленні або в порівнянні з фоном, що має постійну яскравість. Метод визначення підбирається в залежності від того, для чого призначається плівка, для рентгенівських плівок найбільше підходить освітлення постійним світлом. З іншого боку, зернистість фотоемulsії - фізичне явище і відноситься до структури світлочутливої емульсії, яка може бути об'єктивно визначена фізичними методами. Вимірювання зернистості фотоемulsії по відтворюваності і об'єктивності перевершує визначення

зернистого вигляду в якості наукової міри відхилень у розподілі відкладень срібла. Зернистість емульсії визначається методом Селвіна.

Зернистість фотоемульсії  $G$  за Селвіном виражається через як добуток квадратного кореня з величини площі вимірювальної щілини мікрофотометра  $a$  на величину стандартного відхилення  $\sigma D$  для середньої величини оптичної щільності  $D$ . зернистість за Селвіном:

$$G = \sigma D \sqrt{a}. \quad (1.5)$$

Однак якщо площа окремих зерен срібла перевищує площу вимірювальної щілини  $a$ , то дана формула не дає постійного значення  $G$ . В даний час зернистість фотоемульсії частіше висловлюють просто середньоквадратичним відхиленням величини  $D$ , а не через постійну Селвіна, і називають її середньоквадратичною зернистістю. Чим менше величина середньоквадратичної зернистості, тим краще зернистість. Наприклад, у плівки А на Рис. 1.14 зернистість краще, ніж у плівки В.

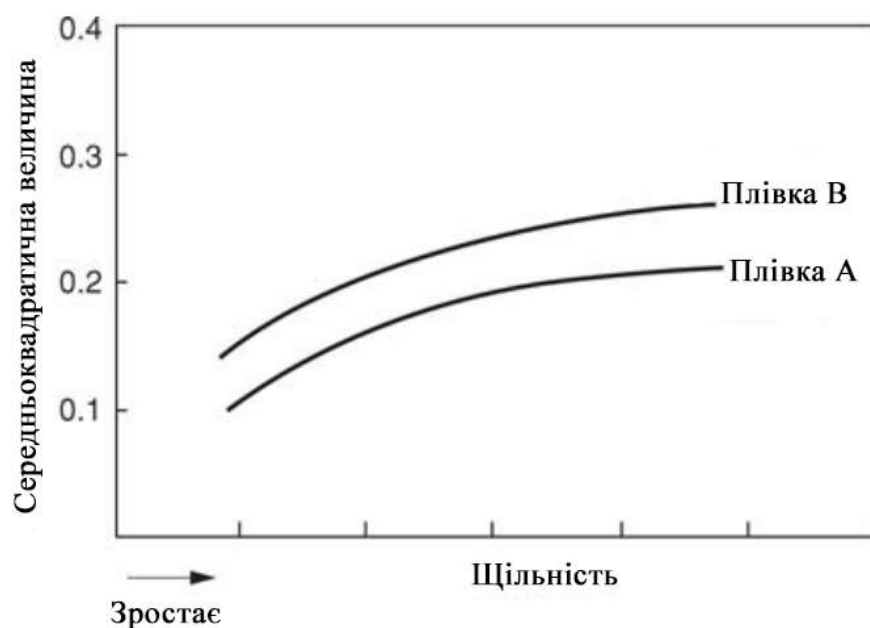


Рис.1.14. Зернистість фотоемульсії (середньоквадратична) рентгенівської плівки

#### 1.2.4. Обладнання для проведення рентгенографії з використанням рентгенівської плівки

Вітчизняна промисловість випускає джерела іонізуючого випромінювання для неруйнівного контролю розраховані на діапазон енергії



приблизно 10 кеВ-35 МеВ. Це рентгенівські апарати, гамма-дефектоскопи і спеціальні електрофізичні установки - прискорювачі електронів. Рентгенівські апарати застосовують в цехових і рідше в польових умовах, а також у випадках, коли до якості зварних з'єднань пред'являються високі вимоги. Гамма-дефектоскопи використовують при контролі зварних з'єднань великої товщини, а також стиків, розташованих у важкодоступних місцях, в польових умовах. Прискорювачі електронів ефективні при дефектоскопії з'єднань великої товщини, в основному в цехових умовах.

Рентгенівський апарат служить для отримання рентгенівського випромінювання з заданими параметрами і складається з рентгенівської трубки, генератора високої напруги і апаратури управління.

Рентгенівська трубка, яка є основним блоком рентгенівського апарату, являє собою вакуумний балон, що містить катод, пристрій для фокусування електронів і анод. Джерелом електронів в більшості рентгенівських апаратів служить нагрітий катод. Виняток становлять імпульсні рентгенівські трубки з холодним катодом, в яких використаний принцип автоелектронної емісії.

Емітовані катодом електрони прискорюються під впливом прикладеної різниці потенціалів і бомбардують анод. Гальмування електронів супроводжується іонізуючим випромінюванням. Більшість рентгенівських трубок мають масивні складові аноди різної конфігурації, основними елементами яких є мішені, що представляє собою пластину з вольфраму круглої або прямокутної форми товщиною 2-3 мм, і мідне тіло. В трубках для промислової дефектоскопії мішені виготовляють з вольфраму.

При гальмуванні електронів в матеріалі анода їх енергія перетворюється в електромагнітну, що випромінюється у вигляді фотонів. Відповідно до фізичного процесу, при якому відбувається перетворення енергії, це випромінювання називається гальмівним. Гальмівне випромінювання має безперервний спектр. Ділянка поверхні мішені, на якому відбувається гальмування електронів, називається дійсною фокусною плямою рентгенівської трубки. Розмір і форма рентгенівського плями є

найважливішими параметрами, визначальними можливість отримання якісного знімка на рентгенівській плівці.

Рентгенівські трубки можуть бути класифіковані за конструктивними особливостями анода: з винесеним анодом і з закритим анодом. Винесений анод виступає за межі рентгенівської трубки. Такі трубки призначені для введення випромінювання всередину контрольованих виробів, наприклад циліндричних судин. При використанні виносних анодів необхідно враховувати можливу намагніченість виробів. В цьому випадку магнітне поле впливає на потік електронів, що проходить в рентгенівській трубці і потрапляє на виносної анод, що викликає спотворення пучка рентгенівського випромінювання. При використанні трубок з виносними анодами необхідно вживати заходів по розмагнічування контрольованого об'єкта.

Рентгенівські трубки з винесеним порожнистим анодом відрізняються тим, що анод виконаний у вигляді мідної труби, яка виступає за її межі. Усередині труби біля її закритого кінця встановлена вольфрамова мішень, об яку гальмується сфокусований пучок електронів.

Залежно від призначення рентгенівської трубки мішень може бути розташована під кутом до потоку електронів. При цьому формується спрямований потік гальмівного випромінювання, призначений для прямого просвічування. Панорамний пучок формується при розташуванні мішені на товстій основі в площині, перпендикулярній до потоку електронів.

В рентгенівських трубках з закритим анодом на анод трубки надітий мідний чохол для обмеження розміру пучка вторинних електронів. При цьому рентгенівське випромінювання проходить через тонке берилієве вікно, вбудоване в чохол. Трубки такої конструкції призначені для стаціонарного обладнання.

Балон описаних вище рентгенівських трубок виконаний зі скла. Цей матеріал незначно послаблює рентгенівське випромінювання. Крім скла останнім часом застосовують кераміку, оскільки даний матеріал володіє високими механічними і діелектричними властивостями.

Залежно від анодної напруги рентгенівські апарати поділяються на два види: безперервної дії і імпульсні. В імпульсних апаратах під впливом імпульсу високої напруги утворюється потужний імпульс випромінювання. Ці апарати завдяки малим розмірам мають підвищену технологічну маневреність, що дозволяє використовувати їх в умовах монтажу.

За конструктивним виконанням рентгенівські апарати ділять на моноблочні і кабельні. У моноблочних апаратах рентгенівська трубка і високовольтний трансформатор поміщені в одному блоці. Апарати такого типу призначені переважно для роботи в польових умовах. Існують також стаціонарні моноблочні апарати.

В апаратах кабельного типу рентгенівська трубка розміщена в захисному кожусі, а високовольтний трансформатор - в окремому блоці, від якого висока напруга передається до рентгенівської трубки.

В останні роки знайшли застосування вітчизняні малогабаритні і імпульсні рентгенівські апарати типу СВІТ, НОРА, ВІДЕОРЕН і ін. Середня потужність імпульсного апарату набагато менше потужності апарату безперервної дії, оскільки в проміжках між імпульсами випромінювання відсутнє. При зменшенні тривалості імпульсу для збереження потужності необхідно збільшити струм або напругу. Збільшення струму краще, так як підвищення анодної напруги супроводжується зміною спектрального складу випромінювання і, отже, контрасту тіньової картини. Імпульсні рентгенівські трубки повинні генерувати імпульси можливо меншої тривалості, забезпечувати більшу енергію випромінювання в імпульсі, мати малий розмір ефективного фокуса для отримання різкої тіньової картини.

Найбільш повно цим вимогам відповідають трубки з автоемісійним катодом, механізм емісії якого полягає в наступному. Близько металевого електрода (катода) створюють сильне електричне поле. Завдяки цьому інжектуються електрони. Якщо напруженість поля становить  $10^9$  В / см, то щільність струму досягає десятків і сотень ампер на квадратний сантиметр. Для отримання високих значень напруженості електричного поля біля катода

створюють велику неоднорідність поля і використовують високі робочі напруги [8].

### **1.2.5. Недоліки та переваги рентгенографії з використанням рентгенівської плівки**

Основні переваги радіографічного контролю:

- висока чутливість до виявлення дефектів (в середньому 1-2% від просвічуваної товщини);
- документальність результатів контролю (радіографічні плівки можуть зберігатися багато років);
- наочність результатів контролю (по зображенню дефекту на плівці легко визначається тип дефекту);
- застосовується для широкого класу матеріалів (залежно від використовуваного джерела іонізуючого випромінювання можна контролювати і метали, в т.ч. аустенітні сталі і легкі метали, і органічні речовини).

Однак поряд з перевагами плівкова радіографія має і низку значних недоліків:

- мала квантова ефективність;
- вузький динамічний діапазон;
- невизначеність у виборі часу експозиції;
- висока вартість рентгенівської плівки, проявника;
- трудомісткість процесу проявлення рентгенівської плівки;
- труднощі, пов'язані з організацією та змістом плівкового архіву [9].

### **1.3. Рентгенографія з використанням багаторазових детекторів рентгенівського тіньового випромінювання**

Комп'ютерна рентгенографія - це метод, що дозволяє отримувати рентгенівське зображення на запам'ятовуючих люмінофорних гнучких. Потім інформацію зчитують з пластини за допомогою сканера для її подальшої візуалізації та аналізу.

Схема контролю будується точно так же, як і в традиційній рентгенографії, виключаючи проявлення рентгенівської плівки. Фосфорна пластина прикріплюється до зварного шва або іншого об'єкта. Гнучкість дозволяє зігнути її по формі об'єкта. Можна використовувати існуючі свинцеві екрани і касети. Потім відбувається експонування за допомогою будь-якого джерела рентгенівського або гамма-випромінювання. Можливе застосування рентгенівських апаратів постійного потенціалу, імпульсних і напівперіодних апаратів, а також гамма-ізотопів селену, іридію, цезію, кобальту та інших. Пластини сумісні з будь-якими джерелами радіації з енергіями від 10 кеВ до 25 МеВ.

### 1.3.1. Суть методу комп'ютерної рентгенографії

Метод комп'ютерної рентгенографії заснований на використанні властивості певних люмінофорів накопичувати приховане зображення.



Рис.1.15. Схема процесу сканування запам'ятовуючої пластини і отримання цифрового зображення: 1 – лазер; 2 – оптика формування пучка; 3 – зеркало; 4 – фотопомножувач; 5 – фільтр; 6 – оптика збору світла люмінесценції; 7 – запам'ятовуюча пластина.

Воно формується в кристалах, коли електрони, утворені в них в результаті опромінення рентгенівськими променями, захоплюються на енергетичні рівні і залишаються на них на протязі довго проміжку часу. З цього стану вони можуть бути виведені збудженим лазерним пучком. Оскільки зчитування інформації, записаної на флуоресцентну запам'ятовуючу пластину, можливе лише з використанням сучасної комп'ютерної техніки, цей вид запису отримав назву комп'ютерної, або цифрової рентгенографії.

### **1.3.2. Фосфорні пластини багаторазового використання**

В комп'ютерній рентгенографії для отримання зображення замість плівки використовують пластини багаторазового використання. Касети з такими пластинами мають типові для рентгенівської плівки розміри 18x24, 18x30, 24x30 і 35x43 см. Можлива також різка пластин, тобто зчитування і інших розмірів. Для запам'ятовування зображення в пластині використовується шар з фото стимулюючою пам'яттю – складна хімічна сполука. Частіше за все використовується сполука типу барій фтор бром.

Фосфорні пластини це:

- гнучкість;
- чіткість зображення;
- широкий вибір форматів;
- портативність обладнання;
- універсальність (можливість роботи з гнучкими чи жорсткими касетами);
- ефективність: достатньо висока чутливість та продуктивність.

Пластини можуть вигинатись, повторюючи рельєф об'єкта контролю. Мінімально допустимий розмір пластини складає 100x180мм. Фосфорна пластина використовується багаторазово, шляхом видалення раніше отриманих радіаційних зображень.

Свинцеві підсилюючі екрани діють на фосфорні пластини так само як і на рентгенівську плівку – підсилюючи рентгенівське випромінювання та фільтруючи розсіяне випромінювання. Флуоресцентні екрани не підвищують

чутливості фосфорних пластин, оскільки пластини слабо чутливі до видимої області спектру.

Оскільки чутливість фосфорної пластини вище, ніж у рентгенівської плівки, час експозиції можливо зменшити в 5-10 разів, що економить ресурс дорогої вартісної трубки і значно зменшує навантаження опромінення на персонал.

### **1.3.3. Динамічний діапазон фосфорних пластин**

Динамічний діапазон по сталі показує різницю мінімальної і максимальної товщини досліджуваного об'єкта, які одночасно помітні на одному результуючому знімку. Чим цей діапазон більше, тим вище перепад товщин, на яких можливо забезпечити однакову якість на одному знімку. Особливо це актуально при просвічування об'єктів з великими перепадами товщин. Динамічний діапазон самої фосфорної пластини дуже великий і пред'являє високі вимоги до електронного сканера. Динамічний діапазон всієї системи є загальною оцінкою всіх пристроїв, які входять в систему.

### **1.3.4. Технологія отримання рентгенограми з використанням фосфорних пластин**

Касета з запам'ятовуючою пластиною експонується аналогічно до плівки, тобто розташовується за об'єктом. Пластина гнучка і може експонуватись і без касети, якщо в цьому є необхідність. Завантаження і виймання пластини з касети відбувається на світлі, тобто без спеціальної темної кімнати.

Після експонування пластина завантажується в сканер. При використанні сканерів з ручним завантаженням пластина виймається з касети і поміщається в сканер. У випадку використання сканера з автоматичним завантаженням пластина завантажується в сканер в касеті.

Відбувається зчитування зображення (час зчитування, декілька секунд, залежить від встановленої просторової роздільної здатності).

Зчитане сканером зображення архівується, обробляється, в тому числі з використання програм знаходження дефектів, робиться висновок і проводиться друк протоколу контролю.

### **1.3.5. Сканери для багаторазових детекторів рентгенівського випромінювання**

Сканери для багаторазових детекторів розробляються спеціально для використання в області неруйнівного контролю комп'ютерної радіографії. Сканери дозволяють робити якісні знімки, використовуючи в якості джерела радіації рентгенівські апарати постійної імпульсної.

Такі сканери можуть широко застосовуватись в самих різних галузях включаючи авіаційну, нафто- та газопереробну, енергетичну і автомобільно-будівну. Вони мають надзвичайно широкий динамічний діапазон і високі співвідношенням сигнал-шум, що забезпечує вдосконалену методику проявлення і більш високу продуктивність обладнання.

Завдяки широкому динамічному діапазону сканер дозволяє досліджувати великий діапазон товщини за один знімок, що робить його ідеальним для перевірки литих виробів та / або труб на наявність корозії / ерозії. Ця функціональна можливість дозволяє скоротити час експозиції і скоротити кількість повторних знімків.

Однією з особливостей сканера є можливість сканування фосфорних пластин розміром до 35 x 43 см (14 x 17 дюймів) в жорстких захисних касетах, і без них: будь-якої форми або розміру: круглі, трикутні, прямокутні і т. д., що дозволяє повторювати складні рельєфи контрольованого об'єкта, робити якісні знімки з використанням фосфорних пластин у м'яких, гнучких касетах, і потім сканувати їх за допомогою сканера.

Проте, поряд з перевагами сканерів існує обмеження на якість зображення. Зі збільшенням експозиційної дози максимально досягне значення у відношенні сигнал/шум обмежена. Це викликано наявністю структурного шуму використовуваної запам'ятовуючої пластини. Додаткові шуми, у вигляді-



ді додаткових пульсацій, може вносити також сканер. Структурний шум запам'ятовуючої пластини пов'язаний з неоднорідностями фосфорного шару, пов'язаними з процесом виробництва. При високих експозиційних дозах внесок квантового шуму рентгенівського випромінювання невеликий в порівнянні з цими структурними шумами, виходячи з цього якість зображення погіршується. Час експозиції досить високий, тому шум на зображенні визначається структурним шумом самих систем комп'ютерної радіографії. Очевидно, що стандартна комп'ютерна система має гіршу якість зображення в порівнянні з кращого плівковою системою.

### **1.3.6. Недоліки та переваги рентгенографії з використанням багаторазових детекторів рентгенівського випромінювання**

#### **Переваги**

- швидкість отримання інформації;
- виключається «мокра» технологія обробки плівки;
- дози опромінення суттєво менші необхідних для експонування звичайної плівки;
- завдяки більш широкому, ніж у плівки динамічному діапазоні з'являється можливість досліджувати і контролювати деталі більш складної форми та з більшою товщиною;
- пластина для запису є багаторазовою, допускається експонування до 30 тис. разів;
- Є можливість архівувати інформацію в комп'ютері на різних носіях, робити необхідну кількість ідентичних копій, використовувати електронну пошту для передачі інформації; час зберігання лазерного диску без втрати інформації складає не менше 30 років;
- Пряме отримання цифрових зображень дозволяє відмовитись від обладнання для оцифровки рентгенівських плівок;
- Вже зараз досягнена просторова роздільна здатність при зчитуванні складає 10 пар ліній/мм, дозволяє отримувати зображення високої якості.

Недоліки:

- Радіографічна якість використовуваних наразі запам'ятовуваних пластин приблизно відповідає крупно зерновій високочутливій плівці, що обмежує сферу використання даної техніки;
- Чутливість контролю, отримана при дослідках систем комп'ютерної радіографії в різних лабораторіях складає 1,6% і має тенденцію до певного погіршення при більш високих енергіях;
- При підвищенні енергії рентгенівського випромінювання є тенденція до збільшення часу експозиції;
- Кожен ланцюг, з системи комп'ютерного рентгенографічного контролю, накладає свої шуми на якість зображення.

#### **1.4. Рентгеноскопія в сфері неруйнівного контролю якості виробів**

Рентгеноскопія - один з основних методів рентгенологічного дослідження, що складається в отриманні на просвічуваному (флуоресцентному) екрані площинного позитивного зображення досліджуваного об'єкта. При рентгеноскопії об'єкт перебуває між просвічуваним екраном і рентгенівською трубкою. На сучасних рентгенівських просвічуваних екранах зображення виникає в момент включення рентгенівської трубки і зникає відразу ж після її вимкнення.

##### **1.4.1. Суть методу рентгеноскопії**

З моменту відкриття рентгенівського випромінювання для рентгеноскопії застосовувався флуоресцентний екран, який представляв собою в більшості випадків лист картону з нанесеною на нього спеціальною флуоресцуючою речовиною. Рентгеноскопія – це реєстрація тіньового зображення зварних швів після проходження через них рентгенівського випромінювання. Таке зображення позитивне, оскільки основна металічна конструкція – темна, оскільки сильно поглинає випромінювання, а зварний шов – світлий, слабо поглинає випромінювання. У сучасних умовах застосування флуоресцентно-

го екрану не обґрунтовано в зв'язку з його малою світністю, що змушує проводити дослідження в добре затемненому приміщенні і після тривалої адаптації дослідника до темряви (10-15 хвилин) для розрізнення малоінтенсивного зображення [11].

#### **1.4.2. Технологія проведення**

Замість класичної рентгеноскопії застосовується рентгентелевізійне просвічування, при якому рентгенівські промені потрапляють на ПРЗ (підсилювач рентгенівського зображення), до складу останнього входить ЕОП (електронно-оптичний перетворювач). Отримане зображення виводиться на екран монітора. зображення на екран монітора не вимагає світлової адаптації дослідника, а також затемненого приміщення. Також можлива додаткова обробка зображення і його реєстрація на відеоплівці або пам'яті апарату.

Також рентгентелевізійного просвічування дозволяє істотно знизити дозу опромінення дослідника за рахунок винесення робочого місця за межі кімнати з рентгенівським апаратом.

Головними відмінностями від плівкових рентгенографічних технологій є здатність робити цифрову обробку рентгенівського зображення і відразу виводити на екран монітора або записуючий пристрій із записом зображення, наприклад, на папір.

Цифрові технології в рентгеноскопії можна розділити на:

- повнокадровий метод
- скануючий метод

**Повнокадровий метод .** Цей метод характеризується отриманням проєкції повної ділянки досліджуваного об'єкта на рентгеночутливий приймач розміру близького до розміру ділянки.

Головним недоліком методу є розсіяне рентгенівського випромінювання. При первинному опроміненні всієї ділянки об'єкта (наприклад, металічна труба) частина променів поглинається, а частина розсіюється в сторони, при цьому додатково засвічує ділянки, що поглинули першопрохідні рентгенівсь-

кі промені. Тим самим зменшується роздільна здатність, утворюються ділянки із засвіченням проектуючи точок. У підсумку виходить рентгенівське зображення зі зменшенням діапазону яскравості, контрастності і роздільної здатності зображення.

При повнокадровому дослідженні ділянки труби одночасно опромінюється вся ділянка. Спроби зменшити величину вторинного розсіяного опромінення застосуванням радіографічного растра призводить до часткового поглинання рентгенівських променів, але і збільшення інтенсивності джерела, збільшення дозування опромінення.

### **Скануючий метод**

У цьому методі можна виділити:

- однорядковий скануючий метод
- складний скануючий метод

**Однорядковий скануючий метод.** Найбільш перспективним є скануючий метод отримання рентгенівського зображення. Тобто рентгенівське зображення отримують рухомим з постійною швидкістю пучком рентгенівських променів. Зображення фіксується по рядкам (однорядковий метод) вузької лінійної рентгеночутливої матриці і передається в комп'ютер. При цьому в сотні і більше разів зменшується дозування опромінення, зображення виходять практично без втрат діапазону яскравості, контрастності і, головне, об'ємної (просторової) роздільної здатності.

**Багаторядковий скануючий метод.** Даний метод сканування більш ефективний ніж однорядковий. При однорядковому методі сканування через мінімальну величини розміру пучка рентгенівського променя (1-2 мм), ширини однорядковою матриці 100мкм, наявності різного роду вібрацій, люфту апаратури, виходять повторні опромінення. Застосувавши багаторядкову технологію скануючого методу, вдалося в сотні разів зменшити вторинне розсіяне опромінення і в стільки ж разів знизити інтенсивність рентгенівського променя. Одночасно поліпшені всі інші показники одержуваного рентгенівського зображення: діапазон яскравості, контраст і дозвіл [12].

### 1.4.3. Обладнання для проведення рентгеноскопії

На сьогоднішній день найкращою вважається система XT V 160, яка призначена для контролю вузлів пайки електронних компонентів (включаючи SMD (surface mount technology )-компоненти), а також ІМС(інтегральна мікросхема) в корпусах BGA(Ball grid array), CSP(Chip-scale package), QFP(Quad Flat Package); автоматичного контролю пайки мікросхем BGA, пустот, провисання провідників всередині ІМС. Основними споживачами даного устаткування є виробники виробів мікроелектроніки, а також виробів спеціального призначення.

В системі XT V 160 виробництва Nikon Metrology всі параметри підібрані таким чином, щоб споживач отримував максимальну вигоду від використання даного обладнання. Так, система XT V 160 має відкриту рентгенівську трубку NanoTech™ з оптимальною роздільною здатністю - 500 нм, а її максимальне геометричне збільшення досягає 2400X. Важливим є той факт, що візуалізація відбувається в реальному режимі часу з можливістю

масштабування. максимальні розміри виробів, можуть досягати 0,6х0,6 метра при вазі до 50 кг [13].

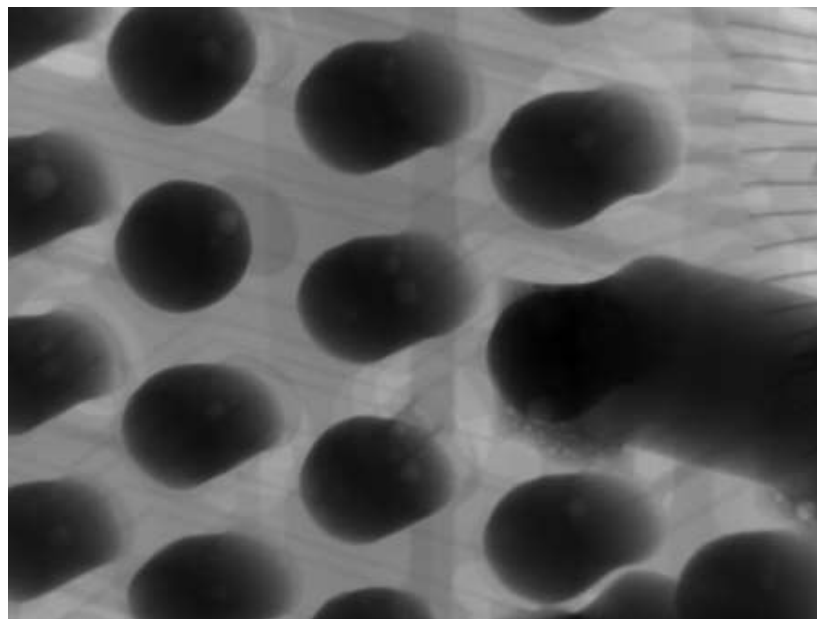


Рис.1.16. Дефект пайки мікросхеми BGA

#### **1.4.4. Недоліки та переваги рентгеноскопії**

Недоліки рентгеноскопії:

- відносно висока доза опромінення в порівнянні з рентгенографією;
- низька просторова роздільна здатність.

Головною перевагою перед рентгенографією є факт дослідження в реальному масштабі часу. Це дозволяє оцінити не тільки структуру, а й зміщуваність шва, скоротність або розтяжність, проходження речовини, наповнюваність. Метод також дозволяє досить швидко оцінити локалізацію деяких змін, за рахунок обертання об'єкта дослідження під час просвічування (багатопроєкційне дослідження). При рентгенографії для цього потрібне проведення кількох знімків, що не завжди можливо.

#### **1.5. Рентгенотелевізійні системи та чутливість неруйнівного контролю якості виробів**

Кожна рентгенотелевізійна система складається з 3-х основних елементів:

- джерело рентгенівського випромінювання;
- рентгенооптичний перетворюючий пристрій;
- система візуалізації.

Кожний з цих елементів вносить певний внесок в загальний рівень шуму рентгенотелевізійної системи.

Рівень шуму РТС (рентгенотелевізійна система) є дуже важливим параметром оскільки він визначає величину відношення сигнал/шум, від якої залежить абсолютна і відносна чутливість контролю, що вирішує роздільну здатність, якість зображення при візуальному сприйнятті і можливість автоматичного вимірювання параметрів дефектів. На відміну від рентгенографії, в РТС є можливість регулювання електричним способом фонові складові рентгенівського зображення, і здатність виявлення дефектів ви-

значається не контрастом зображення, а відношенням сигнал/шум на виході системи [14].

Обробка шумів є дуже важливою, оскільки в результаті ми отримуємо більшу чутливість контролю якості, зір оператора не стомлюється, збільшується роздільна здатність зображення, контрастність, шуми інтегруються по полю зображення і легше знайти дефекти.

### 1.5.1. Шуми рентгенівського випромінювання

Цей вид шумів виникає в результаті флуктуації кількості квантів, поглинених елементом мішені за час експозиції, із-за великого квантового виходу рентгенопровідності, що приводять до значних флуктуацій накопиченого в елементі мішені заряду. В результаті вихідний шум рентгеновідікона, обумовлений такими флуктуаціями (квантовий шум), може значно перевищувати шум попереднього підсилювача [15,16]. Величина квантового шуму залежить як від типу і режиму роботи рентгеновідікона, так і від тривалості експозиції, потужності експозиційної дози і спектрального складу випромінювання на його вході. Тому відношення сигнал/шум в зображенні дефекту для заданої тривалості експозиції залежатиме від типу матеріалу і товщини контрольованого об'єкту, геометрії просвічування, типу рентгенівської трубки і її режиму роботи, а також від типу і режиму роботи рентгеновідікона. При значному збільшенні тривалості експозиції квантовий шум може знижуватися і ставати сумірним з шумом попереднього підсилювача (ця властивість використовується при накопиченні сигналу на мішені рентгеновідікона).

При рівномірній по площі мішені рентгеновідікона інтенсивності випромінювання кількість квантів  $n_i$ , поглинене за час експозиції різними елементами мішені флуктує відносно свого середнього значення  $\bar{n}$ , і мірою такої флуктуації є середньоквадратичне відхилення:

$$\delta = \sqrt{(\langle n_i + n_y \rangle)^2} . \quad (1.6)$$

Закон розподілу щільності ймовірності такої флуктуації є Пуассоновським, тому  $\delta = \sqrt{n_y}$  [15,17]. З урахуванням цього, ефективне значення квантового шуму на виході рентгеновидикона можна визначити як:

$$I_{\sigma} = f'_A(n_y) \sqrt{n_y}, \quad (1.7)$$

де  $f'_A(n_y)$  - похідна дозової характеристики рентгеновидикона залежно від кількості квантів пэ.

Щоб одержати характеристики  $f'_A(n_y)$  необхідно дозові характеристики перерахувати в характеристики, а потім отримані характеристикиостанні продиференціювати.

Кількість квантів пэ, що поглинається елементом мішені за час експозиції визначається як:

$$n_y = \pi R_{\epsilon}^2 T_y \int_0^{E_{\max}} n(E) d\mu_0(E) dE, \quad (1.8)$$

де  $n(E)$  – енергетичний спектр густини потоку квантів на вході рентгеновидикона,  $d$  – товщина мішені.

### 1.5.2. Шуми відикона

Припустимо, що дробовий шум зчитувального променя є основним у власному шумі видикона. Якщо величина струму променя одного порядку з величиною струму сигналу, то оскільки дробовий шум пропорційний кореню квадратному із струму, то і відношення сигнал-шум пропорційно в першому наближенні кореню квадратному із струму променя. У зв'язку з великою ємністю елементу мішені струм променя у видиконі може бути на два порядки більше, ніж в суперортіконі, відповідно виходить і краще відношення сигнал-шум. Природно, що цим спрощеним міркуванням не вичерпуються всі особливості шумових співвідношень для видикона і суперортікону.

Середньоквадратичні флуктуації прикладеної до мішені напруги, що виникають внаслідок наявності теплового шуму визначається виразом [18]:



$$\langle U \rangle_T^2 = \frac{2\pi kT^0}{C_y} \quad (1.9)$$

Середньоквадратичні флуктуації прикладеної до мішені напруги, що виникають внаслідок наявності генераційно-рекомбінаційного шуму, будуть:

$$\langle U \rangle^2 = \frac{4eU}{\alpha C} \int_0^{\frac{2\pi}{T}} \frac{\tau d\omega}{1+\omega^2\tau^2} = \frac{4eU}{\alpha C} \operatorname{arctg} \frac{2\pi}{T_k} \tau \quad (1.10)$$

Інтенсивність генераційно-рекомбінаційних шумів залежно від величини часу кореляції  $\tau_{ei\delta}$  може змінюватися від 0 до  $2peU/C\alpha$ . У останньому випадку (при цьому  $\alpha=1$ ) відношення генераційно-рекомбінаційних шумів до теплових:

$$\sqrt{\frac{eU}{kT^0}} = \sqrt{\frac{10^{-19}(10 \div 100)}{10^{-16} \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 10^{-7}}} \approx 20 \div 50 \quad (1.11)$$

З викладеного витікає, що мінімальні можливі флуктуації величини потенціалу на мішені визначаються тепловими шумами. При  $C\alpha=10^{-14}$  Ф ефективне значення шумової напруги при  $T^0 = 300^\circ\text{K}$  рівно 1 мВ, а максимально можливе значення генераційно-рекомбінаційних шумів – близько 20—50 мВ. Для отримання якісного півтонового зображення з цієї точки зору, очевидно, достатньо перепад напруги між освітленими і темними ділянками мішені близько 1 В.

При струмі променя  $5 \cdot 10^{-7}$  а і смузі пропускання підсилювача 7,3 МГц шумовий струм, що виникає із-за дробового ефекту, буде:

$$\sqrt{\langle i \rangle^2} = \sqrt{2eif} \approx 1.1 \cdot 10^{-9} \text{ А} \quad (1.12)$$

тобто шумовий струм із-за дробового ефекту в емісії термодатода буде приблизно в 400 разів менше струм променя. Виходячи з приведеної вище можливої величини шуму в потенційному рельєфі (до 50 мВ) і даних про глибину потенційного рельєфу у видиконах (до 10 В), можна прийняти (по відношенню корисних і шумових величин), що у видиконах можуть бути порівнянні ролі шуму потенційного рельєфу і дробового шуму.

### 1.5.3. Шуми попереднього підсилювача

Шум попереднього підсилювача, так само як і шум рентгенівських квантів, є основним видом шуму РТС. Вхідні каскади попередніх підсилювачів для передавальних електронно-променевих трубок будують за каскодною схемою з використанням на вході польового транзистора з р-п переходом, яка володіє малим рівнем шумів і високою стійкістю до самозбудження [19]. А для формування необхідної амплітудно-частотної характеристики підсилювача застосовують негативні частотно-залежні зворотні зв'язки [20].

Еквівалентна схема такого вхідного каскаду приведена на Рис. 1.17. На схемі  $C_{рв}$ ,  $C_m$  і  $C_t$  - ємність рентгеновидикона, монтажу і вхідна ємність польового транзистора VT відповідно. До входу польового транзистора підключені опір навантаження рентгеновидикона  $R_n$ , і опір зворотного зв'язку  $R_{oc}$ . Джерело напруги  $e_{ш}$  визначає спектральну щільність еквівалентної шумової напруги транзистора, приведеного до його входу.

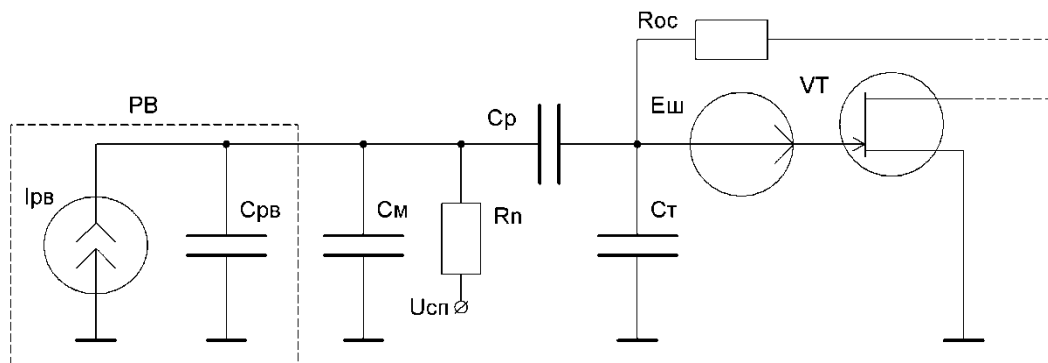


Рис. 1.17. Еквівалентної схеми вхідного каскаду на польовому транзисторі

Середньоквадратичне значення теплового шумового струму від кожного  $R_n$  і  $R_{oc}$  на вході підсилювача обчислюється за відомою формулою:

$$I_R = \sqrt{\frac{4kTF}{R}}, \quad (1.13)$$

де:  $k$  - постійна Больцмана;  $T$  - абсолютна температура;  $F$  - ширина частотної смуги пропускання підсилювача.

Спектральна щільність шумового струму польового транзистора, приведена до його входу, визначається виразом [18]:

$$i_T(f) = \sqrt{4\pi^2 e_{\theta}^2 C^2 f^2}, \quad (1.14)$$

інтегруючи який за частотою  $f$  від 0 до  $F$ , набуваємо середньоквадратичного значення шумового струму транзистора, приведенного до його входу:

$$i_T = \sqrt{\frac{4\pi^2 e_{\theta}^2 C^2 F^2}{3}}, \quad (1.15)$$

де  $C = C_{\tau} + C_M + C_{\pi}$ .

Звичайно для польового транзистора виконується умова  $e_{\pi}(C_{\tau})^{0.5} = \text{const}$ . Якщо знайти звідси  $e_{\pi}$  і підставити в його (1.11), то після дослідження (1.12) на мінімум можна одержати, що мінімальний шум попереднього підсилювача досягається при  $C_{\tau} = C_{\text{срв}} + C_M$ . Оскільки звичайно  $C_{\tau} < C_{\text{срв}} + C_M$ , то для зниження шуму включають паралельно два і більш польових транзистора.

#### 1.5.4. Шуми аналого-цифрового перетворення

Аналого-цифровий перетворювач виконує процес дискретизації вхідного рентгенотелевізійного відеосигналу. Як відомо, дискретизація це представлення безперервного аналогового сигналу послідовністю його значень (відліків). Ці відліки беруться в моменти часу, відокремлені один від одного інтервалом, який називається інтервалом дискретизації. Величину, зворотну інтервалу між відліками, називають частотою дискретизації. На Рис. 1.18 показані початковий аналоговий сигнал і його дискретизована версія.

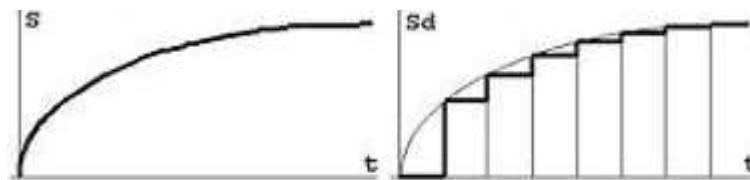


Рис.1.18. Аналого-цифрове перетворення, дискретизація.

В процесі квантування неминуче виникає помилка квантування яку ще називають шумом квантування. Розглянемо квантування з рівномірним кроком, тобто рівномірне квантування. Послідовність помилок квантування, що

виникає при квантуванні процесу з дискретним часом, називається шумом квантування. Звичайно шум квантування припускають стаціонарним ергодичним випадковим процесом. Частіше всього інтерес представляють максимальне значення помилки квантування, її середнє значення рівне математичному очікуванню шуму і середньоквадратичне відхилення, рівне квадратному кореню з дисперсії шуму (вона характеризує потужність шуму квантування). Всі ці величини залежать від способу округлення, вживаного при квантуванні, крім того  $\bar{\varepsilon}$  залежать від закону розподілу  $w(\varepsilon)$  миттєвих значень сигналу в межах кроку квантування. Вважаючи крок квантування малим в порівнянні з діапазоном зміни сигналу, щільність  $w(x)$  в межах цього кроку можна прийняти рівномірною, тобто  $W(\varepsilon) = \frac{1}{\Delta x}$ . Розрізняють квантування з округленням, з усіканням і з усіканням модуля. При квантуванні з округленням дійсному значенню відліку приписує найближчий дозволений рівень квантування незалежно від того, знаходиться він зверху або знизу. Квантування з округленням вимагає певної складності в реалізації. Простіше виконується квантування з усіканням, при якому дійсному значенню відліку приписується найближчий нижній рівень. При цьому:

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon} &= \int_{-\frac{\Delta x}{2}}^{\frac{\Delta x}{2}} \varepsilon \cdot w(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{\Delta x} \int_{-\frac{\Delta x}{2}}^{\frac{\Delta x}{2}} \varepsilon \cdot d\varepsilon = \frac{1}{\Delta x} \frac{\varepsilon^2}{2} \Big|_{-\frac{\Delta x}{2}}^{\frac{\Delta x}{2}} = \frac{1}{2\Delta x} \left( \frac{\Delta x^2}{4} - \frac{\Delta x^2}{4} \right) = 0 \\ \sigma_{\varepsilon}^2 &= \int_{-\frac{\Delta x}{2}}^{\frac{\Delta x}{2}} (\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2 w(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{\Delta x} \int_{-\frac{\Delta x}{2}}^{\frac{\Delta x}{2}} \varepsilon^2 d\varepsilon = \frac{1}{\Delta x} \frac{\varepsilon^3}{3} \Big|_{-\frac{\Delta x}{2}}^{\frac{\Delta x}{2}} = \frac{1}{3\Delta x} \left( \frac{\Delta x^3}{8} - \left( -\frac{\Delta x^3}{8} \right) \right) = \\ &= \frac{1}{3\Delta x} \frac{\Delta x^3}{4} = \frac{\Delta x^2}{12}\end{aligned}\tag{1.12}$$

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^{\Delta x} \varepsilon \cdot w(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\Delta x}{2}; \quad \sigma_{\varepsilon}^2 = \int_0^{\Delta x} \left( \varepsilon - \frac{\Delta x}{2} \right)^2 w(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\Delta x^2}{12},\tag{1.13}$$

тобто максимальне значення погрішності в 2 рази більше, а  $\bar{\varepsilon}$ , що приводить до накопичення помилок квантування при подальшій обробці квантованої послідовності. Проміжне положення по точність і складнощі реалізації займає квантування з усіканням модуля, яке для позитивних відліків є таким же, як і квантування з усіканням. Негативним відлікам приписується найближчий верхній рівень. При цьому:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{-\Delta x}^{\Delta x} \varepsilon \cdot w(\varepsilon) d\varepsilon = 0; \quad \sigma_{\varepsilon}^2 = \int_{-\Delta x}^{\Delta x} (\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2 w(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\Delta x^2}{3}, \quad (1.14)$$

тобто накопичення погрішностей не відбувається, але в 2 рази збільшується максимальна погрішність, і в 2 рази - потужність шуму квантування  $\sqrt{\sigma_{\varepsilon}^2}$ . Вибираючи достатньо більше число рівнів квантування N, крок квантування  $\Delta x = (x_{\max} - x_{\min})$ , а отже і всі розглянуті погрішності можна зробити необхідно малими. При нерівномірному законі розподілу миттєвих значень сигналу квантування з постійним кроком  $\Delta x$  не є оптимальним по критерію мінімуму середньоквадратичної помилки  $\sigma_{\varepsilon}$ . Квантуючи ділянки з менш вірогідними значеннями сигналу з великим кроком значення  $\sigma_{\varepsilon}$  можна зменшити, при цьому ж кількості рівнів квантування.

## 1.6. Усунення флуктуаційних шумів методом накопичення сигналу

### 1.6.1. Накопичення періодичних аналогових сигналів

Для оцінки можливості застосування методу накопичення сигналу для підвищення співвідношення сигнал/шум розглянемо процес накопичення періодичного сигналу з невідомою початковою фазою. У цьому варіанті доцільно використовувати алгоритм обчислення взаємкорельованої функції адитивної суміші корисного сигналу і шуму і опорним сигналом, період якого рівний періоду корисного сигналу. Можливий виграш у відношенні сигнал/шум розглянемо на прикладі гармонічного сигналу. Опорний сигнал  $U_0(t)$  теж покладемо гармонічним, але з іншою амплітудою і фазою  $\varphi_0 = \omega\tau$ . Шум  $\xi(t)$  вважатимемо "білим":

$$U_c(t) = U_c \cos(\omega_0 t); \quad (1.15)$$

$$U_0(t) = U_0 \cos(\omega_0(t + \tau)); \quad (1.16)$$

$$U_{\omega\omega}(t) = U_c(t) + \xi(t); \quad (1.17)$$

Таким чином шукана взаємкореляційна функція буде:

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \left[ U_c U_0 \cos \omega_0 \omega t \cdot \cos \omega_0(t + \tau) + U_0 \cos \omega_0(t + \tau) \cdot \xi(t) \right] dt = \quad (1.18)$$

$$= \frac{U_0 U_c}{2} \cos \omega_0 \omega \tau + \frac{U_0 U_c}{4 \omega_0 T} [\sin \omega_0(2T + \tau) - \sin \omega_0 \tau] + \frac{U_0}{T} \int_0^T \cos \omega_0(t + \tau) \xi(t) dt$$

Другий член в (1.18) можна розглядати, як фон при кінцевому часі інтегрування, тоді, як третій інтеграл має сенс "шуму". І "фон" і "шум" убувають при збільшенні часу інтеграції Т. Очевидно, що "фон" убуває як 1/Т.

Для оцінки величини "шуму" використовуємо співвідношення Хінчина:

$$\left[ \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \xi(t + \tau) dt \right]^2 = U_{\xi}^2 = \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T R(t_2 - t_1) x(t_1) x(t_2) dt_1 dt_2 \quad (1.19)$$

Тут  $R(t_1 - t_2)$  – кореляційна функція випадкового процесу,  $x(t)$  – детермінована функція. Прийmemo умови розглянутого вище прикладу: шум на вході вважатимемо "білим" із спектральною щільністю потужності  $S_0$ , на вході кореляційного фільтру включений RC фільтр з коефіцієнтом передачі:

$$U(j\omega) = \frac{\beta}{\beta + j\omega}. \quad (1.20)$$

Вище було показано, що кореляційна функція випадкового процесу на виході такого RC фільтрі має вигляд:

$$B(\tau) = \frac{S_0 \beta}{2} \exp(-\beta |\tau|) \quad (1.21)$$

Підставляючи ці функції в (1.19) і обчислюючи подвійний інтеграл, одержуємо вираз, що включає члени, що мають різне убування при збіль-

шенні інтервалу інтеграції  $T$ . Якщо врахувати тільки найбільш поволі убиваючий член  $1/T$ , то приблизно одержуємо:

$$\langle U_{\sigma}^2 \rangle = \frac{S_0 U_0^2 |K(j\omega_0)|^2}{T}. \quad (1.22)$$

Ця формула і описує потужність "шуму" на виході кореляційного фільтру, обумовленого кінцевим часом інтеграції  $T$ . "Амплітуда шуму" відповідно:

$$\sqrt{\langle U_{\sigma}^2 \rangle} = \frac{U_0 \sqrt{S_0} |K(j\omega_0)|}{\sqrt{T}}. \quad (1.23)$$

Відмітимо, що роль частотного інтервалу тут грає величина  $1/T$ . Величина ж  $|K(j\omega_0)|$  просто безрозмірний коефіцієнт. Звертаючись до (1.18), нагадаємо, що перший член описує взаємкореляційну функцію детермінованих сигналів, корисного  $U_c(t)$  і опорного  $U_0(t)$  і, отже, має сенс корисного сигналу на виході кореляційного фільтру:

$$R_c(\tau) = \frac{U_c U_0}{2} |K(j\omega_0)| \cos(\omega_0 \tau). \quad (1.24)$$

Очевидно, що відношення сигнал/шум (припускаючи, що  $\tau_0$  вибирається так, щоб  $\cos(\omega_0 \tau_0)$  буде:

$$\gamma \approx \frac{U_c \sqrt{T}}{2 \sqrt{S_0}} = \frac{U_{\hat{c}}}{\sqrt{\langle U_{\sigma}^2 \rangle}}. \quad (1.25)$$

Це важливий результат: при накопиченні періодичного сигналу, яке можна вести впродовж ряду періодів, відношення амплітуд сигнал/шум на виході кореляційного фільтру збільшується пропорційно кореню квадратному від часу інтеграції  $\sqrt{T}$ . Зрозуміло, що одержана залежність сигнал/шум від часу інтеграції (як  $\sqrt{T}$ ) збережеться і у разі складного періодичного (імпульсного) сигналу. Відмітимо, що в цьому випадку і опорний сигнал повинен мати спектр такий же, як і спектр корисного сигналу [16].

### 1.6.2. Оцінка можливого виграшу у відношенні сигнал / шум при дискретному записі сигналу

Вище було показано, що для періодичного сигналу відношення сигнал / шум може бути покращене накопиченням кількості кадрів. Можливий виграш пропорційний квадратному кореню з часу накопичення і обернено пропорційний смузі аналогового фільтру. У разі дискретних відліків сигналу - аддитивної суміші сигнал + шум, очевидно, що виграш буде пропорційний  $\sqrt{n}$ , де  $n$  число кадрів зображення. Процес накопичення зручно реалізувати за допомогою алгоритму - програми на ЕОМ. При практичній реалізації цього способу слід мати на увазі, що число накопичуваних вибірок, що дають бажаний виграш буде обмежено розрядністю вживаного аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Можна задатися питанням про необхідну розрядність АЦП, якщо заданий необхідний виграш сигнал/шум. Або оцінити можливий виграш, якщо АЦП вже вибраний. В процесі оцінки будуть враховані шуми дискретизації аналого-цифрового перетворювача.

У цьому наближенні розглянемо зв'язок можливого виграшу сигнал/шум при накопиченні на аналого-цифровий перетворювачі із заданою розрядністю. Хай миттєве значення вхідної величини є :  $V = U + \zeta$  і відношення сигнал/шум:

$$\alpha = \frac{|U|}{\sigma}, \quad (1.26)$$

де -  $U$  - величина сигналу,  $\sigma$  - середньоквадратична величина шуму.

Цікавимося випадком, коли  $\alpha \leq 1$ . Хочемо поліпшити це відношення накопиченням і реалізуємо це накопичення чисельним методом. Для цього використовуваний АЦП, в якому число представляється  $N$  двійковими розрядами. Тоді максимальний код  $2^N - 1$  відповідає максимальному значенню числа, мінімальний код 1 (число  $> 0$ ). Вважаємо, що шуми розподілені по нормальному закону. Обмежимо діапазон АЦП потрібною середньоквадратичною величиною шуму ( $3\sigma$ ), що відповідатиме максимальному коду. Рівень  $3\sigma$  при нормальному законі розподілу обмежить значення шуму тільки в 0.1%



випадків. Вважаючи, що динамічний діапазон перетворювача встановлений  $3\sigma$ , можна ввести коефіцієнт передачі код - напруга :

$$K = \frac{2^N - 1}{3\sigma}. \quad (1.27)$$

Дискретна форма представлення числа приводить до "шумів оцифровування":

$$\delta = \frac{3\sigma}{2^N - 1}. \quad (1.28)$$

Це шум оцифровування, що оцінюється одиницею коду, перерахованою до входу.

Відношення сигнал / цифрові шуми є:

$$\beta = \frac{|U(2^N - 1)|}{3\sigma} \quad (1.29)$$

або

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{2^N - 1}{3}. \quad (1.30)$$

Цифрові шуми не знімаються накопиченням, тому величина  $\sigma$  визначає гранично досяжне відношення сигнал/шум на виході при даній розрядності, а відношення  $\beta/\alpha$  можливий виграш при цифровому накопиченні.

Оцінимо тепер можливий виграш при даній розрядності АЦП. Виходимо з того, що при накопиченні відношення сигнал/шум поліпшується пропорційно  $\sqrt{n}$ . Прирівнюючи ці величини, маємо :

$$\sqrt{n} = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{2^N - 1}{3} \quad (1.31)$$

або

$$n = \frac{(2^N - 1)^2}{9}, \quad (1.32)$$

$$3\sqrt{n} = 2^N - 1 \quad (1.33)$$

Нарешті, задаючись бажаним виграшем при цифровому накопиченні, визначаємо необхідну розрядність АЦП і ЕОМ:

$$N \approx \log_2(3\sqrt{n}) \text{ при } N \gg 1. \quad (1.34)$$

Одержані наближені формули можуть виявитися корисними при виборі типу АЦП або при оцінці досяжного виграшу при цифровому накопиченні з даним АЦП.

Можна уточнити приведену оцінку "шуму оцифровування" -  $\delta$ , якщо врахувати, що як тільки значення вхідного сигналу  $V = U + \xi$  опиниться поблизу середини кроку оцифровування то, із-за випадкового характеру шуму в АЦП, може бути додана або віднята одиниця коду. Для наближеної оцінки можна на інтервалі кроку оцифровування розподіл шуму вважати рівномірним. Тоді дисперсія оцифровування оціниться так:

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{1}{\delta} \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} (x^2 dx) = \frac{\delta}{12} \quad (1.35)$$

або

$$\sigma_{\Delta} = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} = 0.288. \quad (1.36)$$

Таким чином реальна величина "шуму оцифровування" виявляється менше.

## 1.7 Комплекс цифрової радіографії "Гرادієнт"

Комплекс цифрової радіографії «Градiєнт» з флуоресцентними запам'ятовуючими пластинами поєднує в собі гнучкість, надійність, високі роздільну здатність і чутливість, великий динамічний діапазон і простоту експлуатації.



Рис.1.19 Комплекс цифрової радіографії «Градiєнт»

Комплекс цифрової радіографії «Градiєнт» зі сканером Duer або Scan-X і запам'ятовуючими пластинами розроблений спеціально для застосування в неруйнівному контролі, тому підходять для використання як з рентгенівськими, так і з ізотопними джерелами. Комплекси дозволяють вирішувати широкий спектр завдань неруйнівного контролю в електроенергетиці, авіакоsmічній, нафтогазовій, автомобільній та інших галузях промисловості.

Також в комплекс «градiєнт» входить програмне забезпечення «Відео-рен». Дане програмне забезпечення дозволяє отримати 16-бітне представлення даних (65536 градацій сірого), імпортувати/експортувати зображення в різних сучасних форматах.

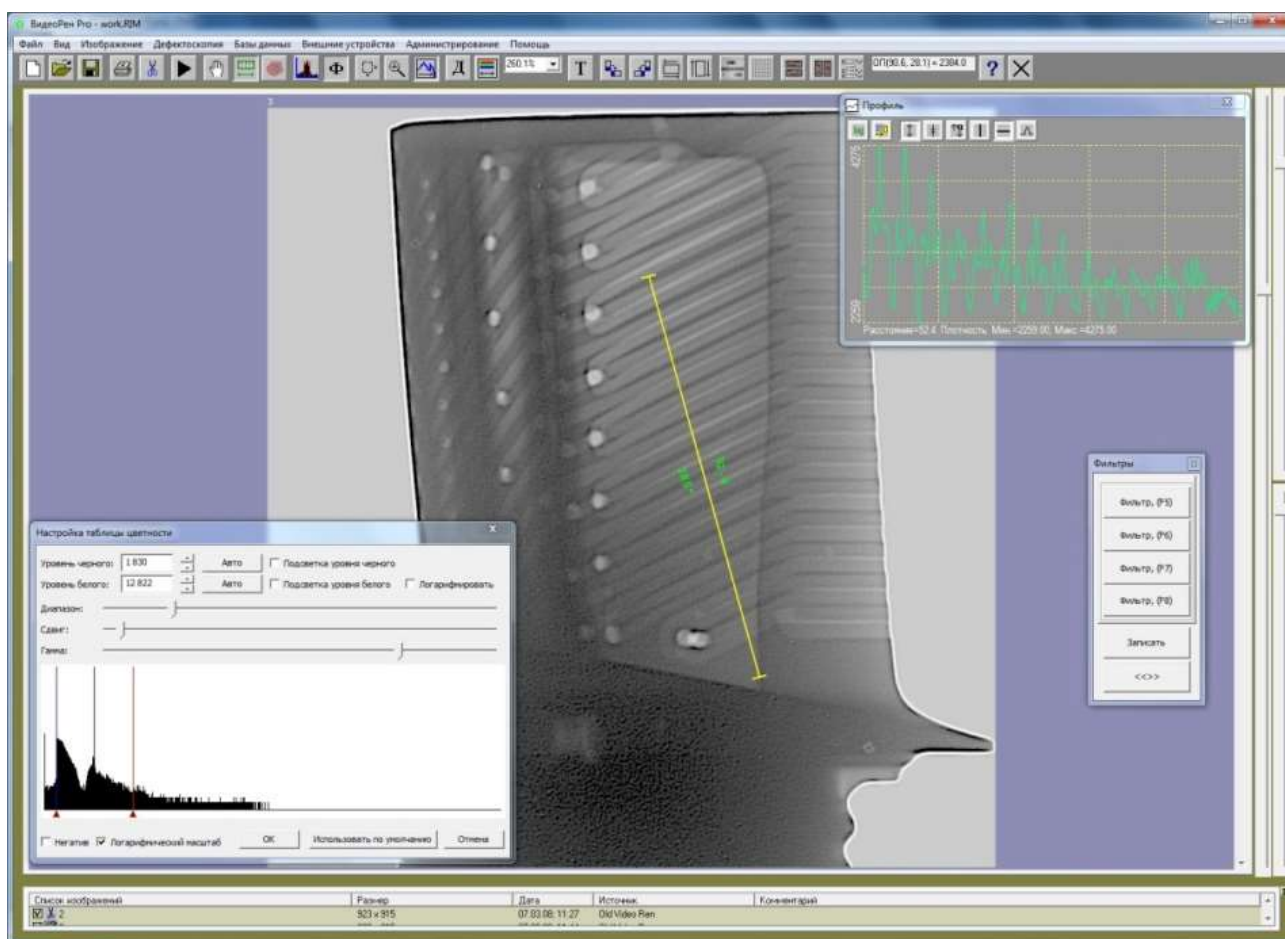


Рис.1.20 Програмне середовище «відео-рен»

Обробка зображень дає можливість:

- інвертувати зображення (негатив/позитив);
- робити геометричні перетворення зображення (масштабування, обертання, зеркальне відображення, вирізання фрагментів);
- наносити маркери на зображення;
- налаштовувати оптимальну яскравість і контрастність зображення по гістограмі інтенсивності всього зображення;
- тонко налаштовувати параметри роботи фільтрів, адаптувати їх для будь якого об'єкту контролю;
- вимірювати інтенсивність в будь-якій точці зображення;
- Та інше.
- Даний комплекс дає:
- високу продуктивність, завдяки виключенню процесу «мокрої» обробки плівки і значно меншому часу експозиції;
- високу якість зображення, підтверджену сертифікатом;
- можливість зменшення дози випромінювання в порівнянні з плівкою;
- Можливість зменшити витрати на проведення контролю.

### **1.8. Можливість реалізації статистичної обробки тіньового рентгенотелевізійного зображення**

Цифрові методи обробки рентгенівського тіньового зображення широко використовуються на даний момент. Проте жоден з цих методів не вирішує задачу повної автоматизації процесу неруйнівного контролю, без участі оператора.

Під час процесу контролю виникають проблеми пов'язані з визначенням часу експозиції, вибором напруги на рентгенівській трубці, а також шумами, які маскують елементи зображення і обмежують чутливість контролю якості виробів.

Є доцільним розробка та впровадження спеціалізованого відеопроцесора, який буде входити до складу вже існуючих РТС. Використання даного

пристрою дасть можливість підвищити якість рентгенотелевізійного зображення, отримати цифрову рентгенограму виробу що контролюється на портативній пам'яті типу SD-card, підвищити продуктивність рентгеноскопічного контролю.

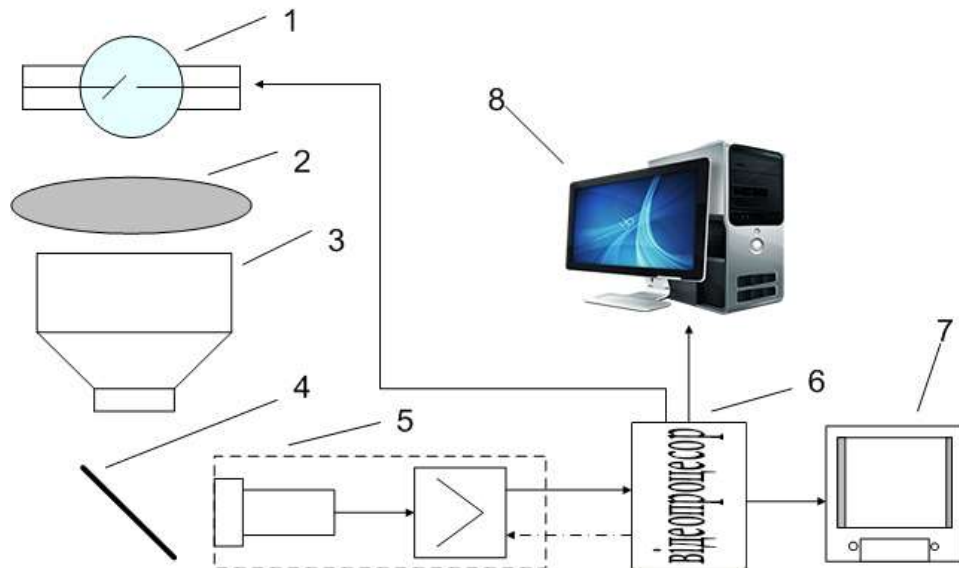


Рис.1.21. Схема рентгенотелевізійної дефектоскопічної установки  
1 – джерело рентгенівського випромінювання; 2 – досліджувані об'єкти;  
3 – рентгено-оптичний перетворювач; 4 – проекційне дзеркало; 5 – передавальна телевізійна камера; 6 – відеопроцесор; 7 – телевізійний монітор; 8 – комп'ютер.

Для підвищення продуктивності рентгенівського контролю якості виробів необхідно вирішити наступні задачі:

- синхронізація відеопроцесора з вхідним композитним, телевізійним сигналом рентгенотелевізійної установки;
- визначення та видалення рівня фону рентгенотелевізійного зображення;
- вписування амплітуди відеосигналу в динамічний діапазон АЦП;
- зручний для роботи оператора інтерфейс на екрані рідкокристалічного дисплея та клавіатури;
- визначення тривалості регульованої експозиції в процесі статистичної обробки рентгенотелевізійного зображення;
- реалізація проміжного зберігання цифрових рентгенограм в ПЗП;
- упорядковане зберігання результатів контролю якості виробів з можливістю передавання їх в обчислювальну систему через USB-інтерфейс;

- формування вихідного відео сигналу в форматі стандартного телевізійного композитного сигналу для відображення його на екрані стандартного телевізійного монітора.

Відеопроцесор працює в режимі реального часу, тому на нього накладаються жорсткі вимоги щодо швидкодії. Мікропрограмна частина пристрою призначена для управління АЦП і логічними матрицями, для обслуговування клавіатури управління і індикатора. Також мікропрограмна частина пристрою реалізує основні режими роботи пристрою шляхом аналізу спеціальних сигналів, що поступають з логічних матриць.

Обробка має виконуватись повністю в цифровій формі. Основні операції, які будуть виконуватись над сигналом – це складання багаторозрядних чисел, порівняння з константою, записаною в регістр, мультиплексування потоків. Частота дискретизації вхідного відеосигналу складає 15 МГц, що відповідає періоду в 66,66 нс. За цей час необхідно виконати такі операції: вирахувати з оперативної пам'яті двохбайтне число, скласти його з одержаним від АЦП 12 розрядним числом і одержану суму знову записати в оперативну пам'ять, до додаткових операцій відноситься порівняння суми з константою і фіксація результату порівняння. Таким чином до апаратної частини пред'являються дуже жорсткі вимоги по швидкодії. Для успішної реалізації пристрою швидкодія апаратної частини повинна складати не меншого 10-15 нс. Таку швидкодію можуть забезпечити мікросхеми програмованої логіки, які крім цього ще і мають логічні ресурси, достатні для реалізації роботи пристрою.

Другим важливим елементом пристрою, до якого пред'являються жорсткі вимоги по швидкодії, є оперативна пам'ять. Час доступу до даних в оперативній пам'яті не повинен перевищувати 10-15 нс. При більшому часі доступу необхідно буде або зменшувати частоту дискретизації, або роздільну здатність.

## Висновки

1. Рентгенографія з використанням плівки широко використовується у промислових умовах та надає переваги у вигляді високої чутливості контролю якості виробів та отримання рентгенограми контрольованого виробу. Проте, висока трудомісткість процесів пов'язаних з визначенням часу експозиції, обробкою плівкового матеріалу, та архівуванням рентгенограм вносять незручності в процес контролю виробів. Комп'ютерна рентгенографія вирішує проблеми архівування, але процес обробки рентгенограм за участю сканера накладає додаткові шуми на досліджуване зображення, а використання пластин хоч і є багаторазовим, проте найменший дефект на них унеможливає їх використання

2. Метод рентгеноскопії також використовують у промисловості, оскільки він дозволяє отримати зображення досліджуваного об'єкта в реальному часі, завдяки чому можна правильно розмістити досліджуваний об'єкт по відношенню до рентгенівської трубки. Проте, низька чутливість та відсутність отримання рентгенограми виробу також робить цей метод незручним у використанні. Основними джерелами шумів в сучасних РТС є шуми рентгенівського випромінювання, власні шуми видикона; шуми попереднього підсилювача; шуми аналого-цифрового перетворення. Найбільший внесок в загальний рівень шуму вносять шуми рентгенівського випромінювання і шуми попереднього підсилювача.

3. Реалізація відеопроцесора, на апаратному рівні, дасть можливість отримувати цифрові рентгенограми, що вирішує проблему архівування, а також дасть можливість отримати рентгенограму з чутливістю не гіршою ніж у плівкової рентгенографії. Процесор буде автоматично визначати час експозиції і максимально використовувати динамічний діапазон АЦП. Статистична обробка зображення дасть можливість отримати рентгенограми з чутливістю 2-3%.

## **2. АЛГОРИТМИ РОБОТИ ЦИФРОВОГО ВІДЕОПРОЦЕСОРА ДЛЯ ОБРОБКИ РЕНТГЕННОТЕЛЕВІЗІЙНОГО ЗОБРАЖЕННЯ**

### **2.1. Призначення і застосування пристрою**

Відеопроцесор призначений для підвищення чутливості неруйнівного рентгенотелевізійного контролю якості виробів шляхом фільтрації рентгєнівських шумів рентгенотелевізійного каналу. Для зручності пристрій повинен легко включатися до складу існуючих рентгенотелевізійних установок, забезпечуючи при цьому ряд технічних параметрів, тому до нього предявляються певні вимоги.

### **2.2. Вимоги, що пред'являються до пристрою**

#### **2.2.1. Задачі які реалізує спеціалізований відео процесор в складі рентгєноскопичного контролю якості виробів**

Оскільки пристрій призначений для застосування у складі промислових рентгенотелевізійних установок, то він повинен задовольняти таким загальним вимогам:

- реалізовувати статистичну обробки;
- автоматично визначати тривалість експозиції;
- адаптуватись під характеристики вхідного сигналу;
- легко вбудовуватися в існуючі рентгенотелевізійні установки;
- мати декілька режимів роботи;
- мати інтерфейс, адаптований для зручності роботи оператора;
- будуватись на новітній швидкодіючій елементній базі;
- бути надійним, щоб тривалий час працювати у важких промислових умовах при дії високих температур, вологості і вібраціях;
- мати малі габарити і вагу;
- споживати малу потужність від джерела живлення;
- бути нечутливим до промислових перешкод.



### 2.2.2. Параметри вхідного і вихідного сигналу

Більшість існуючих рентгенотелевізійних установок в якості приймача рентгенівського випромінювання мають РЕОП(рентгенівський електронно-оптичний перетворювач). До складу більшості рентгенотелевізійних систем входить монітор з телевізійним форматом розкладання, розрахований на амплітуду вхідного сигналу 0,7 - 1 В. тому пристрій, що розробляється, повинен сприймати стандартний композитний телевізійний вхідний сигнал з такими параметрами:

- амплітуда вхідного композитного відеосигналу – 0,7 - 1 В;
- амплітуда синхроімпульсів – 0,3 В;
- формат розкладання відеосигналу – телевізійний 50 Гц, 625 рядків при черезрядковій розгортці;
- вхідний опір пристрою – 75 Ом.

Відповідно, для того, щоб вихід пристрою можна було безпосередньо підключити до телевізійного монітора, параметри вихідного сигналу також повинні в відповідати стандартному телевізійному композитному сигналу. На навантаження 75 Ома пристрій повинен забезпечувати:

- амплітуду вихідного композитного відеосигналу – 1 В;
- амплітуда синхроімпульсів – 0,3 В;
- формат розкладання вихідного відеосигналу – телевізійний 50 Гц, 625 рядків при черезрядковій розгортці.

При задоволенні пристроєм перерахованих вище вимог він може бути легко вбудований до складу будь-якої рентгенотелевізійної установки, шляхом підключення виходу телевізійної камери до входу пристрою і підключення виходу пристрою до входу телевізійного монітора.

## 2.3 Функціонування блоку управління відеопроцесора

### 2.3.1. Загальний алгоритм роботи

Блок управління призначений для управління пристроєм, початковій ініціалізації АСП і ЦСП, обслуговування клавіатури і дисплея, реалізації ре-

жимів роботи пристрою. Загальний алгоритм функціонування блоку управління представлений на Рис.2.1.

Робота мікроконтроллера починається з ініціалізації всіх портів введення-виводу мікроконтроллера, яка полягає у виборі напрямку передачі даних для конкретної лінії введення-виводу, установки початкових рівнів на портах виводу інформації. Невикористані порти мікроконтроллера переводяться у високоімпедансний стан.

Налаштування ядра полягає в ініціалізації програмного стека, а налаштування системи полягає в установці режиму зниженого енергоспоживання в який переходитиме процесор за командою `sleep`.



Рис.2.1. Загальний алгоритм функціонування блоку управління пристрою

Ініціалізація периферії полягає в налаштуванні на режим переповнювання через 1 мс з генерацією переривань по переповнюванню і налаштуванні модуля SPI в режим майстра з 32-бітовою передачею від старшого біта до молодшого. У обробнику переривання по переповнюванню T/C0 знаходиться підпрограма перенесення даних з відеопам'яті мікроконтролера у відеопам'ять дисплея. Далі виконується ініціалізація дисплея, очищення його буфера відеопам'яті, установка типу курсора і його початкової позиції. Після цього виконується глобальне вмикання переривань і сканування клавіатури. Якщо немає натиснутих кнопок, то ядро переходить в сплячий режим вихід з якого здійснюється по перериванню від T/C0. Після обробки цього переривання здійснюється перехід на сканування клавіатури. За умовчанням пристрій знаходиться в стані “Робочий режим” і при натисненні кнопок може перейти в стан “Режим налаштування”, “Прямий канал”, “Накопичення 1”, “Накопичення 2”, “Накопичення 3”.

### 2.3.2. Алгоритм режиму налаштування

При переході в “Режим налаштування” пристрій працює відповідно до алгоритму на Рис. 3.2 Режим налаштування призначений для редагування всіх робочих параметрів пристрою. При переході в цей режим на дисплеї відображається відповідний напис і через деякий час з'являється меню вибору режиму для редагування. Редагувати можна параметри чотирьох робочих режимів: “Прямий канал”, “Накопичення 1”, “Накопичення 2”, “Накопичення 3”. Після вибору одного з режимів з'являється меню редагування параметрів. Існує чотири параметри для редагування. Вони відображаються на другому рядку дисплея зліва направо в такій послідовності: коефіцієнт підсилення відеопідсилювача АСП, рівень чорного, кількість точок з рівнем, що перевищив пороговий і власне пороговий рівень.

Редагування параметрів здійснюється порозрядно, тобто кожна з цифр може бути змінена індивідуально шляхом установки на неї курсора і інкремента з обнуленням досягши максимального значення. Після того, як всі па-

раметри будуть відредаговані, є можливість збереження змін в E2PROM мікроконтроллера. Після цього пристрій знову переходить на сканування клавіатури з подальшим сплячим режимом.

### 2.3.3. Алгоритм роботи в режимі прямого каналу

Для запуску одного з робочих режимів необхідно перевести пристрій робочий режим.

Робочий режим відповідає циклічній ділянці алгоритму, зображеного на Рис. 3.6. У робочому режимі пристрій не виконує ніяких дій, окрім як сканування клавіатури і переходу в один з робочих режимів або режим налаштування.

Як було сказано раніше, є чотири робочих режими: режим прямого каналу і три режими накопичення. Алгоритм функціонування пристрою в режимі 7 “Прямий канал” показаний на Рис.2.2. Спочатку робочі параметри для вибраного режиму читаються з E2PROM і зберігаються в оперативній пам'яті мікроконтроллера. Далі за допомогою інтерфейсу SPI проводиться ініціалізація АСП.



Рис.2.2. Алгоритму роботи блоку управління відеопроцесора в режимі налаштування

У нього пересилаються параметри для загального налаштування режиму роботи а також коефіцієнт підсилення відеопідсилювача і рівень чорного. Ініціалізація ЦСП полягає в занесенні в детектор кількості точок , що перевищили пороговий рівень і самого порогового рівня, скиданні виходу детектора, установці ознаки прямого каналу. Далі змінюються покази дисплея: відображаються робочий режим, початковий коефіцієнт підсилення. Після цього з початком нового кадру блок управління контролює детектор.

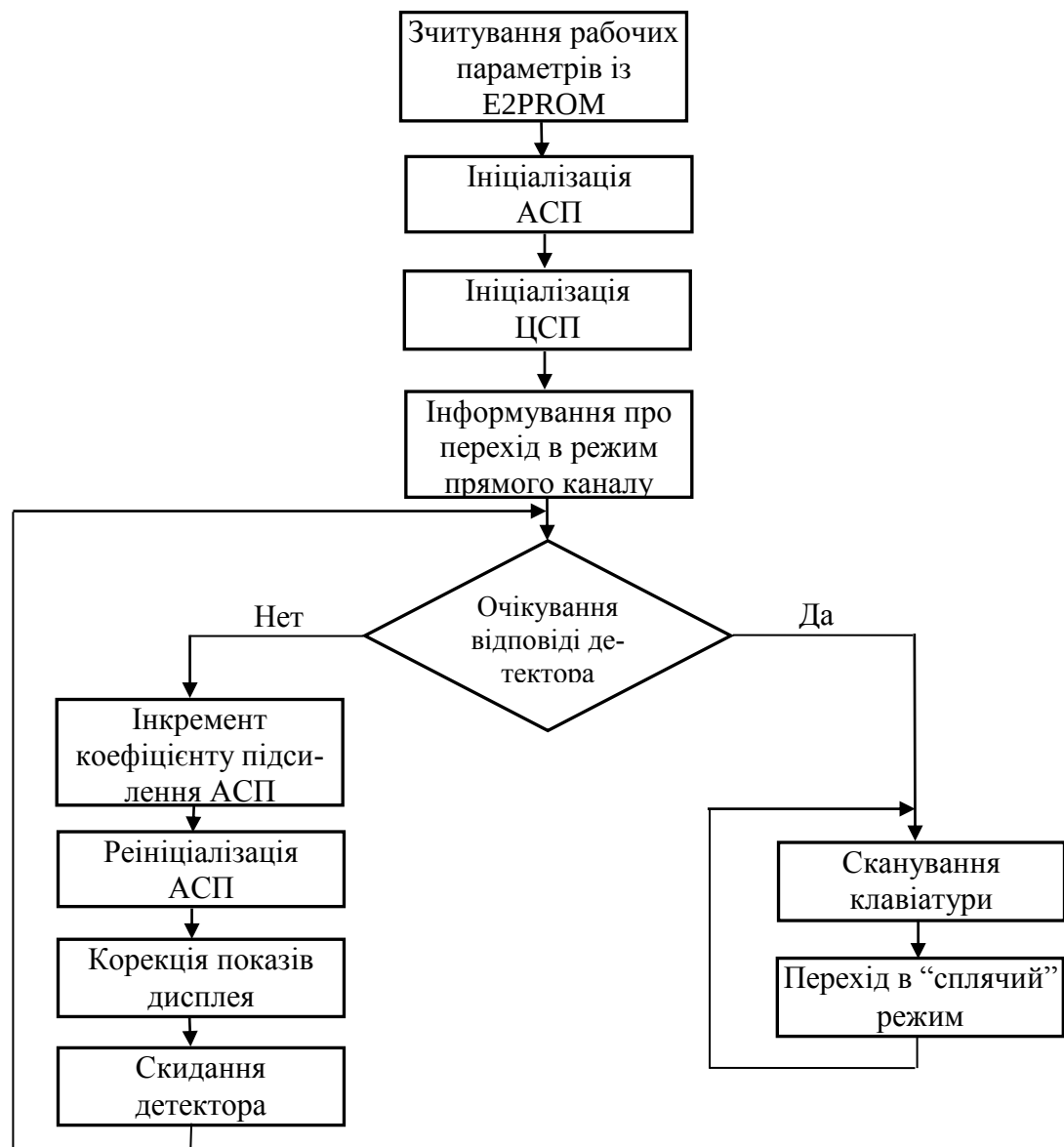


Рис.2.3. Алгоритм роботи блоку управління відеопроцесором в режимі прямого каналу

Якщо протягом кадру немає спрацьовування детектора, то коефіцієнт підсилення збільшується, проводиться реініціалізація АСП і міняється свідчення

значення коефіцієнта підсилення на дисплеї, проводиться скидання детектора. Цей процес повторюється до тих пір, поки не буде підібраний такий коефіцієнт підсилення, при якому відбудеться спрацювання детектора в межах кадру. Це говорить про те, що підібраний оптимальний коефіцієнт підсилення при якому динамічний діапазон АЦП використовується повністю. Після спрацювання детектора пристрій переходить на циклічну гілку сканування клавіатури. На цій ділянці алгоритму пристрій може перейти в будь-який з інших робочих режимів або в режим налаштування.

#### 2.3.4. Алгоритм роботи в режимі накопичення

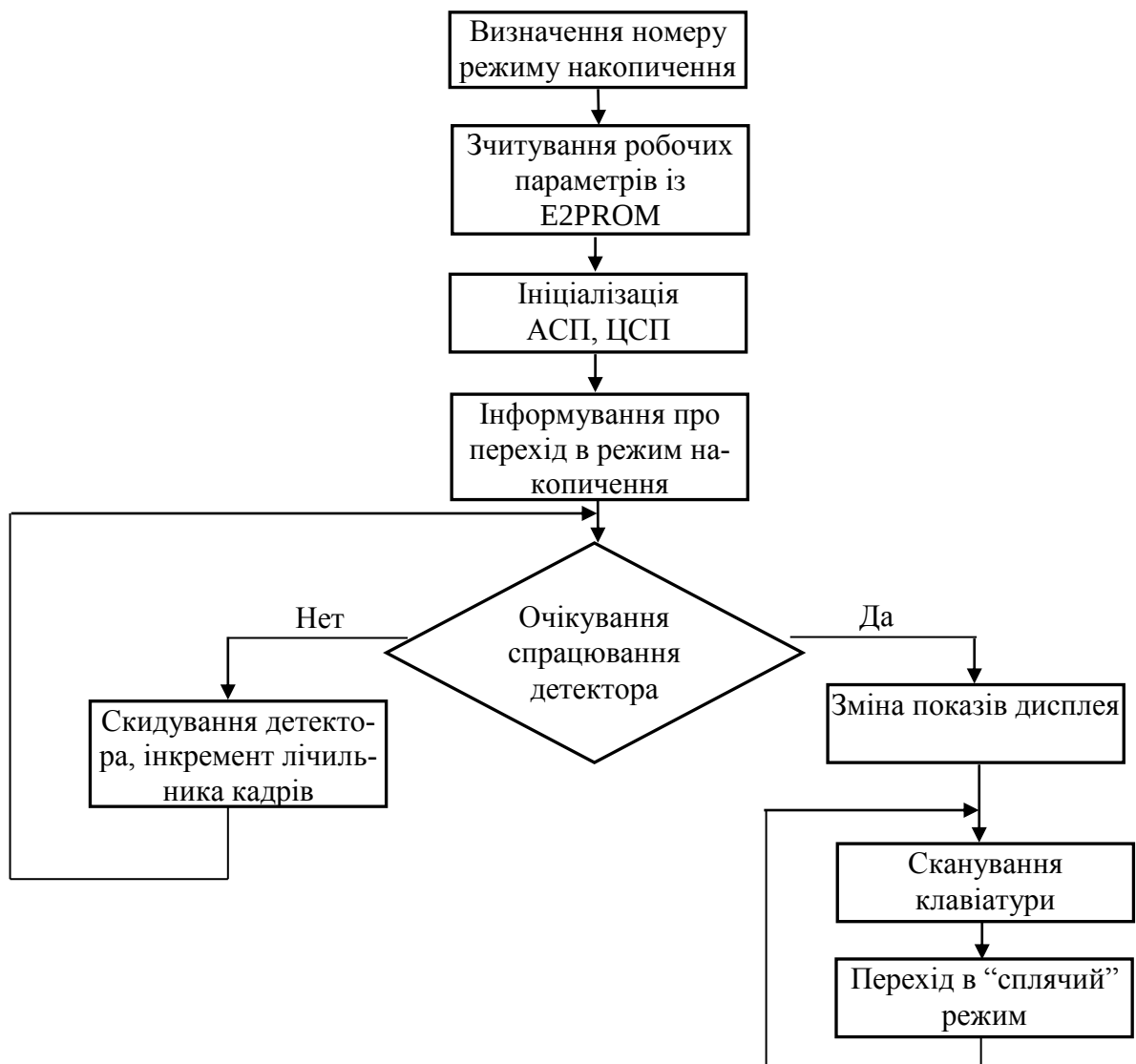


Рис. 2.4. Алгоритм роботи пристрою в режимі накопичення.

Алгоритм роботи блоку управління відеопроцесора в режимі накопичення показаний на рис. 2.4.

У пристрої передбачено три режими накопичення, які працюють по одному алгоритму, але відрізняються робочими параметрами. На початку сеансу накопичення визначається номер режиму накопичення – 1, 2 або 3. Відповідно до цього номера з E2PROM прочитуються відповідні робочі параметри. Далі проводиться ініціалізація АСП і ЦСП. Після цього проводиться зміна показів дисплея – відображається вибраний режим накопичення і запуск сеансу накопичення. В процесі накопичення на початку кожного кадра здійснюється контроль спрацювання детектора. Якщо детектор не спрацював, то проводиться його скидання і інкремент лічильника накопичених кадрів. Цей процес продовжується до тих пір, поки не спрацює детектор. Після цього на екрані дисплея відображається кількість накопичених кадрів і пристрій переходить в циклічний режим сканування клавіатури. З цієї частини алгоритму можливий перехід в будь-який робочий режим або режим налаштування.

## **2.4. Вибір мікроконтроллера**

Потреби до апаратури контролю якості постійно зростають. Одним з напрямків вирішення проблеми шумів є реалізація обробки статистичними методами – шляхом накопичення кількості кадрів, за рахунок цього флуктуаційні шуми інтегруються по полю сигналу, як наслідок отримуємо підвищення відношення сигналу до шуму, це призводить до поліпшення якості зображення і чутливості контролю якості.

Для реалізації алгоритму обробки в цифровому вигляді, необхідно перетворити аналоговий сигнал в цифровий, за допомогою АЦП. На даному етапі виникає проблема дискретизації зображення і як наслідок шум квантування. Для вирішення цієї проблеми слід правильно визначити час експозиції, на який впливає товщина і матеріал виробу. В результаті буде отримано нормований коефіцієнт почорніння зображення. Для досягнення необхідного результату потрібно вписати відеосигнал в динамічний діапазон АЦП.

Важливим в системах технічного зору є забезпечення зв'язку оператора з обчислювальною логікою (клавіатура, дисплей) запам'ятовування, передача і подальше архівування зображення. Все це можна реалізувати за допомогою відеопроцесора. Найбільш підходящим елементом керування у відеопроцесорному пристрої технічного зору є мікроконтроллер з каналами передачі даних SPI та  $I^2C$  і розвинутою периферією. Оскільки потік даних дуже великий, потрібна висока частота на якій мікроконтроллер буде керувати процесом.

$$t_1 = \frac{52\text{мкс}}{800 \text{ ел.рядка}} = 0,065\text{мкс} \quad (2.1)$$

$$t_2 = \frac{0,65\text{нс}}{4 \text{ операції}} = 0,16\text{нс} \quad (2.2)$$

$$F_{min} \frac{1}{0,16} = 61\text{МГц}, \quad (2.3)$$

де  $F_{min}$  – мінімальна частота,  $t_1$  – час на один елемент рядку,  $t_2$  – час на одну операцію за такт.

Отримуємо значення – 61МГц – мінімальна тактова частота роботи мікроконтроллера.

#### 2.4.1. Порівняння мікроконтроллерів конкуруючих фірм

Популярність STM мікроконтроллерів з кожним роком лише росте (див. рис. 3.1), і це є зрозумілим. STM32 має ряд переваг які просувають його вперед на фоні інших виробників мікроконтроллерів.

Розглянемо характеристики AVR і STM мікроконтроллерів (табл. 2.1):

| Параметри     | АТmega328 | STM32F405OG |
|---------------|-----------|-------------|
| Розрядність   | 8 бит     | 32 бита     |
| FLASH         | 32кб      | 1024кб      |
| SRAM          | 1кб       | 192кб       |
| EEPROM        | 512б      | 4кб         |
| Таймер16 біт  | 1 шт      | 12 шт       |
| Таймер 32 біт | -         | 2 шт        |



| ШИМ       | 3 канала         | 6 каналів         |
|-----------|------------------|-------------------|
| USART     | 1 шт             | 4 шт              |
| SPI       | 1 шт             | 3 шт              |
| I2C       | 1 шт (TWI)       | 2 шт              |
| АЦП       | 8 каналів 10 бит | 16 каналів 12 бит |
| Живлення  | 2,7 - 5,5мкА     | 2,4 - 3,6мкА      |
| Швидкість | 0 - 16МГц        | 0-168 МГц         |
| Вартість  | 6\$              | 5\$               |

Табл. 2.1. Порівняння характеристик AVR і STM

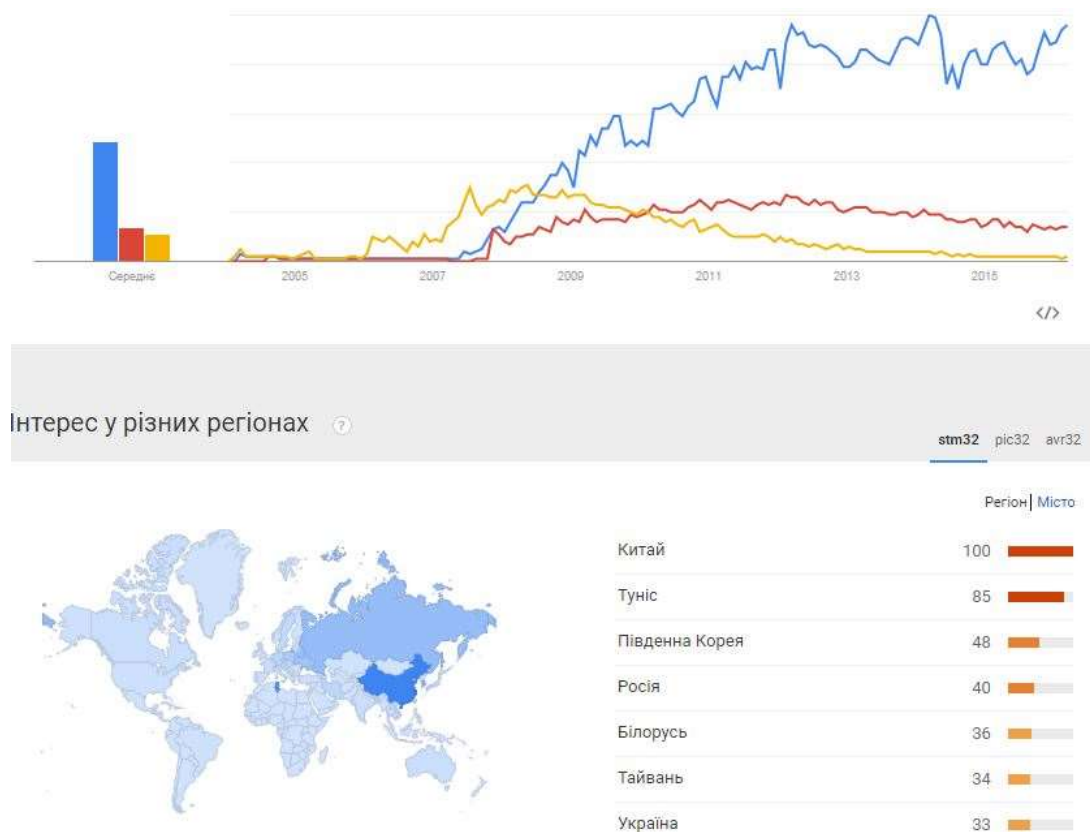


Рис.2.5. Показники популярності STM-32 в пошуковій системі Google

Як видно з таблиці, мікроконтроллер STM32 цікавіший і багатший ніж AVR. У арсеналі STM32 є DMA. AVR досить простий в програмуванні, проте STM32 має STM32Cube – програма яка генерує код для Keil uVision і бере на себе всю складність налаштування периферії. На борту STM32 є RTOS – real time operation system система має можливість самій робити все що потріб-

но, а користувачу залишається лише створювати потоки і писати код в них. Також STM32 завдяки інтерфейсу SDIO може працювати з картами пам'яті типу SD. І на завершення STM32 дешевше і споживає меншу кількість енергії.

STM32F4 - це мікроконтроллер побудований на ядрі ARM Cortex M4. Дане ядро має багато переваг, але його основна перевага на сьогоднішній день – робоча частота, яка досягає позначки в 216МГц [3].

STM пропонує широкий спектр продукції, який поєднує в собі дуже високу продуктивність, можливість роботи в режимі реального часу, здатність цифрової обробки сигналів і низьке енергоспоживання.



Рис.2.6. Сімейство 32-бітних мікроконтроллерів STM32

STMicroelectronics відрізняється від інших виробників напівпровідників прекрасним співвідношенням «ціна / функціонал» при збереженні найвищих стандартів якості. Сімейство STM32 - яскравий приклад цього. У цьому сімействі можна знайти дуже дешеві мікроконтроллери серії Value Line, які

досягають ціни нижче одного долара, при цьому мають хороший набір периферії [3].

Мікроконтроллер STM32F4, має вбудований DMA-контроллер, що дозволяє розвантажити ядро від обробки і передачі даних. Не можна не відзначити висококласної аналогової периферії. Наприклад, STM32F405OG має 12-бітний 24-канальний АЦП з часом вимірювання 0.5мкс. Даний АЦП має багато переваг: можливість налаштування пакетних вимірювань (порядок вимірювання каналів), можливість змінювати тривалість вимірювання по кожному каналу, можливість працювати в режимі аналогового сторожа (дві програмовані порогові напруги), вбудований датчик температури, зовнішній тригер. Крім перерахованого, в мікроконтроллерах сімейства STM32, які мають кілька АЦП, можна збільшити швидкість перетворення в кілька разів за допомогою спільної роботи декількох АЦП.

Сімейство STM32 відрізняється і чудовим вбудованим CAN 2.0 контроллером, а це означає, що всі вузли CAN-мережі мають можливість передавати дані і декілька вузлів одночасно можуть давати запит на шину.

У лінійках STM32F4 є корисна периферія FSMC і SDIO. FSMC - інтерфейс для використання зовнішньої пам'яті типу SRAM, NOR Flash, NAND Flash. SDIO - інтерфейс для роботи з картками пам'яті типу SD, mini SD, micro SD, MMC.(що може бути корисним для архівування рентгенограм).

Лінійки STM32F4 з пам'яттю більше ніж 512 Кбайт мають вбудований модуль захисту пам'яті MPU, який дозволяє додатково підвищити безпеку системи. MPU дозволяє розділити пам'ять на сегменти, встановити для них різні рівні доступу. Це дозволяє заблокувати для програмного коду доступ до окремих зон пам'яті і встановити повноцінні привілейовані і непривілейовані режими. Також MPU генерує переривання в разі, якщо програма спробувала отримати доступ до захищених зон пам'яті.

Сімейство STM32 відрізняється від конкурентів стабільною, високою частотою роботи в температурному діапазоні від -40 до 105 ° С. Продуктивність ядра і периферії зберігається повністю. Одна з найсильніших сторін

ядра Cortex-M4 - його висока продуктивність, яка є результатом всього накопиченого досвіду компанії ARM в області розробки процесорних ядер. Наприклад, ядро Cortex-M4 має окрему шину для даних, окрему шину для інструкцій і окрему шину для управління периферією (архітектура типу Гарварда). Це позбавляє від затримок, які можуть виникнути з архітектурою Фон - Неймана, де весь потік інформації до ядра йде через одну шину, це дозволяє мати теоретичну продуктивність 2,15 DMIPS / МГц.

Переваги лінійки STM32F4 також виражаються в режимах STOP і Standby, де енергоспоживання падає до 420 мкА і 1,7мкА відповідно. Режим STOP - це режим, в якому всі джерела тактування зупинені, але вміст RAM-пам'яті зберігається, і перехід в активний режим вимагає всього декількох мікросекунд. У режимі Standby все відключено повністю, крім годинника реального часу. Пробудження з цього режиму вже вимагає декількох десятків мікросекунд.

Система управління відеопроцесором виконана на - 32-розрядному RISC-мікроконтроллер фірми STMicroelectronics STM32F405OG. Це сімейство мікроконтроллерів має швидкодію 210MIPS, широко розвинену периферію (3таймери-лічильники, ШІМ, інтерфейси I2C і SPI, UART, USART, CAN, SDIO, USB, JTAG). Зокрема вибраний мікроконтроллер крім стандартної периферії має 1024 кбайт пам'яті програм (FLASH), 192 Кбайт оперативної пам'яті (SRAM), 4 Кбайт високошвидкісної пам'яті даних (E2PROM).

#### **2.4.2. Характеристики мікроконтроллера STM32F405OG**

Головними характеристика мікроконтроллера STM-32F405OG є:

- FLASH-пам'ять програм об'ємом 1024 Кбайт (число циклів стирання/запису не меншого 10000);
- оперативна пам'ять (статичне ОЗУ) об'ємом 192 Кбайт;
- пам'ять даних на основі ЕСППЗП (E2PROM) об'ємом до 4 Кбайт (число циклів стирання/запису не меншого 300000);

- можливість захисту від зчитування і зміни пам'яті програм і даних;
- можливість програмування безпосередньо в системі через послідовні інтерфейси SPI і JTAG;
- можливість внутрішньосхемної відладки за допомогою інтерфейсу JTAG;
- Ядро сімейства STM-32 має свої особливості:
  - гарвардська архітектура (окремі шини для даних, інструкцій і периферії);
  - налаштування мікроконтролера в режимі реального часу;
  - АЛУ підключене безпосередньо до регістрів загального призначення;
  - апаратне перемноження 32 біт на 32 біта виконується за один цикл частоти тактування;
  - вбудований контролер переривань, який дозволяє становити до 256 пріоритетів між перериваннями ;
  - підтримка набору інструкцій thumb-2;
  - оптимізовано використання пам'яті (біт з одного розділу пам'яті зв'язується з словом в іншому);
  - низьке енергоспоживання.

### **2.4.3. Інструментальні засоби розробки і відладки програмного забезпечення**

Основне середовище розробки і відладки програмного забезпечення для мікроконтролерів сімейства STM-32 є Keil uVision. Це програмний продукт поширюваний фірмою ARM. Для зручності, розробника не відволікають другорядні функції , що сильно розвантажує інтерфейс і робить використання інтуїтивно зрозумілим. Однак при зростанні складності реалізованих завдань, завжди можна задіяти весь потенціал модулів, що функціонують під управлінням єдиної оболонки. Серед основних програмних засобів Keil uVision можна відзначити:

- базу даних мікроконтролерів, що містить докладну інформацію про всі підтримувані пристрої. Тут зберігаються їх конфігураційні дані і посилання на джерела інформації з додатковими технічними описами;
- менеджер проектів, який потрібен для об'єднання окремих текстів програмних модулів і файлів в групи;
- вбудований редактор, який полегшує роботу з вихідним текстом за рахунок використання багатовіконного інтерфейсу, виділення синтаксичних елементів шрифтом і кольором;
- відладчик - симулятор, який налаштовує роботу компільованої програми на віртуальній моделі мікроконтроллера.

Створення нового проекту в Keil uVision полягає в наступному. За допомогою директиви Project/New uVision Project створюється тека з місцем де розміщується проект, йому присвоюється назва. Далі обирається тип мікроконтроллера. У лівій частині екрану відображається вікно Project . Там відображаються всі файли проекту . При створенні нового файлу File/New. Після цього з'являється вікно текстового редактора в якому алгоритми роботи пристрою реалізуються на мові C++. Підтримуються такі основні типи команд:

- команди логічних операцій;
- команди арифметичних операцій і команди зрушення;
- команди операцій з бітами;
- команди пересилки даних;
- команди передачі управління;
- команди управління системою.

В результаті трансляції текстового файлу в об'єктний код створюється файл у форматі Intel HEX з розширенням hex Вбудований відладчик Keil uVision дозволяє завантажити hex-файл для відладки програми. При виявленні помилок функціонування програми є можливість усунути їх, перекомпілювати програму і заново завантажити її для відладки. Наявність вбудованого відладчика дозволяє створити працездатну програму з мінімальними витратами часу

і без необхідності безпосереднього завантаження її в пам'ять програм мікроконтроллера.

## **Висновки**

1. Відеопроцесор рентгенівського тіньового зображення призначений для використання у складі рентгенотелевізійної апаратури, тому він повинен бути сумісним з нею по вхідних і вихідних характеристиках, забезпечувати високу роздільну здатність, володіти достатньою швидкістю для обробки зображення в реальному масштабі часу, працювати в різних режимах роботи.

2. Оскільки елементна база на сьогодні є багатофункціональною, то для її управління є доцільним використовувати мікроконтроллер. Виходячи з розрахунків і вимог до системи керування пристроєм було обрано мікроконтроллер STM32F405OG, який дає можливість автоматично обирати час експозиції, зупиняти накопичення при досягненні нормованого рівня почорніння, а також автоматично вписувати амплітуду відеосигналу в динамічний діапазон АЦП.

3. Наявність у мікроконтроллера відповідної периферії (інтерфейсів зв'язку SPI, I2C, SDIO), а також швидкодії 168 МГц дає можливість реалізувати зручний для оператора інтерфейс керування, зберігати рентгенівське зображення на переносній ПЗП у вигляді SD-card, а також дати можливість перенесення досліджуваних рентгенограм у комп'ютер по USB –інтерфейсу.

### **3. СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ ВІДЕОПРОЦЕСОР ДЛЯ ПРОМИС- ЛОВОЇ РАДІАЦІЙНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ**

#### **3.1. Структурна схема відеопроцесора**

На рис.2.1 представлена структурна схема відеопроцесора, яка включає селектор синхроімпульсів, аналоговий сигнальний процесор, цифровий сигнальний процесор на програмованій логіці, цифро-аналоговий перетворювач, формувач вихідного телевізійного сигналу і систему управління, в основі якої лежить мікроконтроллер. Система управління реалізує основні режими роботи пристрою, а також вирішує задачі, пов'язані з нормуванням вхідного телевізійного сигналу і визначенням оптимальної тривалості накопичення. Вхідний композитний телевізійний відеосигнал поступає на вхід селектора, який виділяє з нього кадрові (KCI) і рядкові (PCI) синхроімпульси. Виділені з вхідного сигналу синхроімпульси використовуються для синхронізації роботи синхрогенератора, що формує всі необхідні для роботи пристрою синхронізуючі сигнали.

Мікроконтроллер з'єднаний з АСП через послідовний інтерфейс SPI, і керує коефіцієнтом підсилення, рівнем сигналу на вході АЦП через регістри управління. Ресурси АЦП дають можливість вирішити задачу оптимального узгодження рівня вхідного сигналу з динамічним діапазоном 12-ти розрядного АЦП.

Контроллер визначає параметри відеосигналу, що поступає на вхід цифрового сигнального процесора, порівнює їх з граничними значеннями динамічного діапазону АЦП, визначає необхідне значення коефіцієнта підсилення і рівня чорного сигналу і завантажує ці параметри через послідовний цифровий інтерфейс в керуючі регістри АСП. При цьому вхідний відеосигнал автоматично вписується в динамічний діапазон АЦП, що і забезпечує його оптимальне перетворення в цифрову форму.



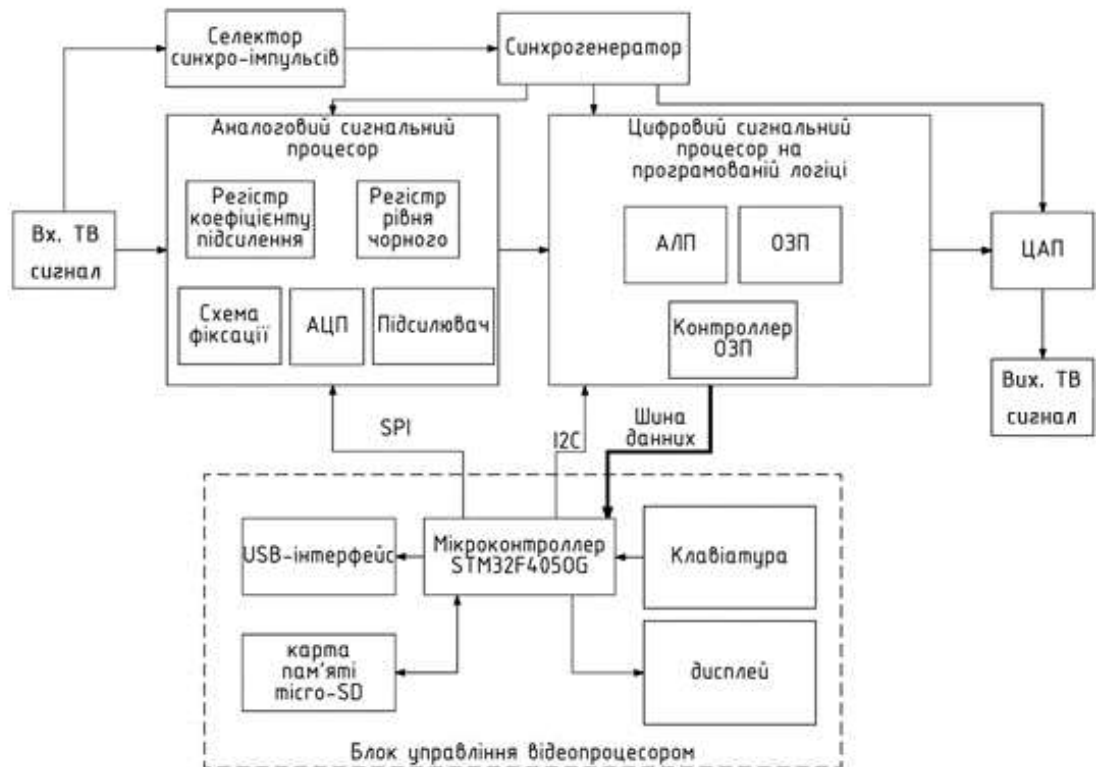


Рис. 3.1. Структурна схема спеціалізованого відеопроцесора

Цифровий сигнальний процесор включає арифметичний логічний пристрій, контроллер ОЗП. АЛП і контроллер ОЗП виконані на основі програмованих логічних матриць, що забезпечило можливість реалізації алгоритму цифрової обробки телевізійного відеосигналу у реальному часі. Алгоритм інтеграції рентгенотелевізійного зображення здійснюється шляхом накопичення кадрів рентгенотелевізійного зображення в ОЗП. Процес накопичення контролюється системою управління на основі мікроконтроллера. Досягши певного рівня накопиченого в ОЗП відео сигналу мікроконтроллер автоматично зупиняє процес інтегрування і переводить контроллер ОЗП в режим читання. При цьому на екрані дисплея відображається кількість накопичених кадрів в процесі інтегрування рентгенотелевізійного зображення.

У режимі читання відеодані з ОЗП поступають через мультиплексом даних на 10-ти розрядний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Формувач заміщує у відеосигнал гасильні і синхронізуючі імпульси, формуючи, таким чином, вихідний композитний телевізійний відеосигнал обробленого рентге-

нотелевізійного зображення. Оброблене рентгенотелевізійне зображення зберігається в ОЗП до початку наступного циклу інтегрування, який ініціалізується натисненням відповідної клавіші управління на передній панелі пристрою.

### 3.2. Блок управління та індикації

Структурна схема блоку управління і індикації представлена на Рис. 3.2. Він призначений для управління пристроєм, початкової ініціалізації АЦП і детектора, обслуговування клавіатури і дисплея, реалізації різних режимів роботи пристрою. Основою блоку управління є мікроконтроллер фірми STMicroelectronics STM32F405OG. Мікроконтроллер працює від вбудованого тактового генератора на основі високостабільного RC-ланцюга. Це забезпечує йому продуктивність 0.8 MIPS при напрузі живлення 3,3 В або 1 MIPS при напрузі живлення 5 В.

За допомогою клавіатури, мікропроцесор може переводити пристрій в робочий режим або режим налаштування. Коли пристрій знаходиться в робочому режимі, стан виходу mode визначає тип робочого режиму. Коли на цьому виводі логічний нуль пристрій знаходиться в робочому режимі прямого каналу, коли логічна одиниця – в режимі інтегрування флуктуаційних шумів рентгенотелевізійного каналу (режим накопичення кадрів рентенотелевізійного зображення). Для управління цифровим сигнальним процесором генеруються сигнали: reset – для скидання режиму роботи пристрою, data\_det та clk\_det – для початкової ініціалізації детектора, inv – для інверсії вихідного сигналу. Управління АСП здійснюється за допомогою таких сигналів: FIX – імпульс фіксації рівня чорного, SS - вивід SPI, SCK – тактовий сигнал інтерфейсу SPI, MOSI – вивід даних від мікроконтроллера до АСП. Для більшої інформативності в якості дисплею було обрано дворядковий 32-символьний знаковисинтезуючий дисплей фірми HITACHI HD44780. Для управління дисплеєм використовується інтерфейс, що складається з чотирьох інформаційних (DB7-DB4) виводів, а також два керуючих вивода: вивід значення передачі команди/даних A0 і строб запису E.

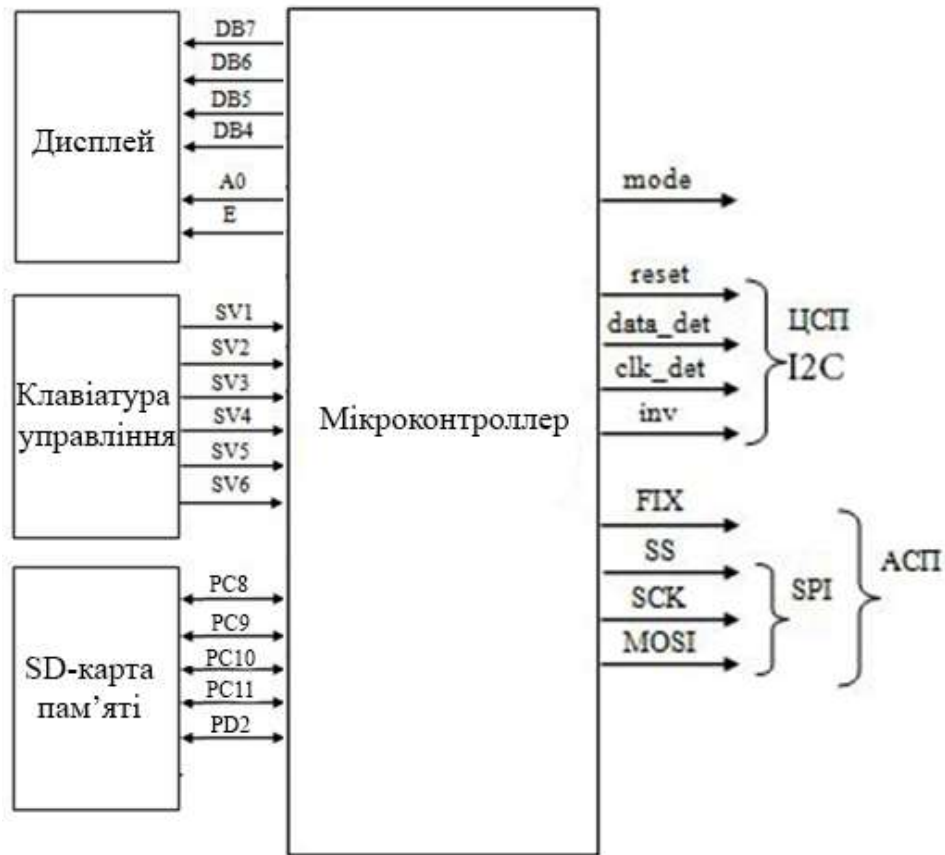


Рис. 3.2. функціональна схема блоку управління і індикації

У режимі прямого каналу пристрій автоматично визначає оптимальний коефіцієнт підсилення відеопідсилювача АСП для повного використання динамічного діапазону АЦП. При цьому на екрані дисплея відображається назва робочого режиму і вибраний коефіцієнт підсилення. У режимі накопичення мікроконтроллер проводить початкову підготовку пристрою до накопичення, ініціалізувавши сеанс накопичення, веде підрахунок кількості кадрів і стежить за рівнем вихідного сигналу. Досягши заданого рівня вихідного сигналу, мікроконтроллер зупиняє накопичення і переводить відеопроцесор в режим відображення накопиченого зображення. При цьому на екрані дисплея відображається номер режиму накопичення (3 можливих режима накопичення з різними параметрами) і кількість накопичених кадрів.

Режим налаштування призначений для редагування і збереження робочих параметрів пристрою. Пристрій має 4 робочих параметра, 2 з яких відносяться до АСП, а 2 до ЦСП. Робочими параметрами АСП є коефіцієнт підсилення відеопідсилювача і рівень чорного. Коефіцієнт підсилення відеопідсилювача для режимів накопичення є постійним і в процесі накопичення не міняється. У режимі прямого каналу ця величина є стартовою для алгоритму визначення оптимального коефіцієнта підсилення і може міняється у бік збільшення. Рівень чорного залишається постійним для всіх режимів роботи. Робочими параметрами для ЦСП є кількість точок і пороговий рівень (обидва параметри відносяться до дисплея). Перший параметр визначає мінімальну кількість точок із заданим рівнем, другий параметр - власне заданий рівень. У режимі прямого каналу ці параметри використовуються для визначення оптимального коефіцієнта підсилення, а в режимі накопичення – для визначення моменту часу коли необхідно завершити процес накопичення.

### **3.3. Розробка схеми електричної принципової відеопроцесора для обробки рентгенотелевізійного зображення**

Розробка електричної принципової схеми відеопроцесора для обробки рентгенотелевізійного зображення проводилась в програмному середовищі Altium designer. Перелік елементів наведений в додатку 2.

Altium Designer являє собою систему наскрізного автоматизованого проектування електронних засобів на базі друкованих плат і програмованих логічних інтегральних схем (ПЛИС). Принцип наскрізного проектування має на увазі передачу результатів одного етапу проектування на наступний етап в єдиній проектній середовищі. При цьому зміни, що вносяться на будь-якому етапі, відображаються у всіх частинах проекту. Такий принцип дозволяє розробнику контролювати цілісність проекту, відслідковувати зміни і синхронізувати їх.

Мікропроцесорна система керування представлена мікросхемою STM32F405OG (DD6). Мікросхема LM809 (DD4) є схемою скидування мік-

роконтроллера. Контроллером USB є мікросхема CP2102 (DD7). Роз'єм L-KLS1-SD101(XS5) призначений для використання SD-карти пам'яті. Дисплей hd44780(HL1) та клавіатура у вигляді кнопок (SV1-SV9) використані для виводу і вводу інформації.

Цифровий сигнальний процесор представлений мікросхемою EP4CE6E22C8N (DD5). Це ПЛІС MAX V 5M1270Z, в якій за допомогою мови програмування VHDL реалізовано АЛП, контроллер ОЗП, мультиплексор вихідних даних, подільники частоти, ТВ-синхронізатори та ін. Аналоговий сигнальний процесор представляє собою мікросхему AD9821 (DA3). Оперативна пам'ять (ОЗП) представлена мікросхемами K6R4008V1D-44 (4 шт - DD1, DD3, DD9, DD10), що має об'єм 512к і розрядність 8 біт, час доступу 10 нс. Селектором відео імпульсів є мікросхема LM1881N (DA5). Синхрогенератором є кварцевий генератор з частотою 120 МГц (ZQ1).

Конденсатори C5-C9, C11, C13, C16, C18-C20, C22-C25, C31- C43, C45-C82 та індуктивності L1, L3, L5, L6, L8, L9, L10 являють собою фільтри по живленню, які призначені для фільтрації комутаційних завад. Індуктивності L2, L4, L7, L11, L12 є сигнальними фільтрами.

Мікроконтроллер пов'язаний з ЦСП за допомогою інтерфейсу I2C та з АСП за допомогою інтерфейсу SPI по виводам 59(PB7), 61(PB8), 62(PB9), 2(PC14), 3(PC15), 4(PC15), 6(PH1), 8(PC0), 9(PC1), 10(PC2), 11(PC3), 14(PA0), 29, 33() Підключення здійснюється через ПЛІС, яка виступає у якості транзити. Клавіатура підключається по виводам 21(PA5), 22(PA6), 23(PA7), 24(PC4), 27(PB1), 28(PB2), 30(PB11), 34(PB13), 35(PB14). Дисплей підключається по інтерфейсу SPI 25, 26, 15, 16, 17, 20. Виводи 39(PC8) та 40(PC9) призначені для підключення до реле яке буде вмикати і вимикати рентгенівський апарат. По виводам 36(PB15), 37(PC6), 53(PC12), 52(PC11), 51(PC10), 50(PA15) мікроконтроллер керує записом інформації в SD-card. По виводам 42(PA9), 43(PA10) мікроконтроллер підключається до мікросхеми CP2101, яка відповідає за USB інтерфейс. Програмування мікроконтроллера відбува-

ється через налаштувальну плату STM32 discovery яка під'єднується по виводам 46(PA13),49(PA14) за допомогою джамперів.

### **3.4. Зв'язок мікроконтролера з елементами відеопроцесора**

#### **3.4.1. Клавіатура і дисплей**

Для керування і налаштування оператором відеопроцесора в ньому використовуються клавіатура та дисплей. Управління відеопроцесором здійснюється за допомогою восьми клавіш. Кожна клавіша може виконувати ряд основних і вторинних функцій, дисплей відображає функції, параметри та режими роботи відеопроцесора, та супроводжує натискання клавіш зміною інформації на екрані.

Відеопроцесор може працювати в 4 головних режимах. За допомогою клавіатури оператор може задати режим роботи відеопроцесора (клавіша «mode»).

В режимі «Робочий режим» відеопроцесор реалізує чотири підрежиму обробки рентгенотелевізійного зображення. Перший підрежим називається «TV» або «Прямий канал». Він призначений для перегляду динамічних фрагментів рентгенотелевізійного зображення, а також використовується при позиціонуванні контрольованого виробу щодо детектора рентгенівського випромінювання. Підрежим прямого каналу вмикається за допомогою клавіші «TV» і після цього картинка передається на екран телевізора.

Підрежими «VP1», «VP2» і «VP3» функціонують однаково і відрізняються один від одного тільки величинами робочих параметрів. Запуск цих підрежимів здійснюється шляхом натискання клавіш «VP1», «VP2» і «VP3» відповідно.

Для збереження зображення необхідно натиснути клавішу «←», після чого можна буде обрати номер сесії куди потрібно зберегти зображення і дати сесії в форматі дд/мм/рр. Переміщаючи миготливий курсор за допомогою клавіш «←» і «→» можна обрати один з параметрів сесії для його редагування. Редагування параметрів сесії здійснюється за допомогою клавіш «100»,

«10» і «1», які дозволяють виконувати інкремент сотень, десятків і одиниць параметра. Для завершення установки сесії необхідно натиснути клавішу «S», при цьому зображення буде збережено в сесію зі встановленими користувачем параметрами. Відмовитися від установки сесії можливо шляхом натискання клавіші «Mode». При цьому з'явиться повідомлення, що сесія не встановлена, знімок не буде збережено і відеопроцесор перейде в останній використаний в програмі підрежим робочого режиму.

Режим «Режим налаштування» призначений для редагування параметрів підрежимів робочого режиму. Перехід відеопроцесора в режим «Режим налаштування» здійснюється за допомогою клавіші «Mode», містить 4 підрежими редагування параметрів. Вибір одного з підрежимів редагування здійснюється за допомогою клавіш «TV», «VP1», «VP2» і «VP3». Повернення в «Режим налаштування» з підрежимів редагування параметрів здійснюється за допомогою клавіші «Mode». Для кожного з підрежимів робочого режиму існує 3 робочих параметра: посилення, рівень, щільність. Вибір параметра для редагування здійснюється за допомогою клавіш «←» і «→». Редагування параметрів здійснюється за допомогою клавіш «100», «10» і «1», які дозволяють виконувати інкремент сотень, десятків і одиниць параметра. Збереження змін здійснюється за допомогою клавіші «S».

Перехід в режим роботи відеопроцесора «Робота з SD-карткою пам'яті» здійснюється допомогою клавіші «Mode».

Підрежим «Видалення зображення» дозволяє видалити довільне зображення з сесії. Вибір підрежиму здійснюється за допомогою клавіші «Inv». Вихід з підрежиму здійснюється за допомогою клавіші «Mode».

Підрежим «Видалення сесії» дозволяє видалити всі зображення з сесії. Вибір підрежиму здійснюється за допомогою клавіші «←». Вихід з підрежиму здійснюється за допомогою клавіші «Mode».

Підрежим «Очищення пам'яті» дозволяє видалити всі зображення з усіх сесій, очистивши таким чином всю пам'ять. Вибір підрежиму здійснюється за допомогою клавіші «→». Для виконання очищення пам'яті необхідно натис-

нути клавішу «S». Для відмови від очищення пам'яті і виходу з підрежиму необхідно натиснути клавішу «Mode».

Підрежим «Завантаження зображення» дозволяє завантажити в оперативну пам'ять відеопроцесора і вивести на телевізійний монітор довільне зображення з сесії. Вибір підрежиму здійснюється за допомогою клавіші «S». Вихід з підрежиму здійснюється за допомогою клавіші «Mode».

Підрежим «Налаштування сесії» дозволяє вручну налаштувати параметри сесії перед збереженням обробленого зображення на SD-картку. Вибір підрежиму здійснюється за допомогою кнопки «100».

Підключення клавіатури 2x4 до виводів мікроконтролера STM-32 аналогічно по підключенню клавіатури для AVR.

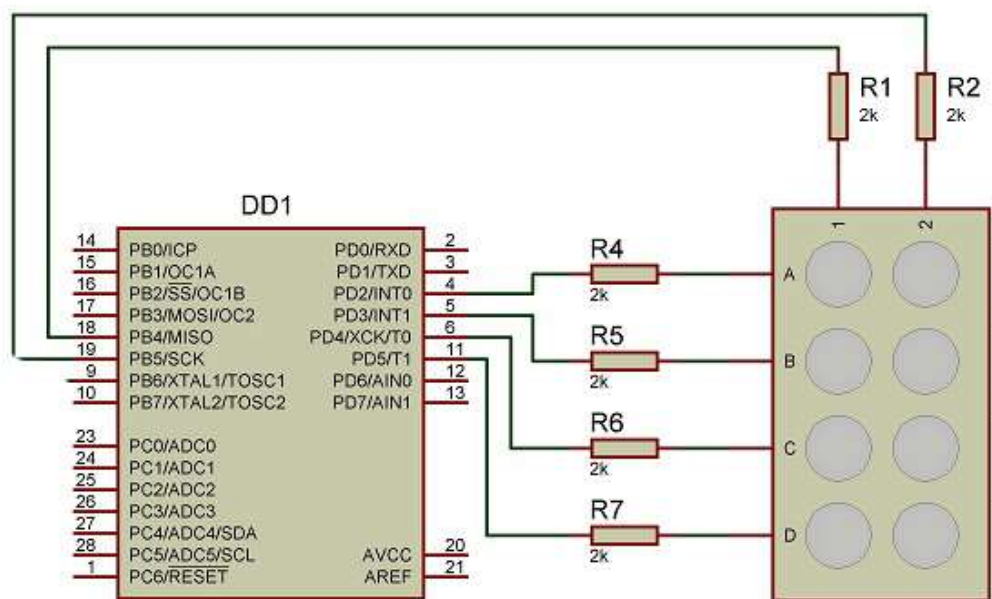


Рис.3.3. Підключення клавіатури 2x4 до виводів мікроконтролера

Бібліотека оформлена у вигляді одного файлу `keyboard.h`. і дозволяє підключити рядки і стовпці клавіатури як до одного так і до різних портів мікроконтролера, головна умова - щоб підключені вони були до суміжних виводів кожного порту (наприклад: рядки клавіатури підключені до виводів 2 ... 5 порту GPIOD, а стовпці - до виводів 4 ... 6 порту GPIOB).



Бібліотека розрахована на те, що виводи мікроконтроллера, підключені до рядків клавіатури, будуть налаштовані на вихід, а виводи мікроконтроллера, підключені до стовпців клавіатури, будуть налаштовані на вхід.

На початку бібліотеки необхідно вибрати тип клавіатури (2x4, 3x4 або 4x4), тип мікроконтроллера (Cortex-M0, Cortex-M3 або Cortex-M4). Частоту роботи портів клавіатури встановити мінімальну в 2 МГц. Головне, щоб частота опитування клавіатури (викликом функції KeypadScan () в функції-обробнику переривання будь-якого обраного вами таймера) була нижче швидкості роботи цих портів.

### Функції клавіатури:

- void KeypadInit(void) – ініціалізація клавіатури;
- char KeypadCheck(void) – перевірка натискання хоча б однієї клавіші;
- char KeypadRead(void) – отримання коду натиснутої клавіші. Запускати функцію в основному циклі ;
- void KeypadScan(void) – функція сканування клавіатури (запускається в перериванні таймера). Функція працює в перериванні таймера.

Мікроконтроллеру доводиться повідомляти користувачеві дані, і далеко не завжди можна обійтися одними лише цифрами. Для відображення текстової інформації як правило застосовують LCD дисплеї.

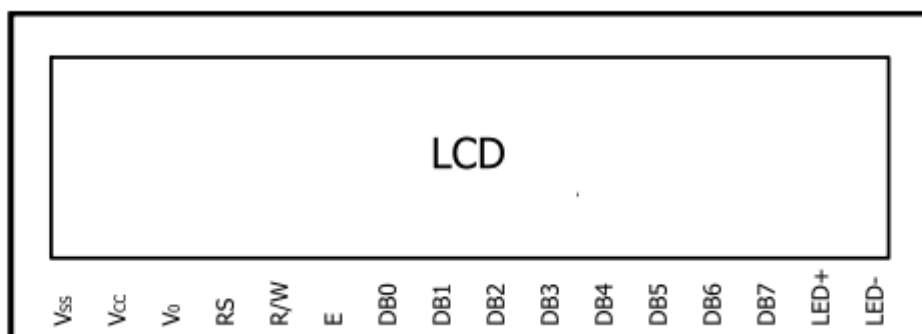


Рис.3.4. Виводи LCD дисплея hd44780

DB0 ... DB7 - виводи через які контроллер отримує / передає дані і команди.

E - строб. Коли на всіх лініях даних встановлені потрібні логічні рівні, необхідно короткочасно подати на нього логічну одиницю, а потім знову нуль. Тільки після цього дисплей зчитає дані (або команду) з ніжок DB0 ... DB7.

RW - стан цього виводу повідомляє дисплею, що ми хочемо з ним робити: 1 - читати з дисплея, 0 писати в дисплей.

RS - керуючи станом цього виводу дисплею повідомляється що хочемо йому передати: Якщо нуль то команда, якщо одиниця то дані.

V0 - вивід управління контрастністю дисплея. зазвичай сюди підключають змінний резистор (як дільник напруги) і обертаючи його налаштовують необхідну контрастність. Якщо його не підключити, то зображення (в 99%) не з'явиться взагалі.

VSS - земля.

VCC - напруга живлення, зазвичай 5 вольт.

A - анод світлодіодного підсвічування.

K - катод світлодіодного підсвічування.

Іноді підсвічування вже має струмообмежуючий резистор, і можна підключати ці два виводи безпосередньо до живлення.

Як видно з таблиці 3.1, деякі біти в командах можуть змінюватися користувачем.

I / D - інкремент / декремент адреси DDRAM. 1 - інкремент (збільшення), 0 - декремент (зменшення). Якщо біт встановлено, то лічильник адреси буде збільшуватися на одиницю щоразу коли ми записуємо символ в дисплей. За рахунок цього для виведення будь-якого слова нам не потрібно самотійно задавати позицію для виведення кожного символу, кожен новий символ буде виводиться в наступну по порядку позицію. А якщо біт скинутий, то лічильник адреси буде не збільшуватися на 1 а навпаки зменшуватися.

| DB7 | DB6        | DB5        | DB4        | DB3        | DB2        | DB1        | DB0        | Описание команды                                     |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------------------------------------------|
| 0   | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 1          | Очистить дисплей, курсор домой                       |
| 0   | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 1          | 0          | Курсор домой                                         |
| 0   | 0          | 0          | 0          | 0          | 1          | <b>I/D</b> | <b>SH</b>  | Настройка сдвига экрана/ курсора                     |
| 0   | 0          | 0          | 0          | 1          | <b>D</b>   | <b>CUR</b> | <b>BLN</b> | Вкл/выкл экран и курсор                              |
| 0   | 0          | 0          | 1          | <b>S/C</b> | <b>R/L</b> | X          | X          | Разрешает сдвиг дисплея или курсора                  |
| 0   | 0          | 1          | <b>DL</b>  | <b>N</b>   | <b>F</b>   | X          | X          | Установка разрядности, числа строк и размера символа |
| 0   | 1          | <b>ASG</b> | <b>ASG</b> | <b>ASG</b> | <b>ASG</b> | <b>ASG</b> | <b>ASG</b> | Установка адреса SGRAM                               |
| 1   | <b>ADD</b> | <b>ADD</b> | <b>ADD</b> | <b>ADD</b> | <b>ADD</b> | <b>ADD</b> | <b>ADD</b> | Установка адреса DDRAM                               |

Табл.3.1. Команды дисплея

D - Якщо біт встановлено то вміст DDRAM відображається екраном, якщо скинутий то екран очищається (але не пам'ять). Таким чином, якщо біт не встановлений, на екрані ми взагалі нічого не побачимо.

CUR і BLN - керують відображенням курсора на екрані. Є 4 комбінації цих бітів:

CUR = 0 BLN = 0 - курсор не відображається;

CUR = 0 BLN = 1 - курсор не відображається, але блимає все знакомісце (чорним квадратом);

CUR = 1 BLN = 0 - курсор є і він не блимає;

CUR = 1 BLN = 1 - курсор є і блимає все знакомісце.

S / C - визначає що буде зміщуватись курсор (0) або дисплей (1).

R / L - визначає напрямок зсуву: вправо 1, вліво 0.

DL - біт визначає розрядність шини даних: 1 - 8 біт, 0 - 4 біта.

N - задає число використовуваних рядків. Біт скинутий - один рядок, встановлений - два рядки.

F - задає розмір символу. Біт скинутий - розмір 5 на 8 точок, біт встановлений 5 на 10 точок.

ASG - біти задають адресу за якою будемо писати в SGRAM (пам'ять, яка використовується для зберігання призначених для користувача символів) пам'ять.

ADD - біти задають адресу за якою будемо писати в DDRAM (коли ми записуємо в цю пам'ять дані то все що ми туди записали з'являється на екрані) пам'ять.

### 3.4.2. Зовнішня пам'ять

Здавалося б, пам'яті у мікроконтролерів STM32 достатньо, проте, на монітор потрібно виводити досліджувані зображення - формат 800x600 - тобто 1310720 пікселів, кожному з яких відповідає цілих 2 байта. Отримуємо близько 2.2 мБ на одне зображення. А це немало за мірками мікроконтроллера, і не факт, що два різних зображення вдасться записати в його Flash пам'ять.

Потрібно зберігати великі обсяги інформації, або даних, та ще так, щоб ці дані були доступні і після відключення живлення. Є доцільним використовувати зовнішню пам'ять. І відмінним рішенням буде SD карта пам'яті.



Рис.3.5. Приклад пам'яті типу micro SD

Як видно з рис. 3.5 така пам'ять має 8 виводів. Призначення цих виводів зазначено в таблиці 3.2.

| pin | SD Mode              |                     |                              | SPI Mode        |                |                        |
|-----|----------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------------|
|     | Name                 | Type <sup>1</sup>   | Description                  | Name            | Type           | Description            |
| 1   | DAT2                 | I/O/PP              | Data Line[bit2]              | RSV             |                |                        |
| 2   | CD/DAT3 <sup>2</sup> | I/O/PP <sup>3</sup> | Card Detect/ Data Line[bit3] | CS              | I <sup>3</sup> | Chip Select (neg true) |
| 3   | CMD                  | PP                  | Command/Response             | DI              | I              | Data In                |
| 4   | V <sub>DD</sub>      | S                   | Supply voltage               | V <sub>DD</sub> | S              | Supply voltage         |
| 5   | CLK                  | I                   | Clock                        | SCLK            | I              | Clock                  |
| 6   | V <sub>SS</sub>      | S                   | Supply voltage ground        | V <sub>SS</sub> | S              | Supply voltage ground  |
| 7   | DAT0                 | I/O/PP              | Data Line[bit0]              | DO              | O/PP           | Data Out               |
| 8   | DAT1                 | I/O/PP              | Data Line[bit1]              | RSV             |                |                        |
| -   |                      |                     |                              |                 |                |                        |
| -   |                      |                     |                              |                 |                |                        |
| -   |                      |                     |                              |                 |                |                        |

Табл. 3.2. Призначення виводів карти micro SD

Колонка SPI Mode нам натякає на те, що SD карта взаємодіє з мікроконтроллером за допомогою інтерфейсу SPI, проте STM32 мають на своєму борту готовий периферійний модуль для роботи саме з картами пам'яті, і називається він SDIO.

Взагалі взаємодія з картами пам'яті полягає в передачі їм певних команд. Деякі команди вимагають наявності аргументу, деякі ні. Команди можна знайти в офіційній документації на конкретну карту. Так ось вбудований модуль SDIO дає можливість значно спростити процес передачі команд, та й взагалі процес роботи з зовнішніми картами пам'яті. Наприклад, ось регістр SDIO\_CMD - туди ми просто записуємо код команди, яку хочемо передати карті.

У файлі `stm32fx_sdio.h` за традицією знаходимо структури для налаштувань - тобто для вибору джерела тактового сигналу, частоти контроллера, налаштування кількості переданих байт.

Відзначимо як в SPL реалізована передача команд карті пам'яті. Для цих цілей відведена окрема структура `SDIO_CmdInitTypeDef`. В поле `SDIO_CmdIndex` вводимо код команди, в поле `SDIO_Argument` - аргумент

команди, також заповнюємо інші поля. Залишилося як то ці дані передати в карту micro SD, а для цього нам приготували функцію:

`SDIO_SendCommand (SDIO_CmdInitTypeDef * SDIO_CmdInitStruct).`

Як аргумент передаємо їй якраз таки створену нами структуру. Для запису даних є функція - `SDIO_WriteData (uint32_t Data)`. Після виклику цієї функції дані з'являються в спеціально призначеному для цього регістрі - `SDIO_FIFO`.

Так здійснюється робота з модулем SDIO в STM32.

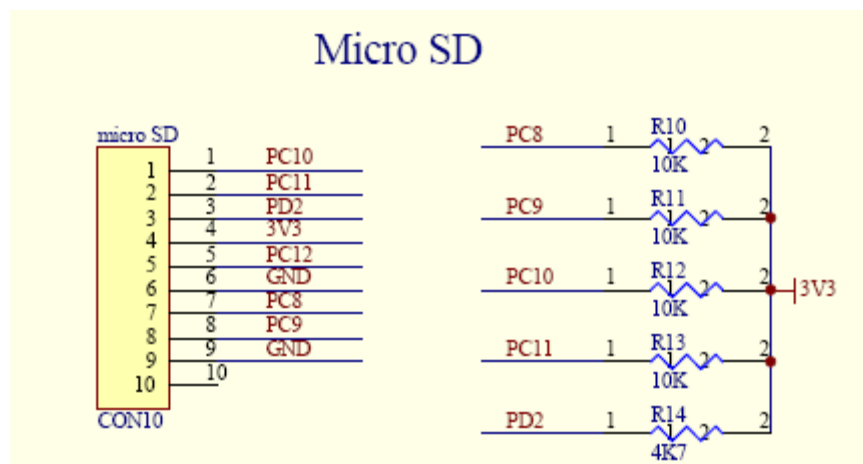


Рис.3.6. Підключення карти пам'яті до мікроконтроллера

Потрібно підключити виводи мікроконтроллера, згідно Datasheet, до виводів карти пам'яті.

Для написання програми скористаємося готовим прикладом для Keil'a - візьмемо звідти два файли, в яких реалізовано щось на зразок драйвера для роботи з картами - це файли `sdcard.c` і `sdcard.h`. Створюємо новий проект, додаємо туди ці файли, а крім того, файли CMSIS і SPL. Ось готовий проект, в який все вже додано - залишається тільки написати код функції `main`.

У файлі `sdcard.c` реалізовані всі функції для роботи з картою пам'яті, нам тепер залишається їх тільки використовувати.

Для роботи з файловою системою ми будемо використовувати бібліотеку - `FatFs`, призначену, в першу чергу, саме для вбудованих систем на мікроконтроллерах.

Переваги бібліотеки FatFs:

- дуже легко портується на будь-яку архітектуру;
- здатна працювати з декількома томами;
- гнучка в налаштуванні.

Робота з файловою системою починається, власне, з «реєстрації». Для цього API бібліотеки FatFs містить функцію `f_mount ()`:

```
FRESULT f_mount
```

```
BYTE Drive, // Номер диска
```

```
FATFS * FileSystemObject // Показчик на об'єкт файлової системи);
```

На цьому підготовка до роботи з FAT і закінчується. Після виконання операції `f_mount ()` можна працювати безпосередньо з даними - створювати і видаляти директорії, файли, записувати і зчитувати дані.

Для адаптації бібліотеки під конкретну необхідно налаштувати використання інтерфейсу SDIO. А для цього нам потрібно буде внести зміни всього лише в один файл, а саме `discio.c` (файл йде в складі бібліотеки FatFs).

Для початку ми реєструємо диск FAT, і якщо ця операція пройшла успішно, то ми зчитуємо 4 байта з файлу `test.txt`. Важливою особливістю є те, що шлях до файлу в FatFs повинен закінчуватися символом кінця рядка - `\0`.

Змінна `testBytes` потрібна для зберігання кількості прочитаних байт. Тобто в разі успішного читання даних в цьому прикладі після виконання функції `f_read ()` `testBytes` повинна стати рівною 4.

### 3.4.3. АСП і ЦСП

Мікроконтроллер пов'язаний з АСП через стандартний послідовний периферійний інтерфейс SPI. На відміну від стандартного послідовного порту, SPI є синхронним інтерфейсом, в якому кожна передача синхронізована з тактовим сигналом, що генерується ведучим пристроєм (мікроконтроллером). Периферійний пристрій синхронізує отримання бітової послідовності з тактовим сигналом. До одного послідовного периферійного інтерфейсу веду-

чого мікроконтроллера можна під'єднати декілька мікросхем. Головний пристрій вибирає ведений пристрій, активуючи сигнал «вибір кристалу» на потрібній мікросхемі. Інші пристрої, не вибрані ведучим, не беруть участі в передачі по SPI.

Для передачі даних в інтерфейсі SPI використовуються чотири сигнали:

- **MOSI** або **SI** — вихід ведучого, вхід веденого (англ. *Master Out Slave In*). Служить для передачі даних від ведучого пристрою до веденого.
- **MISO** або **SO** — вхід ведучого, вихід веденого (англ. *Master In Slave Out*). Служить для передачі даних від веденого пристрою до ведучого.
- **SCLK** або **SCK** — послідовний тактовий сигнал (англ. *Serial Clock*). Служить для передачі тактового сигналу для ведених пристроїв.
- **CS** або **SS** — сигнал початку/завершення сеансу зв'язку (вибору веденого пристрою для передачі/читання даних; англ. *Chip Select, Slave Select*). По завершенні обміну даних має бути знятий, що дозволить приймачу даних вийти з режиму читання/запису та перейти до режиму обробки даних.

Мікроконтроллер пов'язаний з ЦСП по інтерфейсу I2C який має ряд переваг:

- використовується всього дві лінії введення-виведення загального призначення;
- стандарт передбачає «гаряче» підключення та відключення пристроїв в процесі роботи системи;
- вбудований в мікросхеми фільтр придушує сплески, забезпечуючи цілісність даних.

Мікроконтроллер визначає параметри відеосигналу, що поступає на вхід ЦСП, порівнює їх з граничними значеннями динамічного діапазону АЦП, визначає необхідне значення коефіцієнта підсилення і рівня чорного сигналу і завантажує ці параметри в керівні регістри АСП. При цьому вхідний відеосигнал автоматично вписується в динамічний діапазон АЦП, що і забезпечує його оптимальне перетворення в цифрову форму.



Алгоритм інтегрування рентгенотелевізійного зображення здійснюється шляхом накопичення кадрів рентгенотелевізійного зображення в ОЗП. Процес накопичення контролюється мікропроцесорною системою управління. Досягши певного рівня накопиченого в ОЗП відео сигналу контроллер автоматично зупиняє процес інтегрування і переводить контроллер ОЗП в режим читання. При цьому на екрані дисплея відображається кількість накопичених кадрів в процесі інтегрування рентгенотелевізійного зображення.

### **3.5. Розробка друкованої плати відеопроцесора для обробки рентгенотелевізійного зображення**

Розробка друкованої плати проводилася в програмному середовищі Altium designer, на основі електричної принципової схеми. Від оператора, який розводить доріжки, вимагається розставити всі елементи з урахуванням їх розмірів, проблематичності в пайці, і потім з'єднати доріжками. Також необхідно розрахувати всі місця де будуть виконані монтажні та металізовані отвори. Розрахувати полігони живлення у місцях де присутня велика кількість мікросхем вимогливих до живлення. Всю необхідну інформацію представлена у технічній документації на мікросхему. Для підвищення надійності пристрою була застосована маска, яка буде захищати плату від впливу зовнішнього середовища.

Плату було замовлено у Львівській компанії «PCBPrint», яка є однією з найкращих на ринку України з виготовлення роздрібної кількості плат.

Друкована плата представлена у додатку 3. При виготовленні слід враховувати специфікації які висуває виробник плат.

Плата виконується з фольгованого текстоліту FR4.

Файли на виробництво приймаються у форматах Gerber RS-274X та NC(Excellon), або проекти друкованих плат з Sprint Layout, P-CAD, KiCad, Altium Designer, DipTrace та Eagle.

|                              |             |
|------------------------------|-------------|
| Одиниці вимірювання          | Мм          |
| Товщина плати                | 0,8;1,0;1,5 |
| Товщина доріжки MIN          | 0,2         |
| Відстань між доріжками MIN   | 0,2         |
| Діаметр отворів MIN          | 0,3         |
| Фрезерований отвір MIN       | 0,6         |
| Металізований отвір MIN      | 0,3         |
| Відхилення центра отвора MAX | 0,15        |
| Крок діаметрів отвора        | 0,1         |
| Товщина маркування MIN       | 0,15        |

Табл.3.3. Специфікація якій має відповідати плата

Вимоги до пакету Gerber RS-274X та NC(Excellon) файлів:

- Gerber та NC(Excellon) файли не повинні бути дзеркальні;

NC повинні містити у назві:

- Plated — отвори з металізацією;
- NoPlated — без металізації;
- Drill — сверлені отвори;
- Mill — фрезеровані отвори;

Файли Gerber повинні містити у назві:

- Top — верхній мідний шар;
- Bot — нижній мідний шар;
- TopMask — верхній шар паяльної маски;
- BotMask — нижній шар паяльної маски;
- TopSilk — верхній шар маркування;
- BotSilk — нижній шар маркування;
- Board — контур друкованої плати.

Altium designer дає можливість експортувати файли у форматі Gerber, який є дуже зручним і яким користуються всі виробники плат. Він дає мож-

ливість переглянути кожен шар плати окремо у легкому, в сенсі ресурсоемності, додатку «GerberV».

Розроблена плата є двосторонньою, оскільки кількість елементів є достатньо великою і розвести їх всіх лише на одній стороні не є можливим. При пайці елементів використовувався флюс гель, який наносився на виводи мікросхем, призначений для видалення оксидів з поверхні під пайку, зниження поверхневого натягу, поліпшення розтікання рідкого припою і захисту від дії навколишнього середовища.

## **Висновки**

1. В ході роботи було розроблено електричну принципову схему в програмному середовищі Altium designer, який є зручним завдяки існуючим бібліотекам компонентів, а також забезпечує можливість перевірки роботи плати іще на стадії розробки.

2. Наявність у ресурсах мікроконтролера STM32F405OG інтерфейсу SPI дає можливість керувати АСП, для максимального використання динамічного діапазону АЦП. Також використовувати дисплей для виведення корисної інформації і карту пам'яті SD-card для зберігання, і перенесення рентгенограм в обчислювальну техніку для подальшої обробки.

3. Мікроконтролер дає можливість використовувати інтерфейс I2C, завдяки якому є можливість вивести на дисплей інформацію про кількість накопичених кадрів. Також контролер визначає рівень вхідного сигналу, який надходить на ЦСП і порівнює з сигналом який приходить на вхід АСП.

4. На основі електричної принципової схеми було розроблено друковану плату в програмному середовищі Altium designer. Плата виконана з фольгованого текстоліту FR4 товщиною 1мм, з нанесенням маски для усунення негативного впливу навколишнього середовища. Під час розведення плати було враховано всі особливості використаної елементарної бази. Необхідна інформація була взята з технічної документації.

## 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ВІДЕОПРОЦЕСОРУ ДЛЯ ОБРОБКИ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ЗОБРАЖЕННЯ

### 4.1. Технічні характеристики відеопроцесора

Вхідні ланцюги відеопроцесора розраховані на підключення стандартного композитного телевізійного сигналу рентгенотелевізійної установки, що працює при черезрядкових параметрах розкладання телевізійного зображення на 625 рядків, 50 полів в секунду. На виході відеопроцесора формується такий же композитний телевізійний відеосигнал, як і на вході, що забезпечує можливість виведення обробленого телевізійного відеосигналу на штатний телевізійний монітор рентгенотелевізійної дефектоскопічної установки. Відеопроцесор VP-063 реалізує в цифровому вигляді алгоритм інтегрування рентгенотелевізійного зображення шляхом накопичення певної кількості кадрів рентгенотелевізійного сигналу протягом регульованого часу експозиції в залежності від потужності рентгенівського випромінювання і товщини контрольованого виробу. Для забезпечення обробки зображення в реальному масштабі часу, відеопроцесор реалізований на основі швидкодіючих аналогових і цифрових інтегральних схем.

|                                                                        |                      |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Амплітуда вхідного композитного телевізійного відеосигналу             | 1В                   |
| Амплітуда вихідного композитного телевізійного відеосигналу            | 1В                   |
| Аналого-цифрове перетворення вхідного рентгенотелевізійного сигналу    | 12 біт               |
| Цифро-аналогове перетворення вихідного сигналу                         | 10 біт               |
| Пам'ять                                                                | 2 банку 512Кx16      |
| Формат кадру                                                           | 800x600              |
| Вхідний підсилювач відеосигналу з програмованим коефіцієнтом посилення | 0-36 dB (1-64 разів) |

|                                                                           |                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Кількість кадрів накопичення                                              | 16-999                                                                             |
| Інверсія рентгенотелевізійного зображення                                 | позитив-негатив                                                                    |
| Автоматичне нормування вхідного відеосигналу по динамічному діапазону АЦП | Присутнє                                                                           |
| Мікропроцесорне управління режимами роботи пристрою                       | Присутнє                                                                           |
| режими роботи пристрою                                                    | 4 програмованих: прямий канал і 3 режими накопичення рентгенотелевізійного сигналу |
| нормування вихідного сигналу                                              | автоматичне                                                                        |
| Вбудована пам'ять                                                         | 10000 рентгенограм                                                                 |
| Можливість зв'язку з комп'ютером                                          | USB-інтерфейс                                                                      |
| Управління рентгенівським апаратом                                        | присутнє                                                                           |
| Розміри пристрою                                                          | 100x170x30 мм                                                                      |
| Живлення                                                                  | 5В (450мА)                                                                         |

Табл.4.1. Основні технічні характеристики відеопроцесора

#### 4.2. Функціональні можливості

- Відеопроцесор призначений для реалізації в цифровому вигляді алгоритму інтегрування рентгенотелевізійного зображення шляхом накопичення певної кількості кадрів рентгенотелевізійного сигналу протягом регульованого часу експозиції в залежності від потужності рентгенівського випромінювання і товщини контрольованого виробу.
- Нормування рентгенотелевізійного відеосигналу, що надходить з виходу рентгенотелевізійної установки, за рівнем і амплітуді при виведенні стати-

чного і динамічного рентгенотелевізійного зображення на екран телевізійного монітора без застосування алгоритму його інтегрування (без фільтрації шумів рентгенотелевізійного каналу).

- Безпосереднє виведення на екран відеомонітора статичного рентгенотелевізійного зображення, яке надходить із рентгенотелевізійної відеокамери із застосуванням алгоритму інтегрування рентгенотелевізійного зображення (з фільтрацією шумів рентгенівських квантів і шумів рентгенотелевізійного каналу).
- Збереження обробленого зображення у вбудованій оперативній пам'яті і можливість передачі його для подальшої обробки та архівування в персональний комп'ютер або ноутбук за допомогою USB-порту або на SD-card.
- Збереження оброблених зображення у вбудованій енергонезалежній пам'яті (~ 10000 зображень), можливість перегляду збережених в незалежній пам'яті зображень на екрані телевізійного монітора, передача рентгенограм з незалежної пам'яті для їх подальшої обробки та архівування в персональний комп'ютер або ноутбук за допомогою USB-порту чи card-reader.

На рис. 4.1 а,б представлено зображення зварного шва до обробки (а), та після обробки відеопроцесором.

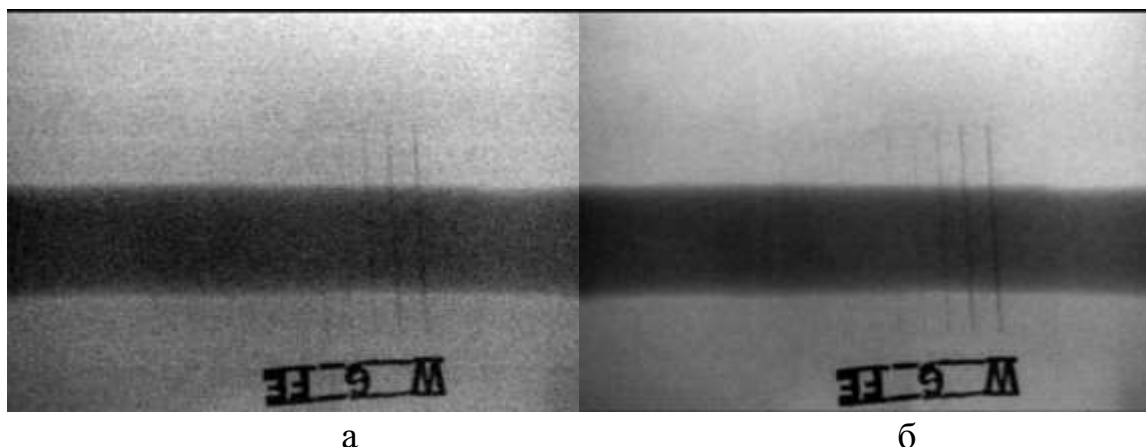


Рис. 4.1 Зображення зварного шва до обробки (а) та після обробки (б) відеопроцесором.

На фоні шва покладено канавочний дефектометр. На зображенні без обробки видно три канавки, а на обробленому зображенні видно 6 канавок.

Це відповідає контрастній чутливості 2,5% та 1,6% відповідно. Якщо врахувати те, що після обробки контрастна чутливість майже наблизилась до контрастної чутливості плівки (1,2%), то можна зробити висновок, що розроблений алгоритм фільтрації рентгенівських шумів дозволяє значно підвищити чутливість рентгенотелевізійного контролю якості виробів, і майже наблизити його до чутливості рентгенівської плівки.

### **4.3. Інструкція по використанню в реальних умовах**

#### **4.3.1. Органи управління**

Управління відеопроцесором здійснюється за допомогою восьми кнопок та перемикача живлення. Кожна кнопка може виконувати ряд основних і вторинних функцій. Зовнішній вигляд відеопроцесора і розташування органів управління показано на рис.

#### **4.3.2. Вхідні та вихідні роз'єми**



Рис.4.2. Вигляд відеопроцесора збоку



Рис.4.3. Вхідний роз'єм для підключення зовнішнього блоку живлення



Рис.4.4. Відеовхід (праворуч), відеовихід (ліворуч)



Рис.4.5. USB-порт (ліворуч) і роз'єм підключення рентгенівського апарата (праворуч)



### 4.3.3. Ввімкнення пристрою

Для ввімкнення відеопроцесора необхідно підключити до нього зовнішнє джерело живлення + 5В з навантажувальною здатністю не менше 450-500 мА. До відеовходу необхідно підключити джерело рентгенотелевізійного сигналу, до відеовиходу необхідно підключити телевізійний монітор. Після цього перевести вимикач живлення POWER в положення включено. При цьому на передній панелі відеопроцесора загориться індикатор живлення. Відразу після ввімкнення відеопроцесор знаходиться в режимі «Робочий режим» і готовий до роботи.

УВАГА: щоб уникнути вихід відеопроцесора з ладу всі маніпуляції, пов'язані з підключенням зовнішнього джерела живлення, джерела рентгенотелевізійного сигналу і телевізійного монітора слід проводити тільки при положенні вимикача POWER в стані вимкнено. Перевищення напруги джерела живлення більш ніж на 5% може призвести до виходу відеопроцесора з ладу. Зниження напруги джерела живлення більш ніж на 10% може привести до нестабільної роботи відеопроцесора або до погіршення його параметрів.

### 4.3.4Режими роботи відеопроцесора

Відеопроцесор може працювати режимах:

- Робочий режим;
- Режим налаштування;
- Режим роботи з SD-card.

Перемикання між режимами здійснюється за допомогою кнопки «Mode». Кожному режиму відповідає своя заставка на екрані рідкокристалічного індикатора

#### 4.3.4.1. Робочий режим

У режимі «Робочий режим» відеопроцесор реалізує чотири підрежими обробки рентгенотелевізійного зображення. Перший подрежим назива-

ється «TV» або «Прямий канал». Він призначений для перегляду динамічних фрагментів рентгенотелевізійного зображення, а також використовується при позиціонуванні контрольованого виробу щодо детектора рентгенівського випромінювання. У цьому підрежимі вхідний відеосигнал автоматично нормується по амплітуді і рівню. Запуск підрежиму «Прямий канал» здійснюється шляхом натискання кнопки «TV» на передній панелі пристрою. При цьому на екрані рідкокристалічного індикатора відображається заставка підрежиму «Прямий канал», де цифра на екрані - це код, що відповідає оптимальному коефіцієнту посилення вбудованого підсилювача, при якому вхідний сигнал відеопроцесора буде оптимально вписаний в динамічний діапазон АЦП. На рис. приведена номограма для перекладу відображуваного коду в величину коефіцієнта посилення в dB, де по осі X розташовується код, а по осі Y - відповідає цьому коду коефіцієнт посилення. Також коефіцієнт посилення може бути обчислений за формулою:  $\text{Gain (dB)} = 0.0351 * \text{Code}$ , де Gain (dB) - коефіцієнт посилення в dB, Code - код на екрані рідкокристалічного індикатора.

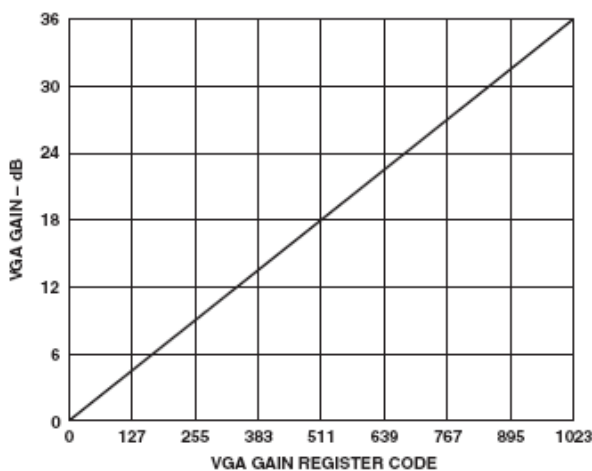


Рис.4.6. Номограма для переведу відображеного коду у величину коефіцієнта підсилення

Другий, третій і четвертий підрежими роботи називаються «VP1», «VP2» і «VP3». У цих підрежимів відеопроцесор реалізує алгоритм цифрової регульованою експозиції тіньового рентгенівського зображення контрольованого виробу. Ці підрежими призначені для обробки рентгенотелевізійного

зображення контрольованого виробу, який знаходиться в статичному положенні. Інтегрування рентгенотелевізійного сигналу практично повністю убирає флуктуаційні шуми рентгенотелевізійного каналу і забезпечує підвищення чутливості дефектоскопічного контролю. При цьому мікропроцесорна система управління контролює процес інтеграції та автоматично визначає оптимальну для поточних умов контролю тривалість експозиції. Підрежими «VP1», «VP2» і «VP3» функціонують однаково і відрізняються друг від друга лише величинами робочих параметрів. Запуск цих підрежимів здійснюється шляхом натискання кнопок «VP1», «VP2» та «VP3» відповідно. При цьому відображається назва подрежима і кількість накопичених кадрів зображення.

#### **4.3.4.2. Збереження зображень на SD-card**

У підрежимах «VP1», «VP2» і «VP3» є можливість збереження обробленого зображення на SD-card, що дає можливість зберегти до 8000 зображень. Для збереження зображення необхідно натиснути кнопку «←», при цьому відеопроцесор виконає пошук першої вільної сесії і на екрані рідкокристалічного індикатора з'явиться меню налаштування сесії. Це меню дозволяє встановити номер сесії, в яку необхідно зберегти зображення і дату сесії в форматі. Переміщаючи миготливий курсор за допомогою кнопок «←» і «→» можна вибрати один з параметрів сесії для його редагування. Редагування параметрів сесії здійснюється за допомогою кнопок «100», «10» і «1», які дозволяють виконувати інкремент сотень, десятків і одиниць параметра. Для завершення установки сесії необхідно натиснути кнопку «S», при цьому зображення буде збережено в сесію з встановленими користувачем параметрами.

Відмовитися від установки сесії можливо шляхом натискання кнопки «Mode». При цьому з'явиться повідомлення, що сесія не встановлена, знімок не буде збережено і відеопроцесор перейде в останній використаний в програмі подрежим робочого режиму.

Якщо сесія не встановлена (наприклад, перше включення пристрою, переповнення поточної сесії або відмова від збереження параметрів сесії), то при спробі збереження зображення знову з'явиться меню настройки сесії.

У разі відсутності вільних сесій буде видано попередження про переповнення пам'яті.

#### 4.3.4.3. Режим налаштування

«Режим налаштування» призначений для редагування параметрів підрежимів робочого режиму. Перехід відеопроцесора в режим «Режим налаштування» здійснюється за допомогою кнопки «Mode». містить 4 підрежиму редагування параметрів. Вибір одного з підрежимів редагування здійснюється за допомогою кнопок «TV», «VP1», «VP2» і «VP3». Повернення в «Режим налаштування» з підрежимів редагування параметрів здійснюється за допомогою кнопки «Mode». Для кожного з підрежимів робочого режиму існує 3 робочих параметра: посилення, рівень, щільність. Вибір параметра для редагування здійснюється за допомогою кнопок «←» і «→». Редагування параметрів здійснюється за допомогою кнопок «100», «10» і «1», які дозволяють виконувати інкремент сотень, десятків і одиниць параметра. Збереження змін здійснюється за допомогою кнопки «S».

Параметр посилення дозволяє встановити коефіцієнт посилення вхідного відеосигналу. Для підрежимів робочого режиму «VP1», «VP2» і «VP3» цей параметр є фіксованим (встановлюється вручну) і не змінюється в процесі роботи. Для підрежиму «TV» відеопроцесор використовує цей параметр як стартовий для пошуку посилення, при якому відеосигнал оптимальним чином впишеться в динамічний діапазон АЦП. Код відповідний певному коефіцієнту посилення може бути знайдений з номограми рис. або обчислений за формулою:  $\text{Code} = \text{Gain (dB)} / 0.0351$ , де Gain (dB) - коефіцієнт посилення в dB, Code - код відповідний цьому коефіцієнту посилення. Максимальне значення параметра посилення 999.

Параметр «рівень» дозволяє встановити рівень вихідного відеосигналу. Так як для цифро-аналогового перетворення в відеопроцесорі використовується ЦАП з джерелом опорного напруги 1.024 В, то величина параметра рівень приблизно відповідає напрузі вихідного відеосигналу в мВ. Максимальне значення параметра рівень 999.

Параметр щільність призначений для оцінки рівня вихідного відеосигналу відеопроцесора. Він визначає кількість точок з рівнем, який перевищив величину параметра рівень в межах одного кадру зображення. Максимальне значення параметра щільність 999.

#### 4.4. Стартап проект

| Зміст ідеї                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Напрямки застосування                                                      | Вигоди для користувача                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| розробити пристрій, що дозволить реалізувати, в реальному масштабі часу, режим апаратної фільтрації рентгенівських шумів, автоматизувати вибір тривалості часу експозиції з нормуванням телевізійного відеосигналу по динамічному діапазону залежно від потужності рентгенівського випромінювання і товщини контрольованого виробу. | рентгеноструктурний аналіз матеріалів; дослідження зварних швів; медицина. | Підвищення чутливості рентгенотелевізійного контролю якості виробів; Застосування в польових умовах; Відносно низька вартість; Можливість передачі рентгенограм до обчислювальної техніки; Можливість архівувати рентгенограми в цифровому вигляді. |

Табл.4.2. Опис ідеї стартап-проекту

| п/п | Техніко- економічні характеристики ідеї | (потенційні) товари/концепції конкурентів |          |        |        | W (слабка сторона) | N (нейтральна сторона) | S (сильна сторона) |
|-----|-----------------------------------------|-------------------------------------------|----------|--------|--------|--------------------|------------------------|--------------------|
|     |                                         | Мій проект                                | RayCraft | CO-BA+ | PTB-03 |                    |                        |                    |
| 1   | Портативність                           | +                                         | -        | -      | +      |                    |                        | +                  |
| 2   | Можливість накопичення кадрів           | +                                         | -        | -      | -      |                    |                        | +                  |
| 3   | Можливість віднімання фону              | +                                         | +        | -      | -      |                    |                        | +                  |
| 4   | Додаткове ПО                            | +                                         | +        | +      | +      |                    |                        | +                  |

Табл. 4.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № п/п | Ідея проекту                                  | Технології її реалізації                                        | Наявність технологій | Доступність технологій                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Створення системи накопичення зображення      | Реалізується на програмованій логіці шляхом програмування       | Технологія існує     | Технологія доступна, при наявності спеціальних інструментальних засобів (програматора) |
| 2     | Створення Системи управління та автоматизації | Реалізується за допомогою мікроконтроллера шляхом програмування | Технологія існує     | Технологія доступна, при наявності спеціальних інструментальних засобів (програматора) |
| 3     | Створення друкованої плати                    | Реалізується шляхом замовлення у виробників друкованих плат     | Технологія існує     | Технологія доступна при наявності розведення доріжок плати                             |

Табл. 4.4 Технологічна здійсненність ідеї проекту

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: всі технології є доступними, тому пристрій може бути виготовлений.

| № п/п | Показники стану ринку (найменування)                        | Характеристика                            |
|-------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1     | Кількість головних гравців, од                              | 3                                         |
| 2     | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од                           | 2500                                      |
| 3     | Динаміка ринку (якісна оцінка)                              | зростає                                   |
| 4     | Наявність обмежень для входу<br>(вказати характер обмежень) | стагнує                                   |
| 5     | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації         | Має відповідати стандартам рентгеноскопії |
| 6     | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %     | 80%                                       |

Табл.4.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| п/п | Потреба, що формує ринок                     | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)                       | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів                     | Вимоги споживачів до товару           |
|-----|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1   | Підвищення чутливості дослідження            | Виробники у яких є потреба у дослідженні внутрішньої структури   | К кожного виробника є свої потреби до чутливості дослідження, в залежності від товару | Вимоги до чутливості, %               |
| 2   | Можливість архівування цифрових рентгенограм | Виробники, у яких є потреба у дослідженні внутрішньої структури. | К кожного виробника є свої потреби до кількості рентгенограм                          | Вимоги до кількості рентгенограм, од. |

Табл.4.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| п/п | Фактор                                     | Зміст загрози                                                      | Можлива реакція компанії                              |
|-----|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1   | Наявність інших технологій                 | Існують інші технології дослідження внутрішньої структури          | Надання вищої чутливості контролю якості              |
| 2   | Потреба у рентгенограмі в аналоговій формі | Деякі замовники потребують не цифрових, а реальних рентгенограм    | Надання можливості роздруківки цифрової рентгенограми |
| 3   | Підвищення рівня чутливості                | З розвитком технологій потрібно помічати все менші і менші дефекти | Застосування новітньої елементної бази                |

Табл.4.7. Фактори загроз

| п/п | Фактор                                                           | Зміст можливості                                                     | Реакція компанії                                      |
|-----|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1   | Поява нових комплектуючих, які входять до складу відео процесору | З розвитком технологій з'являються більш нові і швидкодіючі елементи | Впровадження новітньої елементної бази                |
| 2   | Потреба у рентгенограмі в аналоговій формі                       | Деякі замовники потребують не цифрових, а реальних рентгенограм      | Надання можливості роздруківки цифрової рентгенограми |

Табл.4.8. Фактори можливостей

|                                      |                                         |                                                                                        |
|--------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Особливості конкурентного середовища | В чому проявляється дана характеристика | Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною) |
| 1.Тип конкуренції –                  | На ринку не дуже вели-                  | Надавати кращі показ-                                                                  |



|                                                      |                                                                |                                                                            |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Олігополія                                           | ка кількість конкуруючих фірм                                  | ники чутливості ніж у конкурентів                                          |
| 2. За рівнем конкурентної боротьби – міжнаціональний | На ринку існують фірми які постачають свої товари з-за кордону | Надавати кращі показники чутливості ніж у конкурентів                      |
| 3. За галузевою ознакою – внутрішньогалузева         | Даний пристрій може використовуватись у вузькій галузі         | Можливо удосконалити даний пристрій і використовувати наприклад у медицині |
| 4. За характером конкурентних переваг - цінова       | Ціна сильно залежить на конкурентну спроможність товару        | Можливо поставити ціну нижчу ніж у конкурентів                             |

Табл4.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі                       | Потенційні конкуренти                                 | Клієнти                                                                                   | Товари-замінники                                                              |
|------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|                  | «COBA+»<br>«RayCraft»<br>«РТВ-03»               | Немає, оскільки відео процесор іще не вийшов на ринок | Клієнти впливають своїми вимогами                                                         | Інші виробники можуть бути замінниками                                        |
| Висновки         | Досить сильні конкуренти в галузі дефектоскопії | Є можливість виходу на ринок                          | Клієнти диктують умови роботи на ринку, оскільки вимагають певної чутливості від пристрою | Якщо конкуруючих пристроїв буде досить багато, тим буде важче влитись в ринок |

Табл.4.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Є можливість впровадження нашого пристрою на ринку, оскільки ми можемо запропонувати вищу чутливість до контролю якості.

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності               | Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим) |
|-------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Висока чутливість                           | Користувачі мають певні вимоги до чутливості. Чим чутливість вища – тим краще                       |
| 2     | Можливість зберігання цифрових рентгенограм | Надає можливість зберігати всі рентгенограми на цифровому носії                                     |
| 3     | Можливість віднімання фону                  | Дає можливість роздивитись дефекти, без відволікання на фон.                                        |

Таблиця 4.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| п/п | Фактор конкурентоспроможності               | Бали 1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з відеопроцесором |    |    |   |    |    |    |
|-----|---------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------|----|----|---|----|----|----|
|     |                                             |           | -3                                                         | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1   | Висока чутливість                           | 15        |                                                            | +  |    |   |    |    |    |
| 2   | Можливість зберігання цифрових рентгенограм | 10        |                                                            |    |    | + |    |    |    |
| 3   | Можливість віднімання фону                  | 15        | +                                                          |    |    |   |    |    |    |

Табл.4.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «відеопроцесора»

|                                                                                                        |                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Сильні сторони: Можливість віднімання фону, можливість накопичення, можливість зберігання рентгенограм | Слабкі сторони: немає досвіду експлуатації             |
| Можливості: дає можливість витіснити певних конкурентів з ринку за рахунок цих переваг                 | Загрози: можуть виникнути проблеми в ході експлуатації |

Табл.4.13. SWOT- аналіз стартап-проекту

| Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів                                                                      | Готовність споживачів сприйняти продукт                             | Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту) | Інтенсивність конкуренції в сегменті | Простота входу в сегмент                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Підприємство, яке має РТС, готове до включення в його склад відеопроцесора                                            | Продукт бути сприйнятим, оскільки він підвищує якість дефектоскопії | Попит близько 80%                                   | Конкуренція досить сильна            | Увійти в сегмент ринку досить не просто оскільки потрібно завоювати довіру замовників |
| Як цільову групу було обрано підприємства та фірми які мають РТС і хочуть підвищити результати контролю без зміни РТС |                                                                     |                                                     |                                      |                                                                                       |

Табл. 4.14.. Вибір цільових груп потенційних споживачів

|                              |                                          |                                                         |
|------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Рівень цін на товари-аналоги | Рівень доходів цільової групи споживачів | Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу |
| 1000-1500\$                  | 5000\$/міс                               | 100-300\$                                               |

Табл 4.15. Визначення меж встановлення ціни

|                                                     |                                                       |                      |                          |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів | Функції збуту, які має виконувати постачальник товару | Глибина каналу збуту | Оптимальна система збуту |
| Купують один раз на довгий час                      | Ввімкнення, налагодження, ремонт                      | Досить мала          | Індивідуальна            |

Табл.4.16. Формування системи збуту

Спеціалізований відеопроцесор можливо комерціалізувати на ринку, оскільки є наявний попит серед виробників, які мають потребу досліджувати вироби на дефективність. Просліджується певна динаміка ринку, пов'язана з підвищенням вимог до чутливості контролю якості виробів. Ціна відеопроцесора дає можливість рентабельно впровадити його до продажу. Вважаю що даний пристрій є конкурентоспроможним на ринку з огляду на його переваги над аналогами (можливість накопичення кадрів, автоматизація адаптації відеопроцесора до параметрів відеосигналу) тому доцільно використовувати стратегію заняття конкурентної ніші, яка є досить прибутковою, залишається стабільною упродовж тривалого проміжку часу.

#### 4.5. Розрахунок надійності схеми

Надійність – дуже важливий параметр адже вона показує як довго може служити прилад в різних умовах експлуатації. Надійність ЕС — це властивість виконувати задані функції, зберігати на протязі часу значення прийнятих експлуатаційних параметрів в заданій границях, які відповідають заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, зберігання і транспортування.

Експериментальне визначення характеристик та параметрів надійності ЕС відбувається з використанням даних про відмови, отримані на протязі експлуатації або випробувань. Найбільш важливими факторами, які впливають на надійність є: тиск, температура, склад атмосфери, радіація, вологість, вібрації, шуми, ударні навантаження. Найпоширеніший метод вимірювання характеристик надійності відноситься до розповсюджених компонентів ЕС, коли випробують велику кількість  $N$  однакових компонентів і на інтервалі часу фіксують кількість елементів, що відмовили. Кожний компонент, який вийшов із ладу зразу ж замінюється справним. Розглянуті вище характеристики розраховуються за формулами :

розрахунок функції ненадійності:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N} = \frac{10}{400} = 0.025, \quad (3.1)$$

розрахунок функції надійності:

$$P(t) = \frac{N-n(t)}{N} = \frac{400-10}{400} = 0.975, \quad (3.2)$$

щільність розподілу часу безвідмовної роботи ЕС:

$$p(t) = \frac{n(t+\Delta t_1)-n(t)}{N\Delta t_1} = \frac{\Delta n(t)}{N\Delta t_1} = \frac{14}{400*2920} = 0.19 * 10^{-4} * 1/\text{год}, \quad (3.3)$$

розрахунок інтенсивності відмов:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{(N-n(t))\Delta t_1} = \frac{14}{(400-10)2920} = \frac{14}{400*2920} = 0.12 * 10^{-4} * 1/\text{год}. \quad (3.4)$$

Розрахунок експлуатаційної інтенсивності відмови  $\lambda_e$  виконується за формулою:

$$\lambda_E = (\lambda_{кр}K_t + \lambda_{корп}K_E)K_QK_L, \quad (3.5)$$

де  $\lambda_{кр}$  — інтенсивність відмови ІМС, обумовлені кристалом;

$K_1$  — коефіцієнт температурного режиму;

$\lambda_{корп}$  — інтенсивність відмови ІМС, зв'язані з проблемами корпусу;

$K_E$  — коефіцієнт експлуатації;

$K_Q$  — коефіцієнт якості;

$K_L$  — тривалість промислового циклу виготовлення ІМС.

Визначимо кожен з параметрів за допомогою спеціальних таблиць

Табл.3.4. Інтенсивність відмови

| Група ІМС           | $\lambda_{кр} \times 10^{-6} \text{ 1\год}$ | Значення $N$      |
|---------------------|---------------------------------------------|-------------------|
| Біполярні цифрові   | $\lambda_{кр} = 0,0025$                     | Від 1 до 100      |
|                     | $\lambda_{кр} = 0,0002N^{0,6}$              | Від 101 до 60 000 |
| Біполярні аналогові | $\lambda_{кр} = 0,010$                      | Від 1 до 100      |
|                     | $\lambda_{кр} = 0,017 \ln N - 0,06$         | Від 101 до 10 000 |
| ПЛІС                | $\lambda_{кр} = 0,010$                      | До 200            |
|                     | $\lambda_{кр} = 0,0022N^{0,43}$             | Від 201 до 5000   |
| МОП цифрові         | $\lambda_{кр} = 0,010$                      | Від 1 до 100      |
|                     | $\lambda_{кр} = 0,001N^{0,54}$              | Від 101 до 60 000 |
| МОП аналогові       | $\lambda_{кр} = 0,010$                      | Від 1 до 100      |
|                     | $\lambda_{кр} = 0,0174 \ln N - 0,06$        | Від 101 до 10 000 |
| ПЛІС МОП технології | $\lambda_{кр} = 0,00085$                    | Від 500           |
|                     | $\lambda_{кр} = 0,0022 \ln N - 0,012$       | Від 501 до 20 000 |

Табл.4.17. Інтенсивність відмови для мікропроцесорів

| Розрядність, біт | $\lambda_{кр} \times 10^{-6} \text{ 1/год}$ |      |
|------------------|---------------------------------------------|------|
|                  | Біполярні                                   | МОП  |
| до 8             | 0,060                                       | 0,14 |
| до 16            | 0,12                                        | 0,28 |
| До 32            | 0,24                                        | 0,56 |

Табл.4.18. Інтенсивність відмови в залежності від кількості виводів

| Тип корпусу                     | $\lambda_{корп} \times 10^{-6} \text{ 1/год}$         |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Герметичний DIP, PGA, SMT       | $\lambda_{корп} = 2,8 \times 10^{-4} \times n^{1,08}$ |
| DIP зі скляною ізоляцією        | $\lambda_{корп} = 9,0 \times 10^{-5} \times n^{1,51}$ |
| Плоский із аксіальними виводами | $\lambda_{корп} = 3,0 \times 10^{-5} \times n^{1,82}$ |
| Металевий (Can)                 | $\lambda_{корп} = 3,0 \times 10^{-5} \times n^{2,01}$ |
| Негерметичний DIP, PGA, SMT     | $\lambda_{корп} = 3,6 \times 10^{-4} \times n^{1,08}$ |

,де n — число виводів.

Табл.4.19. Значення коефіцієнта  $K_E$  для ІМС

| Клас(група елементів) | Група апаратури в залежності від умов експлуатації |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                       | $Z_p$                                              | $Z_{чр}$ | $Z_{ов}$ | $Z_{пн}$ | $Z_{зм}$ | $Z_{мд}$ | $B_{ск}$ |
| ІМС                   | 1                                                  | 1,2      | 1,5      | 1,7      | 2        | 3        | 3,5      |

Табл.4.20. класифікація апаратури

Де  $Z_p$  — стаціонарна апаратура в лабораторних умовах, приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами ;

$Z_{чр}$  — стаціонарна апаратура, що використовується в нерегулярно опалюваних приміщеннях, в промислових приміщеннях, в тому числі в шахтах, можливе часткове регулювання кліматичних умов;

$Z_{ов}$  — стаціонарна апаратура, що експлуатується під навісом в неопалюваних приміщеннях, де кліматичні умови близькі до умов відкритого повітря;

$Z_{пн}$  — переносна апаратура, що експлуатується в режимі стаціонарного застосування в будь яких приміщеннях або під навісом;

$Z_{зм}$  — мобільна апаратура, що експлуатується в будь яких приміщеннях в тому числі в кузовах автомобілів, палатках або на відкритому повітрі;

$Z_{мд}$  — мобільна апаратура, що експлуатується на потягах, в кузовах і салонах автомобілів і в інших механічних транспортних засобах;

$B_{ск}$  — апаратура вантажних і пасажирських літаків, що експлуатується в відсіках де знаходяться люди.

Розрахунок коефіцієнту температурного режиму:

$$K_t = 0,061t_{нав} - 0,525, \quad (3.6),$$

де  $t_{нав}$  — температура навколишнього середовища, °С.

Візьмемо температуру навколишнього середовища 25°С.

| Рівень якості виготовлення ІМС                                              |       | Відповідність в країнах СНГ |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------|
| Характеристика по довідниках і стандартах США                               | $K_Q$ |                             |
| Клас S у відповідності з MIL-M-38510                                        | 0,25  | «9»(ОС)                     |
| Клас В у відповідності з MIL-M-38510                                        | 1,0   | «5»(ВП, ОВП)                |
| Клас В <sub>1</sub> у відповідності зі стандартом MIL-STD-883, розділ 1.2.1 | 2,0   | «5»(ВП, ОВП)                |
| Більш низький клас якості ніж В                                             | 3,1   | «3»(ОТК)                    |
| Більш низький клас якості ніж В <sub>1</sub>                                | 5,5   | «1»(ОТК)                    |
| Комерційний рівень або рівень не відомий                                    | 10    | «1»(ОТК)                    |

Табл.4.21 Значення коефіцієнту якості  $K_Q$  для ІМС

Тривалість промислового циклу візьмемо  $T_Q = 1$  год.



Маючи всі потрібні параметри проведемо розрахунок експлуатаційної інтенсивності відмови  $\lambda_e$ .

|                  |                                                      |
|------------------|------------------------------------------------------|
| $\lambda_{кр}$   | $0,025 * 10^{-6} \text{1/год}$                       |
| $\lambda_{корп}$ | $(3,6 * 10^{-4} * 64^{1,08}) * 10^{-6} \text{1/год}$ |
| $K_E$            | 2                                                    |
| $K_t$            | $0,939^\circ\text{C}$                                |
| $K_Q$            | 10                                                   |
| $K_L$            | 1 год                                                |

Табл.4.22. Параметри ІМС

Інтенсивність відмови — умовна густина імовірності виникнення відмови об'єкта, яка визначається за умови, що до цього моменту відмова не виникла. Інтенсивність відмов є показником безвідмовності неремонтованих і невідновлюваних об'єктів.

$$\begin{aligned}
 \lambda_E &= (\lambda_{кр} K_t + \lambda_{корп} K_E) K_Q K_L = \\
 &= (0,025 * 10^{-6} * 0,939 + (3,6 * 10^{-4} * 64^{1,08})) * \\
 &\quad * 10^{-6} * 2 * 10 = 0,64 * 10^{-6}.
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Як видно із розрахунків, експлуатаційна інтенсивність відмови дорівнює  $0,64 * 10^{-6}$ , що є дуже низьким значенням, отже можна з впевненістю сказати, що схема буде працювати з низькою ймовірністю відмови.

## Висновки

1. Розроблений відеопроцесор має характеристики, які дають можливість включати його до вже існуючої рентгеноскопичної системи. Пристрій дає можливість реалізації в цифровому вигляді алгоритму інтегрування рентгентелевізійного зображення шляхом накопичення певної кількості кадрів, нормування рентгентелевізійного відеосигналу що надходить з Рентгено-

левізійної системи, безпосереднього виведення на екран, збереження рентгенограм на зовнішню пам'ять.

2. Розроблено інструкцію для оператора, яка дасть можливість ознайомитись з відеопроцесором перед його використанням, а також з можливими режимами роботи.

3. Розроблено стартап, який показує, що відеопроцесор можливо комерціалізувати на ринку, оскільки є наявний попит серед виробників, які мають потребу досліджувати вироби на дефективність. Просліджується певна динаміка ринку, пов'язана з підвищенням вимог до чутливості контролю якості виробів. Характеристики розробленого відеопроцесора мають переваги перед конкурентними приладами. Ціна відеопроцесора дає можливість рентабельно впровадити його до продажу.

4. В роботі було проведено розрахунок надійності, який показав, що інтенсивність відмови дорівнює  $0,64 * 10^{-6}$ , можна з впевненістю сказати, що пристрій буде працювати безвідмовно .

## ВИСНОВКИ

1. Проведений в роботі аналіз радіаційних методів рентгеноскопічного контролю якості виробів, дав можливість розробити задачі які ставляться перед відеопроцесором, призначеним для роботи в складі РТС промислового призначення.

2. Оскільки статистична обробка виконується в реальному часі, для реалізації підібрана сучасна елементна база в ролі якої виступає ПЛІС MAX V та STM32F405OG, характеристики яких дозволили реалізувати алгоритми роботи та обробки рентгенівського тіньового зображення на апаратному рівні.

3. Алгоритм статистичної обробки реалізується на апаратному рівні, тому у відеопроцесорі вдалося автоматизувати вибір часу експозиції, що забезпечило підвищення продуктивності контролю, а також можливість отримання цифрових рентгенограм з нормованим ступенем почорніння – це необхідно для їх подальшої обробки та архівування, як документу контролю якості виробів.

4. Зручний, та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс надає можливість ефективно застосовуватись оператором, що забезпечує зручне використання в області неруйнівного контролю якості виробів.

5. Використання мікроконтролера STM32F405OG, дає можливість зберігати рентгенівське зображення на переносній ПЗП у вигляді SD-card, а також дати можливість перенесення досліджуваних рентгенограм у комп'ютер по USB –інтерфейсу, для архівування та подальшої обробки.

6. У порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю розроблений відеопроцесор має меншу вартість, реалізує отримання якісних цифрових рентгенограм, а отже є дуже перспективним для широкого впровадження в телевізійних рентгенівських систем промислового призначення.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.В. Сухоруков - Неруйнівний контроль. Том 2. Ультразвуковий контроль 28 – 39 с.
2. Троїцький В.А. Короткий посібник по контролю якості зварних з'єднань. К.: Фенікс, 2006. 87 – 90 с.
3. В.В. Ключев - Неруйнівний контроль. Довідник в 7-ми томах. Том 3 Ультразвуковий контроль. – 156 с.
4. Белокуров И. П., Коваленко В. А. Дефектоскопия материалов и виробів. – К.: Техніка, 1989. – 192 с.
5. Денбновецкий С. В., Лецишин А. В., Михайлов С. Р. Високочутливі рентгенотелевізійні системи неруйнівного контролю на основі електроннопроменевих приладів// Електроніка та зв'язок. – Тематичний випуск «Проблеми електроніки», 2005 ч.1. – с. 72-81.
- 6 .А. С. №1300695, СССР, МКИ Н04N 5/76, 5/30. Прилад для накоплення електронного сигналу/ С. В. Денбновецкий, А. В. Терлецкий.
7. У.М.Кучерук. – Загальний курс фізики 2-ге вид., випр. – К.: Техніка, 2006. – 85 с.
8. Радіографічний контроль. Інформаційні аспекти Автори: В.И. Капустин, В.М. Зуєв, В.И. Іванов, А.В. Дуб, 63 с.
9. "Рентгенографічний контроль" <http://ua.tuev-dieks.com/services/technical-diagnosis/methods-of-survey/rentgenograficheskij-kontrol/>
10. "Рентгеноскопія" <http://www.medical-enc.ru/16/rentgenoskopia.shtml>
11. підручник "Фізика и біофізика", видання друге, 2013р. За В. Ф. Антонов, Козлова Е.К., Черниш А.М., 132 с.
12. «МЕДТЕХ». Прилад для реєстрації та формування рентгенівського зображення. Пат. РФ № 2130623 від 21.02.97
13. "Обладнання для неруйнівного контролю фірми Nikon Metrology" <http://www.sovtest.ru/news/publications/oborudovaniya-dlya-nerazrushayushchego-kontrolya-firmy-nikon-metrology/>

14. Денбновецкий С. В., Троїцкий В. А., Бєлий Н. Г., Гром В. С., Кузьмічова Н. В., Лєщишин А. В., Михайлов В. Н., Михайлов С. Р., Шутенко О. В. Оптимальна потужність дози випромінювання в рентгенотелевізійних системах промислової дефектоскопії // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 1989. – №2. – с. 43-49.

15. Михайлов С. Р., Відношення сигнал/шум в рентгенотелевізійних системах неруйнівного контролю, які працюють в режимі регульованої тривалості накопичення сигналів // Електроніка та зв'язок. – 1997. – №3, часть II. – с. 29-34.

16. Блінов Н. Н., Жуков Е. М., Козловський Е. Б., Мазуров А. И. Телевізійні методи обробки рентгенівських та гамма-зображень. – М.: Енергоатомвидав, 1989. – 200 с.

17. Гурвич А. М. Фізичні основи радіаційного контролю і діагностики. – М.: Енергоатомвидав, 1989. – 168 с.

18. Гершберг А. Е. Передавальні телевізійні трубки з внутрішнім фото-ефектом. – Л.: Енергія, 1973. – 256 с.

19. Грязін Г. И. Системи прикладного телебачення. – Політехніка, 2000р. – 227 с.

20. Lutha R., Rowlands J.A. Feasibility of a large area x-ray secsitive vidicon for medical fluoroscopy: signal and noice factors // Medical Physics. – 1997. – vol. 24, №5. – p. 609-619.

| Поз.<br>познач. | Найменування                     | Кіл.     | Примітка 126 |      |                                                                                            |                        |      |         |
|-----------------|----------------------------------|----------|--------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------|---------|
|                 | Мікросхеми                       |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DA1             | 74HC14A                          | 1        | SOIC-14      |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DA2,DA4         | REG1117                          | 2        | SOT-223      |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DA3             | AD9821                           | 1        | LQFP-48      |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DA5             | LM1881N                          | 1        | SOIC-8       |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DA6             | DAC900                           | 1        | SOIC-28      |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DD1,DD3         | K6R4008V1D-44                    | 2        | TSOP2-44     |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DD9,DD10        | K6R4008V1D-44                    | 2        | TSOP2-44     |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DD2             | TLV5624                          | 1        | SOIC-8       |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DD4             | LM809                            | 1        | SOT-23       |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DD5             | INTEL MAX V 5M1270Z              | 1        | TQFP-144     |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DD6             | STM32F4050G                      | 1        | TQFP-64      |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DD7             | CP2101                           | 1        | LQFP-32      |      |                                                                                            |                        |      |         |
| DD8             | ICL7660                          | 1        | SOIC-8       |      |                                                                                            |                        |      |         |
|                 |                                  |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
|                 |                                  |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
|                 | Транзистори, діоди, стабілітрони |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| VT1,VT3         | VT NPN BC846                     | 2        | SOT-23       |      |                                                                                            |                        |      |         |
| VT2             | VT PNP BC856                     | 1        | SOT-23       |      |                                                                                            |                        |      |         |
| VT5             | VT NPN BCP54                     | 1        | SOT-23       |      |                                                                                            |                        |      |         |
| VD2             | STAB 1V                          | 1        |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| VD3             | STAB 6 V                         | 1        |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| VD5             | VD SHOTTKI                       | 1        |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| VD6             | STAB 4.7 V                       | 1        |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| VD4,VD7         | LED                              | 2        |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
|                 | Конденсатори                     |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| C1,C2,C12       | SMD 0805 33 pF                   | 3        |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| C17,C27,C2      | SMD 0805 33 pF                   | 3        |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| C3              | EL35V 470 uF                     | 1        |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
|                 |                                  |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
|                 |                                  |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
|                 |                                  |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| Змн.            | Арк.                             | № докум. | Підпис       | Дата | МД.171.061М.004                                                                            |                        |      |         |
| Розроб.         | Волощенко В.В.                   |          |              |      | Додаток 1. Відеопроцесор для обробки рентгенотелевізійного зображення<br>Перелік елементів | Літ.                   | Арк. | Аркушів |
| Перевір.        | Терлецький                       |          |              |      |                                                                                            |                        | 1    | 3       |
| Т. Контр..      |                                  |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |
| Н. Контр.       | Жовнір М.Ф.                      |          |              |      |                                                                                            | НТУУ "КПІ", ФЕЛ, ДЕ-61 |      |         |
| Затверд.        | Писаренко Л.Д.                   |          |              |      |                                                                                            |                        |      |         |

| Поз.<br>познач. | Найменування         | Кіл.     | Примітка 127    |
|-----------------|----------------------|----------|-----------------|
| C5-C9           | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 4        |                 |
| C16,C18-        | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 4        |                 |
| C22, C25        | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 2        |                 |
| C31-C33,35      | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 4        |                 |
| C37,C38         | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 2        |                 |
| C42, C45        | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 2        |                 |
| C49,C51,C53     | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 3        |                 |
| C55, C57        | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 2        |                 |
| C60-C66         | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 7        |                 |
| C70, C71        | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 2        |                 |
| C73-C77         | SMD 0805 0.1 $\mu$ F | 5        |                 |
| C10             | SMD 1206 100 $\mu$ F | 1        |                 |
| C15,C21,C2      | EL35V 220 $\mu$ F    | 3        |                 |
| C23,C24,C3      | SMD 1206 1 $\mu$ F   | 3        |                 |
| C36,C39,C4      | SMD 1206 1 $\mu$ F   | 3        |                 |
| C43,C46,C4      | SMD 1206 1 $\mu$ F   | 3        |                 |
| C50,C52,C5      | SMD 1206 1 $\mu$ F   | 3        |                 |
| C56,C58,C6      | SMD 1206 1 $\mu$ F   | 3        |                 |
| C69,C72,C76     | SMD 1206 1 $\mu$ F   | 3        |                 |
| C81, C82        | SMD 1206 1 $\mu$ F   | 2        |                 |
| C44             | SMD 0805 20 pF       | 1        |                 |
|                 | <b>Резистори</b>     |          |                 |
| R1, R2          | SMD 0805 37.5        | 2        |                 |
| R3,R24          | SMD 0805 1K          | 2        |                 |
| R6, R22         | SMD 0805 510         | 2        |                 |
| R7,R18,R29      | SMD 0805 100         | 3        |                 |
| R8              | SMD 0805 220         | 1        |                 |
| R9              | SMD 0805 6K8         | 1        |                 |
| R10, R13        | Перемички по землі   | 2        |                 |
| R11             | SMD 0805 680K        | 1        |                 |
| R12,R30,R31     | SMD 0805 470         | 3        |                 |
| R14, R15        | SMD 0805 22          | 2        |                 |
|                 |                      |          |                 |
|                 |                      |          |                 |
| Змн.            | Арк.                 | № докум. | Підпис          |
|                 |                      | Дата     |                 |
|                 |                      |          | МД.171.061М.004 |
|                 |                      |          | Арк.            |
|                 |                      |          | 2               |

[illegible]



## ДОДАТОК 2

### ПРОГРАМНИЙ КОД ФУНКЦІОНУВАННЯ SD-КАРТИ

```

01.unsigned long address,i;
02.unsigned char c;
03.
04.init(); // ініціалізація периферії
05.if(SD_init()==0) // ініціалізація SD карти пам'яті
06.{
07.send_Uart_str(USART1,"init sd ok\n");
08.}
09.else
10.{
11.send_Uart_str(USART1,"init sd fail\n");
12.}
13.
14.send_Uart_str(USART1,"alex-exe.ru"); // виводимо повідомлення в UART
15.while(1)
16.{
17.send_Uart_str(USART1,"\n-----\n");
18.send_Uart_str(USART1,"Read or write sd card r/w = ");
19.c=getch_Uart(USART1); // читаємо байт з UART
20.while(getch_Uart(USART1)!=13){} // чекаємо вводу enter з UART
21.send_Uart_str(USART1,"\nPress enter address = ");
22.buff_clear(); // очистка буфера
23.address=read_int_uart(USART1); // читаємо число з UART, адреса
// сектора на sd карті
24.send_Uart_str(USART1,"\nAddress = ");
25.send_int_Uart(USART1,address); // виводимо для перевірки введене
// число
26.send_Uart(USART1,'\n');
27.if(c=='w') // перевірка на запис або зчитування
// карти пам'яті
28.{
29.send_Uart_str(USART1,"Press enter data blok (max 512B), to exit press en-
ter\n");
30.read_str_uart(USART1, Buff); // читаємо рядок с uart, закінчення
// enter
31.i=0;
32.while((i < 512)&&(Buff[i]!=0))i++; // шукаємо кінець текстового рядка
33.send_Uart_str(USART1,"Length text data = ");
34.send_int_Uart(USART1,i); // виводимо довжину тексту

```

```
35.send_Uart(USART1,'\n');
36.if(SD_WriteSector(address, Buff)==0)    // запис буфера на SD карту
37.{
38.send_Uart_str(USART1,"write sd ok\n");
39.}
40.else
41.{
42.send_Uart_str(USART1,"write sd fail\n");
43.}
44.}
45.else
46.{
47.if(SD_ReadSector(address, Buff)==0)    // зчитування SD карти в буфер
48.{
49.send_Uart_str(USART1,"read sd ok\n");
50.}
51.else
52.{
53.send_Uart_str(USART1,"read sd fail\n");
54.}
55.for(i=0;i < 512;i++)                    // вивід вмісту буфера в термінал
56.{
57.send_Uart(USART1,Buff[i]);
58.}
59.}
```