

УДК 621

Спеціалізований відео процесор для радіоскопічних систем промислового призначення

Городецький Б.М., Волощенко В.В., к.т.н., доц. Терлецький О.В.

Вступ

Підвищення якості продукції - одне з найбільш важливих науково-технічних і виробничих завдань у різних галузях промисловості: металургійна, автомобільна, авіаційна хімічна та інші. Для контролю якості виробів у вищезазначених галузях промисловості широко застосовують рентгеноскопічні методи неруйнівного контролю. При цьому якість виробів, що контролюються, визначається чутливістю апаратних засобів контролю якості виробів.

Останнім часом до якості виробів пред'являються все більш високі вимоги, що обумовлює необхідність підвищення роздільної здатності та контрастної чутливості рентгеноскопічних засобів контролю. Саме ці параметри рентгено-телевізійних дефектоскопічних установок визначені сучасними європейськими стандартами на апаратуру даного типу [1]. Для підвищення цих параметрів необхідно зменшити шуми рентгено-телевізійного каналу, що обумовлені флуктуаціями рентгенівських квантів на вході детектора рентгенівського випромінювання, шумами телевізійного каналу, що перетворює

тіньове рентгенівське зображення об'єкту в телевізійний відеосигнал, шумами квантування телевізійного відеосигналу в процесі перетворення його в цифрову форму (Рис.1).

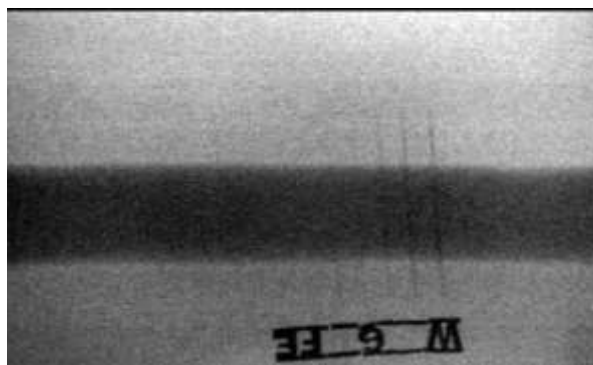


Рис. 1. Кадр рентгенотелевізійного сигналу без обробки.

Основна частина

Шуми рентгенотелевізійного каналу маскують дрібні елементи рентгенівського зображення, що в цілому обмежує чутливість радіаційного контролю якості виробів. Для підвищення чутливості рентгенотелевізійних засобів контролю якості виробів зазвичай застосовують статистичні методи обробки рентгенотелевізійного зображення [2]. Для цього в рентгенотелевізійних системах неруйнівного контролю використовують комп'ютерні технології обробки

рентгенотелевізійних зображень, наприклад, такі програмно-апаратні засоби, як «Відеорен», «Сова+», «Direcon-S01»[3] та інші. Ці програмно-апаратні комплекси реалізують велику кількість різноманітних функцій обробки рентгенотелевізійного зображення, але на практиці вони в основному використовуються для підвищення чутливості контролю якості виробів за рахунок статистичної обробки рентгенотелевізійного зображення. Статистична обробка рентгенотелевізійних зображень реалізується шляхом накопичення заданої кількості кадрів рентгено-телевізійного зображення та усереднення накопиченої інформації по кількості кадрів накопичення. При цьому відношення сигнал/шум на виході рентгено-телевізійної системи підвищується пропорційно $\sqrt{N_k}$ накопичення кадрів рентгено-телевізійного зображення. Окрім підвищення чутливості радіоскопічного контролю якості виробів використання комп'ютерних технологій обробки рентгено-телевізійного сигналу дає можливість отримати цифрову рентгенограму контрольованого виробу, як результат контролю виробу.

Але використання вищезазначених комп'ютерних комплексів в реальних виробничих умовах потребує вирішення ряду задач, пов'язаних з узгодженням параметрів відеосигналу рентгенотелевізійного каналу з динамічним діапазоном аналого-цифрового перетворювача на вході

комп'ютерних засобів обробки рентгено-телевізійного зображення, а також визначенням необхідної тривалості накопичення рентгенотелевізійного зображення, що залежить від потужності проникаючого рентгенівського випромінювання, ефективності рентгено-оптичного перетворювача, чутливості телевізійної передавальної камери, товщини та матеріалу виробу, що контролюється. Ці задачі доводиться вирішувати оператору в процесі контролю виробів, що потребує часу та знижує продуктивність та якість рентгеноскопічного контролю в цілому. Слід також зазначити, що використання комп'ютерних технологій обробки рентгенотелевізійного зображення в заводських умовах, а тим більше в польових умовах, не завжди є зручним. Окрім того, рентгенотелевізійна система контролю повинна забезпечувати задану чутливість контролю, бути функціональною і не виконувати ніяких зайвих функцій. Тільки в цьому випадку система контролю буде надійною, продуктивною та нею буде зручно користуватися. Це було покладене в основу розробки спеціалізованого апаратного відео процесора (Рис.2), яка проводиться в лабораторії індикаторних пристроїв кафедри «Електронні прилади та пристрої» факультету електроніки Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського».



Рис. 2. Спеціалізований відео процесор для рентгенотелевізійних систем неруйнівного контролю якості виробів

Використання сучасної елементної бази (мікропроцесорна техніка, програмована логіка) та сучасні комп'ютерні технології проектування дозволили реалізувати алгоритми статистичної обробки тіньового рентгенівського зображення в реальному масштабі часу на апаратному рівні. Окрім того, цифрова обробка рентгенотелевізійного зображення в процесі просвічування контрольованого виробу, дозволяє автоматизувати вибір тривалості експозиції, що забезпечує отримання цифрових радіограм з нормованим ступенем почорніння. Це є важливим для їх подальшої обробки та розшифрування. На рис. 3 представлена функціональна схема відео процесора, яка включає в себе систему синхронізації, аналоговий сигнальний процесор вхідного сигналу (ASP), цифровий сигнальний процесор (DSP), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), формувач вихідного композитного телевізійного сигналу (ФТС) і мікропроцесорну систему управління. Мікропроцесорна система управління реалізує основні режими роботи пристрою, а також вирішує завдання, пов'язані з

нормуванням вхідного телевізійного сигналу і визначенням оптимальної тривалості накопичення.

Аналоговий сигнальний процесор

Аналоговий сигнальний процесор ASP забезпечує оптимальне узгодження рівня і амплітуди вхідного відеосигналу з динамічним діапазоном 12-ти розрядного аналого-цифрового перетворювача. Він включає в себе відео підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення, схему фіксації рівня сигналу на вході АЦП і керуючі регістри, які пов'язані з керуючим контролером через стандартний послідовний інтерфейс SPI. Контролер визначає параметри відеосигналу, що надходить на вхід DSP, порівнює їх з граничними значеннями динамічного діапазону АЦП, визначає необхідне значення коефіцієнта підсилення і рівня чорного сигналу, і завантажує ці параметри в керуючі регістри ASP. При цьому вхідний відеосигнал автоматично вписується в динамічний діапазон АЦП, що і забезпечує його оптимальне перетворення в цифрову форму. Адаптація відеосигналу відбувається за допомогою аналогового сигнального процесора, який виконаний на основі однокристального АЦП AD9821. Для реалізації алгоритму доцільно використати мікроконтролер STM-32, а саме для визначення коефіцієнту підсилення та для того щоб підігнати амплітуду вхідного сигналу до величини динамічного діапазону АЦП. [4] STM 32 поєднує в собі дуже високу продуктивність, можливість

роботи в режимі реального часу, здатність цифрової обробки сигналів і низьке енергоспоживання. [5] STM 32 відрізняється від інших виробників напівпровідників прекрасним співвідношенням «ціна / функціонал»

при збереженні найвищих стандартів якості також важливим є підтримка файлової системи FAT32, що дозволяє зберігати дані упорядковано.

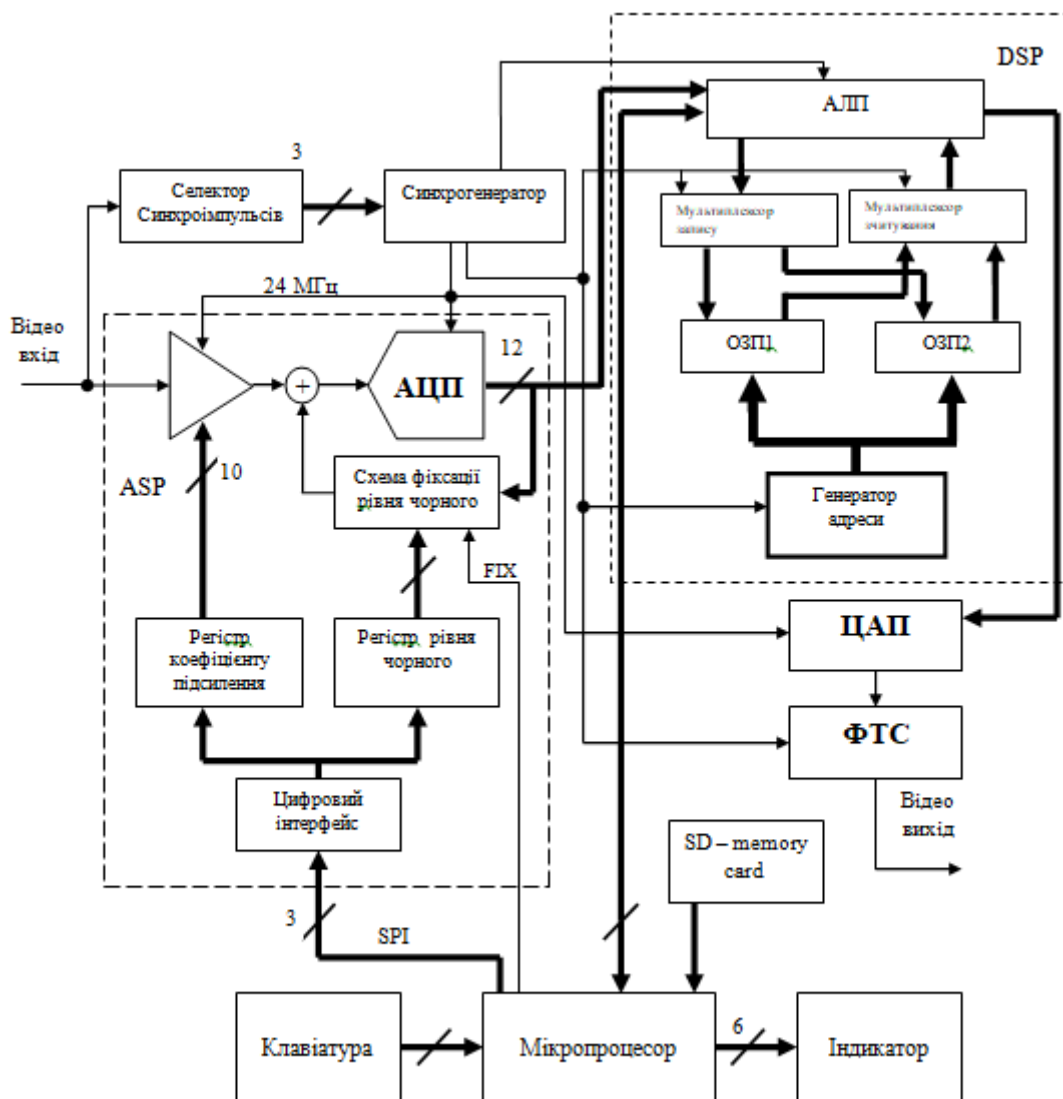


Рис. 3. Структурна схема відео процесора

Підсилення може бути обчислено за формулою $K(\text{dB}) = (0.0351 \times C)$, де $K(\text{dB})$ – коефіцієнт підсилення в dB, а C – число в діапазоні від 0 до 1023, занесене в реєстр коефіцієнта

підсилення. Змінити значення реєстра коефіцієнта підсилення можна за допомогою мікроконтролера по послідовному периферійному інтерфейсу SPI. Особливістю АЦП

мікросхеми AD9821 є те, що він розрахований на повний діапазон вхідної напруги від 0 до 2 В. Стандартна амплітуда відеосигналу зазвичай складає величину 1 В. Для перекриття повного динамічного діапазону АЦП необхідно підсилити вхідну напругу мінімум в 2 рази. При меншому коефіцієнті підсилення динамічний діапазон АЦП використовуватиметься не повністю.

Цифровий сигнальний процесор

Цифровий сигнальний процесор (DSP) містить арифметично-логічний пристрій (АЛП), контролер ОЗП і 2-х банковий оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП), в якому і здійснюється у цифровій формі інтегрування рентгенотелевізійного зображення. У даному пристрої обробка даних, що поступають з АЦП, виконується повністю в цифровій формі. Основні операції, які будуть виконуватися над сигналом, – це складання багаторозрядних чисел, порівняння з константою, записаною в регістр, мультиплексування потоків. Частота дискретизації вхідного відеосигналу складає 24 МГц, що відповідає періоду в 40,62 нс. За цей час необхідно виконати такі операції: рахувати з оперативної пам'яті двох байтне 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

жорстокі вимоги по швидкодії. Для успішної реалізації пристрою швидкодія апаратної частини повинна складати не більше 10-15 нс. Таку швидкодію можуть забезпечити мікросхеми програмованої логіки, які містять вбудовані помножувачі, схеми арифметичного переносу і великий об'єм оперативної пам'яті всередині кристалу. Основною перевагою програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) є велика кількість програмованих ресурсів, які дозволяють організувати паралельні обчислення, продуктивність яких може легко забезпечити обробку рентгенотелевізійного зображення в реальному масштабі часу. При цьому дуже важливим є можливість побудови на ПЛІС необхідної структури цифрового сигнального процесора. Наявність на кристалі ПЛІС необхідних компонентів і засобів конфігурації дозволяє реалізувати алгоритм обробки відеосигналу адекватний розв'язуваній задачі, що забезпечує високу ефективність обчислень. ПЛІС забезпечують можливість реалізації алгоритму цифрової обробки рентгенотелевізійного відеосигналу в реальному часі. Всі ці особливості разом з високою ступінню паралелізму ПЛІС забезпечують переваги ПЛІС над найшвидшими сигнальними процесорами в 500 і більше разів.[6] Оптимальним вибором за критеріями ціни та ресурсів є ПЛІС фірми INTEL MAX V. Крім трансиверів мікросхеми містять апаратні помножувачі і блоки вбудованого ОЗП. Також перевагою є

те, що для MAX V не потрібен тепловідвід, що спрощує дизайн друкованої плати, та зменшує вартість монтажу. Підтримка проектування ПЛІС MAX V забезпечується програмним пакетом Quartus Prime, який є у вільному доступі. 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.

Алгоритм інтегрування рентгено-телевізійного зображення здійснюється шляхом накопичення кадрів рентгено-телевізійного зображення в ОЗП. Процес накопичення контролюється мікропроцесорною системою управління. Після закінчення процесу інтегрування оброблене зображення з ОЗП через 10-ти розрядний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) і формувач телевізійного сигналу (ФТС) подається на вхід штатного телевізійного монітора рентгено-телевізійної установки. Оброблене рентгено-телевізійне зображення зберігається в ОЗП до початку наступного циклу інтегрування, який ініціюється натисканням відповідної кнопки на панелі управління відео процесора. Це дозволяє при вимкненому джерелі рентгенівського випромінювання зберігати на екрані телевізійного монітора рентгено-телевізійне зображення об'єкта, що контролюється.

Відео процесор забезпечує постійний рівень вихідного сигналу незалежно від рівня та амплітуди вхідного сигналу, що дозволяє варіювати в широких межах потужність дози рентгенівського випромінювання на вході детектора і коефіцієнт підсилення ASP. При цьому буде змінюватися тільки тривалість експозиції при накопиченні рентгено-телевізійного зображення, а рівень вихідного сигналу відео процесора буде незмінний, оптимально вписаний в динамічний діапазон телевізійного монітора. Тривалість інтегрування рентгено-телевізійного сигналу може змінюватися в діапазоні від 16 кадрів до 512 кадрів, що забезпечує досить ефективну фільтрацію шумів рентгено-телевізійного каналу дефектоскопічної установки. Таким чином, оператору не потрібно вирішувати складні завдання, пов'язані з визначенням тривалості експозиції, підбором потужності дози рентгенівського випромінювання для конкретного контрольованого виробу. Процесор сам підбирає параметри інтегрування рентгенівського зображення і видасть нормований за рівнем чорного і по амплітуді відеосигнал без характерних для рентгеноскопії флуктуаційних шумів рентгено-телевізійного каналу. За рахунок цього досягається істотне підвищення якості рентгено-телевізійного зображення, поліпшуються умови аналізу рентгено-телевізійного зображення контрольованого виробу, що, в свою чергу, призводить до суттєвого

підвищення чутливості і продуктивності радіаційного контролю якості виробів.

При переміщенні контрольованого виробу відносно детектора рентгенівського випромінювання відео процесор переводиться в режим прямого каналу передачі відео даних. У цьому режимі роботи мікропроцесор аналізує параметри вхідного відеосигналу, визначає необхідний ступінь корекції амплітуди і рівня вхідного сигналу і записує відповідні значення коефіцієнта підсилення і рівня чорного в регістри управління ASP. З виходу ASP нормовані відеодані, вже без накопичення в DSP, передаються через цифро-аналоговий перетворювач і формувач телевізійного сигналу (ФТС) на вихід відео процесора. В результаті на екрані телевізійного монітора оператор спостерігає нормоване по динамічному діапазону телевізійного індикаторного пристрою тіньове рентгенівське зображення контрольованого виробу. Ініціалізація режиму прямого каналу здійснюється шляхом натискання кнопки на панелі управління відео процесора. Коефіцієнт підсилення ASP відображається на екрані рідкокристалічного дисплея відео процесора.

Для перетворення аналогового відеосигналу в цифрову форму використаний 12-ти розрядний. Реалізований рівень квантування визначає величину або ступінь втрати інформації при аналого-цифровому перетворенні відеосигналу вихідного

рентгено-телевізійного зображення. Чим менше рівень квантування, тим більше інформації зберігається при перетворенні відеосигналу в цифрову форму і тим більшою мірою цифрове рентгенотелевізійного зображення може бути за якістю наближена до якості рентгенограми на рентгенівській плівці. Це виявляється дуже важливим і для реалізації режиму накопичення рентгенотелевізійного зображення в цифровій формі, а також проявляється при подальшій комп'ютерній обробці цифрової рентгенограми.

Відео процесор має вбудований USB - інтерфейс для введення рентгенограми контрольованого виробу в персональний комп'ютер (PC). Ініціалізація цього режиму роботи відео процесора здійснюється через графічний інтерфейс спеціального програмного забезпечення «Direcon-S01» (Рис.4), яке встановлюється на звичайний персональний комп'ютер. Взаємодія відео процесора зі спеціальним програмним забезпеченням реалізується за допомогою стандартного USB-драйвера операційної системи сімейства Windows. Ця функція відео процесора відкриває можливість реалізації сучасних комп'ютерних технологій для обробки та архівування рентгенограм, а також забезпечує можливість реалізації автоматизованих баз даних рентгенотелевізійного контролю якості виробів. Відео процесор може поставлятися з програмним забезпеченням «Direcon-S01» для

комп'ютерної обробки та архівування рентгенограм. установки.

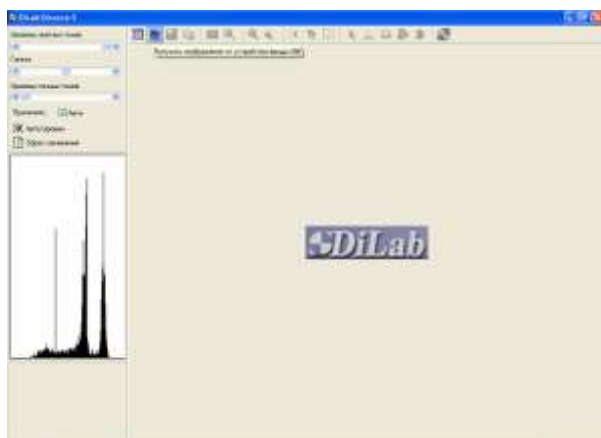


Рис4. Графічний інтерфейс програмно-апаратного комплексу «Direcon-S01»

Відео процесор може ефективно працювати у складі як стаціонарних, так і мобільних рентгенотелевізійних установок, що забезпечує можливість модернізації діючого парку рентгено-телевізійної апаратури даного типу. Причому модернізація рентгенотелевізійної дефектоскопічної установки шляхом включення до її складу відео процесора не вимагає ніяких додаткових переробок штатного рентгено-телевізійного обладнання, так як вхідні кола відео процесора розраховані на підключення стандартного композитного телевізійного сигналу рентгено-телевізійної установки, а на виході відео процесора після обробки теж формується стандартний композитний телевізійний відеосигнал. Це забезпечує можливість виведення обробленого рентгено-телевізійного зображення контрольованого виробу на штатний телевізійний монітор рентгено-телевізійної дефектоскопічної

установки. На рис. 5 представлена структурна схема рентгено-телевізійної дефектоскопічної установки, до складу якої включено відео процесор. Телевізійний відеосигнал надходить на відеовхід відео процесора, який реалізує в цифровому вигляді на апаратному рівні алгоритми обробки рентгенотелевізійного зображення в процесі дефектоскопічного контролю якості виробу.

Відео процесор реалізує два основних режими обробки рентгенотелевізійного зображення. Перший режим призначений для перегляду динамічних фрагментів рентгенотелевізійного зображення, а також використовується при позиціонуванні контрольованого виробу відносно детектора рентгенівського випромінювання. У цьому режимі вхідний відеосигнал автоматично нормується за амплітудою і рівнем, і передається на відео контрольний пристрій без інтегрування. Другий режим роботи реалізує алгоритм цифрової регульованої експозиції тіньового рентгенівського зображення контрольованого виробу. Цей режим призначений для обробки рентгенотелевізійного зображення контрольованого виробу, який знаходиться в статичному положенні. Інтегрування рентгенотелевізійного сигналу практично повністю прибирає нестаціонарні шуми рентгено-телевізійного каналу і забезпечує підвищення чутливості дефектоскопічного контролю. При

цьому мікропроцесорна система оптимальну для поточних умов управління контролює процес контролю тривалість експозиції. інтегрування і автоматично визначає

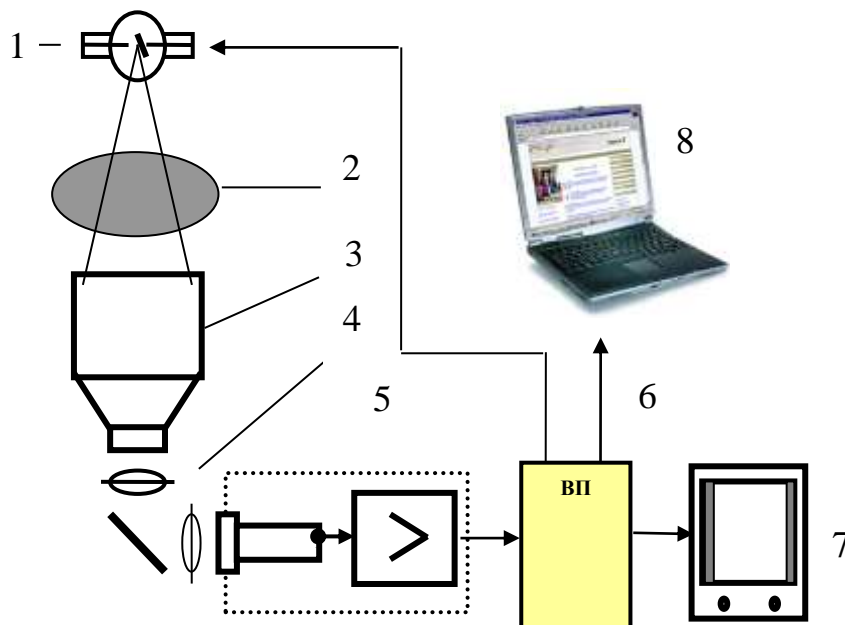


Рис.5. Схема підключення відеопроцесора у складі устаткування рентгенотелевізійної дефектоскопічної установки.

- 1 – джерело рентгенівського випромінювання;
- 2 – об'єкт, що контролюється;
- 3 – рентгено-оптичний перетворювач;
- 4 – об'єктив;
- 5 – телевізійна передавальна камера;
- 6 – відео процесор;
- 7 – телевізійний монітор;
- 8 – комп'ютер обробки рентгенограм рентгенограмм.

Дослідний зразок відео процесора пройшов попередні випробування в складі рентгено-телевізійної дефектоскопічної установки, де в якості детектора рентгенівського випромінювання використовувався РЕОП, а в якості датчика телевізійного сигналу використовувалася телевізійна камера на основі ПЗЗ-сенсора зображення. Без цифрової обробки рентгенотелевізійного зображення

рентгено-телевізійна дефектоскопічна установка при контролі алюмінію завтовшки 20 мм забезпечувала чутливість контролю 2.5%. При цьому зображення зварного шва і дефектометрів спостерігалися на тлі шумів рентгенотелевізійного каналу, які значно перевершували за рівнем корисний сигнал (Рис.1).

Обробка рентгенотелевізійного сигналу відео процесором дозволила практично повністю прибрати з

зображення флуктуаційні шуми рентгенотелевізійного каналу і отримати при тих же умовах контролю чутливість контролю 0,7%, що вже впритул наближається до чутливості контролю з використанням рентгенівської плівки (Рис.5).

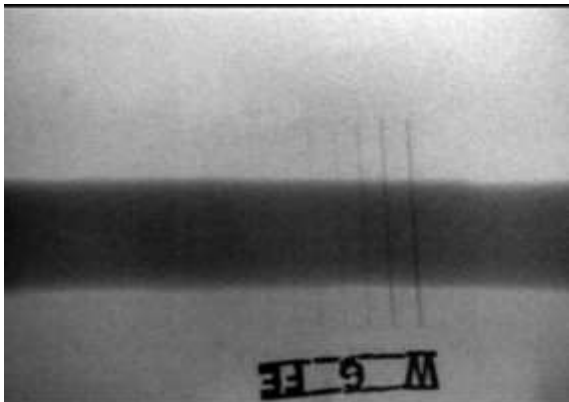


Рис.5. Рентгенограма виробу після обробки відео процесором

Висновки

1. Представлений відео процесор у складі радіоскопічної системи промислового призначення реалізує апаратними засобами алгоритм цифрової статистичної обробки рентгенотелевізійного зображення в реальному масштабі часу шляхом інтегрування рентгенотелевізійного зображення протягом регульованого часу експозиції, що забезпечує суттєве підвищення чутливості контролю якості виробів.
2. Відео процесор в реальних умовах проведення радіаційного контролю якості виробів забезпечує після обробки рентгенотелевізійного зображення контрольованого
- об'єкта запис цифрової рентгенограми в ОЗУ, що дозволяє проводити аналіз цифрової рентгенограми контрольованого виробу при вимкненому джерелі рентгенівського випромінювання. Це дозволяє істотно знизити витрати на рентгенотелевізійний контроль, а так само продовжити термін служби обладнання рентгенотелевізійної дефектоскопічної установки.
3. Можливість передачі цифрових рентгенограм в середовище персонального комп'ютера через стандартний USB - порт дозволяє реалізувати комп'ютерні технології обробки зображення та автоматизованої розшифрування цифрових рентгенограм, а так само забезпечує вирішення дуже важливого завдання — створення електронної бази даних рентгенограм радіаційного контролю якості виробів.
4. Відео процесор розрахований на стандартний композитний телевізійний вхідний сигнал і формує на виході теж стандартний телевізійний сигнал, що дозволяє досить просто модернізувати діючі рентгенотелевізійні дефектоскопічні установки з метою підвищення чутливості радіаційних методів контролю якості виробів.

Література

1. В.В. Ключев. т.1.: Кн. 2.: Ф.Р. Соснин. Радиационный контроль. - 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2006. – 560 с.
2. О.И. Кучеренко, А.С. Подосельник, А.В.Терлецкий. Видеопроцессор для записи и обработки фрагментов рентгенотелевизионных изображений // Электроника и связь. 2001. N 13. С. 40-42.
3. А.В. Терлецкий, О.И. Кучеренко, А.С. Подосельник, Н.Г. Белый. Цифровое устройство "Direcon D01" для регистрации, обработки и архивирования информации детекторов радиационного излучения. Сб. "Неруйнінівний контроль та технічна діагностика. Матеріали конференції.", УТ НКТД, 2003. – с. 165-168.
4. Джафер Меджахед// Новсоти електроніки, 2011 рік, випуск 2 ст 3 «STM32: эпоха 32-битных микроконтроллеров наступила»
5. STM32 32-bit ARM Cortex MCUs// http://www2.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html?querycriteria=productId=SC1169
6. Клайв Максфилд. Проектирование на ПЛИС.Архитектура, средства и методы – 2015 – С. 21.