

Власник документу:  
Бевза Олег Миколайович

ID перевірки:  
1004035739

Дата перевірки:  
15.06.2020 02:38:30 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
15.06.2020 02:59:01 EEST

ID користувача:  
90740

Назва документу: 2020-bachelor-EDD\_Kovalov\_renthenoteleviziyna\_ustanovka\_fch

ID файлу: 1004048814 Кількість сторінок: 24 Кількість слів: 8655 Кількість символів: 65766 Розмір файлу: 207.50 KB

## 17.6% Схожість

Найбільша схожість: 9.67% з джерело бібліотеки. ID файлу: 1003270779

10% Схожість з Інтернет джерелами

32

Page 26

16.6% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту

114

Page 26

## 0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

## 0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

## Підміна символів

Заміна символів

7

Денис КОВАЛЬОВ

**Мікроконтролерна система керування скануючою рентгенотелевізійною установкою****АНОТАЦІЯ**

В дипломному проєкті представлено огляд науково-технічної літератури по сучасним системам неруйнівного радіаційного контролю. Показано перспективи використання скануючих пристроїв на основі малоформатних плоскопанельних рентгенівських детекторів. Розроблено конструкція та структурна схема скануючої рентгенотелевізійної установки на основі малоформатного плоскопанельного детектора. Проведено розробку мікроконтролерної системи керування скануючою рентгенотелевізійною установкою, включаючи розробку програмного забезпечення.

Експериментально визначено, що макет портативної рентгенотелевізійної установки забезпечує отримання повноформатних знімків до 25 см при цифровому зшиванні малоформатних рентгенівських зображень з точністю до 20 мкм при товщині алюмінію до 3 мм. При збільшенні товщини контрольованих зразків до 2,5 мм (сталь) і до 5 мм (алюміній), точність зшивання зменшується до 100 мкм.

**ANNOTATION**

The diploma project presents a review of scientific and technical literature on modern systems of non-destructive radiation control. Prospects for the use of scanning devices based on small - format flat - panel X - ray detectors are shown. The design and structural scheme of the scanning X-ray television installation on the basis of a small-format flat-panel detector are developed. The development of a microcontroller control system for a scanning X-ray television installation has been carried out, including software development.

It has been experimentally determined that the model of a portable X-ray television system provides full-format images up to 25 cm with digital stitching of small-format X-ray images with an accuracy of up to 20  $\mu\text{m}$  with an aluminum thickness of up to 3 mm. When increasing the thickness of the controlled samples to 2.5 mm (steel) and up to 5 mm (aluminum), the accuracy of crosslinking decreases to 100  $\mu\text{m}$ .

**ВСТУП**

Сучасний огляд приладів та систем рентгенівського неруйнівного контролю дефектів показав що існує необхідність переходу з використання плівок на використання методів що дозволяють зберігати інформацію у електронному вигляді. При використанні одноразових радіографічних плівок, а також напівпровідникових селенових пластин та запам'ятовуючих пластин з фотостимулюючою пам'яттю необхідні тривалі операції експортування, обробки та зчитування інформації. Для підвищення продуктивності за зниження вартості радіаційного контролю необхідно перестати використовувати проміжні носії впроваджуючи цифрові технології отримання, обробки та аналізу зображення. Метод радіаційного контролю з використанням цифрових технологій та багатoelementних напівпровідникових детекторів має назву цифрова або флеш радіографія [1-3]. При використанні цифрової радіографії

іонізуюче випромінювання пройшовши через контрольований об'єкт за допомогою електронних засобів перетворюється в масив електричних сигналів, які після цього оцифровуються, обробляються та використовуються при формуванні цифрового зображення контрольованого об'єкта. Дане цифрове зображення може формуватися у реальному часі та відображати його внутрішню структуру.

Для запровадження переходу з радіографічних плівок на цифрову радіографію, а саме на малогабаритний ПЗЗ сенсор необхідно забезпечити отримання стандартного промислового знімку. Цифрова рентгенографія дозволить отримати якісне зображення на екрані комп'ютера практично миттєво, зменшить дозу опромінювання радіацією на 70-90%. При цьому зникає необхідність процесу хіміко-фотографічної обробки та з'являється можливість зберігання необмеженої кількості цифрових знімків. Через високе розповсюдження малогабаритних сенсорів у медицині суттєво знизилась їх вартість. Твердотільний стоматологічний перетворювач завдяки малим габаритам, вазі та низькому електроспоживанню може використовуватись для роботи в обмеженому просторі.

Для адаптування роботи стоматологічного перетворювача у системі радіаційного контролю необхідно розробити систему механічного сканування, що дозволить отримати декілька окремих зображень. Використання програмного зшивання окремих малоформатних фрагментів рентгенівських зображень дозволить підвищити розміри контрольованої зони.

## **1. ОГЛЯД СИСТЕМ РАДІАЦІЙНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ**

Рентгенівські системи неруйнівного контролю складаються з трьох основних частин: джерела рентгенівського випромінювання, детектора і досліджуваного об'єкта.

Основні типи систем, що використовуються для формування тінювого рентгенівського зображення зображені на схемі рис. 1.1 [4].

Рис. 1.1. Класифікація систем радіаційного неруйнівного контролю

В системах з запам'ятовуванням зображення радіаційне зображення отримується та запам'ятовується на будь-якому носії (радіографічна плівка, електрорадіографічна пластина, запам'ятовуюча пластина з фотостимульованою пам'яттю). Такі системи можуть виконувати контроль лише нерухомих об'єктів. Системи реального часу без проміжних носіїв інформації дозволяють виконувати контроль нерухомих і рухомих об'єктів в реальному часі.

### **1.1 Системи із проміжними носіями інформації**

#### **1.1.1 Системи на основі рентгенівської плівки**

Радіографічна плівка до сих пір являється найбільш широко використовуваним детектором іонізуючого випромінювання. Зображення контрольованого об'єкта формується на плівці, що складається з прозорої основи з нанесеним на неї желатином з суспензією кристалів галогеніду срібла (AgBr). Після просвічування проводиться хімічна обробка плівок і зчитування інформації, комп'ютерна обробка інформації, утилізація плівок з ціллю регенерації срібла. До переваг плівкової радіографії можна віднести високу

відносну чутливість контролю (1%) в широкому діапазоні товщин контрольованих об'єктів, високу роздільну здатність (20 пар лін./мм), великий розмір робочого поля.

Радіографічні плівки ділять на два класи: плівки призначені для використання без підсилюючих екранів та плівки для використання з підсилюючими екранами.

Посилюючі екрани поділяють на металеві, флуоресцентні та флуорометалічні. Підсилює дію металевих екранів засноване на додатковому експонуванні плівки вторинними електронами, вибитими іонізуючим випромінюванням з тонкої свинцевої або свинцево-олов'яної фольги металевого екрану. Ці електрони практично повністю поглинаються плівкою, підвищуючи її щільність почорніння. Коефіцієнт посилення металевих екранів, рівний відношенню тривалості експозиції без екрану і з ним, може досягати до 2 - 2,5. Спільно з плівкою зазвичай використовують пару екранів, розміщуючи їх по обидва боки плівки.

Підсилююча дія флуоресцентних екранів ґрунтується на перетворенні люмінофором екрану частини іонізуючого випромінювання в оптичне. Значення коефіцієнта посилення таких екранів досягає декількох десятків і більше, відповідно значно скорочується час експозицій. Однак значне зменшення часу експозиції при використанні флуоресцентних екранів супроводжується втратою роздільної здатності системи екран-плівка. Основною причиною цього є великий розмір зерна люмінофора. Середній розмір зерна безекранної плівки становить близько 0,5 мкм, екранної плівки - 1-1,5 мкм, а розмір зерна флуоресцентних екранів дорівнює близько 10 мкм.

Найбільш поширені флуоресцентні екрани на основі вольфрамату кальцію  $\text{CaWO}_4$  зараз витісняються більш ефективними екранами на основі оксисульфідів гадолінію, лантану, ітрію. Використовуються вони в комплекті що складається з двох екранів - переднього і заднього. Зазвичай задній екран має велику товщину.

Флуорометалічні екрани поєднують в собі шар свинцевої фольги з шаром люмінофора, тобто є комбінацією металевих і флуоресцентних екранів. Такі екрани дають істотне зниження часу експозиції плівки, незначно погіршуючи її роздільну здатність.

Посилюючі екрани разом з плівкою мають вигляд гнучких світлонепроникних касет з кишнями для маркованих знаків, еталонів. Просторова роздільна здатність радіографічних систем екран-плівка становить 8-10 пар лін./мм.

Технологічний процес плівковою радіографії включає наступні процедури: зарядка касет, просвічування контрольованого об'єкта і експонування плівки, хімічна обробка плівки, її сушка, аналіз результатів за допомогою негатоскопа, комп'ютерне сканування, утилізація відходів. Тому плівкова радіографія найбільш трудомістка, має малу продуктивність і високу вартість. Обсяги застосування плівковою радіографії з кожним роком зменшуються в зв'язку з появою і вдосконаленням нових систем отримання радіаційних зображень.

### 1.1.2 Електрорадіографія

Багато надій покладалося на електрорадіографію або ксерорадіографію [5]. Під час проведення електрорадіографічного контролю використовують напівпровідникові селенові пластини. Ці пластини складаються з металевої підкладки, до складу якої входить алюміній. На неї нанесено шар фотонапівпровідника - аморфного селену. Його товщина - 100-500 мкм. Цей процес проходить у вакуумних умовах за допомогою термічного випаровування.

Існує декілька етапів у процесі отримання електрорадіограми. Щоб додати чутливості пластині з напівпровідниковим шаром, на поверхню шару наноситься електричний заряд, який рівномірно розповсюджується по поверхні. До електродів, що розташовані зверху над пластиною, проводиться висока напруга (5-7 кВ). У повітряному просторі між шаром селену і електродами виникає коронний розряд. На селеновому шарі осідають іони повітря, утворені в процесі розряду. На поверхню цього шару може бути завдано позитивний чи негативний потенціал щодо підкладки, в залежності від полярності напруги, що подається на електроди. Пластину прикривають світлонепроникним кожухом після того, як вона зарядилася.

За допомогою іонізуючого випромінювання, що пройшло скрізь контрольований об'єкт, здійснюється експонування зарядженої пластини. Випромінювання генерує електронно-діркові пари, що є вільними носіями заряду, і зменшує його електричний опір, взаємодіючи з селеновим шаром. Наслідком зменшення опору є нейтралізація заряду, що спрямували на шар. Нейтралізація заряду в першому наближенні пропорційна інтенсивності випромінювання, що взаємодіє з пластиною. Результатом є те, що на поверхні фотонапівпровідникового шару утворюється приховане електростатичне зображення, яке проявляється при запиленні поверхні селенового шару. Запилення відбувається за допомогою дрібнодисперсного зарядженого порошку - електрографічного проявника. Інтенсивність осідання порошку на пластині також пропорційна значенню залишкового заряду.

Після того, як отримали проявлене видиме порошкове зображення, його переносять на інший носій, який використовують для аналізу і зберігання електрорадіограми. Зазвичай для цього беруть папір. Так само, як зображення на плівці, електрорадіографічне зображення можна відсканувати, обробити та проаналізувати за допомогою комп'ютерних програм.

### 1.1.3 Комп'ютерна радіографія на основі запам'ятовуючих пластин

У комп'ютерній радіографії, щоб отримати зображення, застосовуються спеціальні запам'ятовуючі пластини багаторазового користування [6]. Щоб зображення запам'ятовувалось, в пластині використаний люмінофорний шар з фотостимульованою пам'яттю. Це досить складна хімічна сполука. Найчастіше використовують сполуки типу  $\text{BaFBr}_x\text{I}_{1-x}:\text{Eu}^{2+}$ .

Під час експонування розташованої позаду контрольованого об'єкта пластини, електрони всередині шару з фотостимульованою пам'яттю збуджуються під дією іонізуючого випромінювання і захоплюються на енергетичні рівні (пастки), де можуть залишатися досить тривалий час.

Цю пластину після експонування розміщують в спеціальному сканері.

Там вона сканується лазерним пучком [7]. На рис. 1.2 показано схему процесу сканування запам'ятовуючої пластини і отримання цифрового зображення. Під час сканування пластини лазерним пучком електрони вивільняються з пасток. Цей процес супроводжується емісією видимого світла. Довжина його хвилі відрізняється від довжини хвилі випромінювання скануючого лазера. Це світло збирається фотоприймачем (фотопомножувачем), а потім перетворюється в електричний сигнал. Після його посилення і аналого-цифрового перетворення на комп'ютері формується цифрове зображення контрольованого об'єкта та виводиться на екран монітора.

Рис. 1.2. Схема процесу сканування запам'ятовуючої пластини та отримання цифрового зображення: 1 – лазер; 2 – оптична система формування лазерного пучка; 3 – дзеркало; 4 – фотопомножувач; 5 – фільтр; 6 – оптична система; 7 – запам'ятовуюча пластинка

Як було зазначено раніше, на запам'ятовуючій пластині під час її експонування формується приховане зображення. Оскільки його зчитування можливе лише з використанням комп'ютерної техніки, то за допомогою таких систем радіаційний контроль отримав назву комп'ютерної радіографії. Запам'ятовуючі пластини відрізняються від радіографічної плівки тим, що їх можна використовувати кілька тисяч разів, не втрачаючи якості. Пластини можуть поєднуватися з джерелами іонізуючого випромінювання, що мають енергію від 10 кеВ до 20 МеВ. Це можуть бути рентгенівські апарати безперервної дії і імпульсні, Бетатрон, радіоізотопні джерела [8].

Запам'ятовуючі пластини є гнучкими. Подібно плівці, вони можуть приймати форму контрольованого об'єкта. Хімічна обробка плівки виключена з процесу комп'ютерної радіографії, тому щоб отримати зображення потрібно почекати всього лиш 1-2 хвилини. Зображення зберігаються в електронному вигляді. В подальшому вони можуть піддаватися цифровій обробці з метою поліпшення виявлення дефектів.

Комп'ютерна радіографія краща, ніж плівкова радіографія по динамічному діапазону. Це дозволяє здійснювати контроль об'єктів з великим перепадом товщини за одну експозицію.

Комп'ютерна радіографія забезпечує відносну чутливість контролю, порівнянну з плівковою радіографією. Крім цього вона також забезпечує роздільну здатність до 20 пар лин./мм. Недоліком такої системи є те, що вартість комплексу обладнання для комп'ютерної радіографії є досить високою. Також до недоліків можна віднести неможливість виконувати контроль у реальному часі.

### 1.2 Системи реального часу

Системи реального часу без проміжних носіїв дозволяють виконувати радіаційний контроль як нерухомих, так і рухомих об'єктів в реальному часі. Вони підрозділяються на системи непрямого перетворення і системи прямого перетворення.

У системах непрямого перетворення тіньове радіаційне зображення за допомогою скінтіляційних екранів перетворюється спочатку в світлове, яке потім перетворюється в електричний сигнал. Далі електричний сигнал використовується для формування вихідного зображення системи неруйнівного

контролю. У системах прямого перетворення тінювий радіаційне зображення безпосередньо перетворюється в електричний сигнал, який використовується для формування вихідного зображення.

Відсутність проміжних носіїв інформації, витратних матеріалів, додаткового обладнання та операцій, з ними пов'язаних, знижує витрати на радіаційний контроль за допомогою таких систем і значно підвищує його ефективність.

#### 1.2.1 Скануючі лінійні детектори

Контроль великогабаритних об'єктів, таких як багаж, ручні поклажі, посылки, контейнери, транспортні засоби, здійснюється за допомогою лінійних детекторів. Ці детектори працюють за принципом сканування [9]. Такі перетворювачі є лінійкою детекторів або прямого перетворення (наприклад, типу CdTe, CdZnTe і ін.), або непрямого перетворення рентгенівського випромінювання (типу сцинтилятор - кремнієвий фотодіод).

У такому випадку реєстрація рентгенівських квантів відбувається за рахунок їх перетворення в сцинтиляторі на видиме світло. В подальшому відбувається детектування цього світла фотодіодом. В таких системах зображення формується в результаті просвічування вузьким в'ялових пучком випромінювання контрольованого об'єкта. Цей пучок рухається з постійною швидкістю відносно детектора. Розмір і просторова роздільна здатність скануючої лінійки визначаються кількістю і розміром детекторів (каналів), що входять до неї. Їх кількість може складати 320, 512, 640, 1024, 2048 і більше. Скануючі системи на основі лінійки детекторів мають свої переваги над системами, що згадувалися раніше [10,11]:

- усувається вплив неінформативно розсіяного випромінювання на якість цифрового зображення;
- лінійки детекторів можуть мати довжину в кілька метрів. Це дозволяє сканувати об'єкти великих розмірів. Розмір окремого детектора становить до 50 мкм;
- широкий динамічний діапазон (більше 7000);
- можливість виготовлення таких лінійок, що повторюють специфічні форми об'єкта, наприклад, автомобільних шин.

Відносно джерела рентгенівського випромінювання і лінійного детектора об'єкт переміщується з постійною швидкістю. Результатом стає те, що об'єкт сканується вузьким в'ялових пучком рентгенівського випромінювання. При цьому рентгенівське зображення об'єкта через підрядник реєструється лінійним детектором, оцифровується та передається до комп'ютера. За рахунок значного зменшення це зображення потрапляє на детектор розсіяного випромінювання. Такі системи дозволяють отримувати рентгенівські зображення високої якості при малих дозах випромінювання.

#### 1.2.2 Рентгенотелевізійні системи на основі рентгенівських електронно-оптичних перетворювачів

У таких системах перетворювачем рентгенівського випромінювання в видиме є РЕОП, який одночасно виконує функції підсилювача яркості зображення.

Рентгенівський електронно-оптичний перетворювач являє собою електровакуумний прилад із залишковим тиском  $10^{-7}$  мм рт. ст., схема якого наведена на рис. 1.3. На вході РЕОП розташований екранно-катодний вузол, що складається з сцинтиляційного екрану 1 і знаходиться з ним в оптичному контакті фотокатода 2. Екран 1 перетворює тіньове рентгенівське зображення у видиме. Фотокатод 2 під дією світлових фотонів за рахунок зовнішнього фотоефекту випускає електрони, які прискорюються і фокусуються електронно-оптичною системою РЕОП. Електронно-оптична система утворена електродами 3, 4 і 5, на які відносно екранно-катодного вузла подаються певні високі напруги. Прискорені і сфокусовані електрони бомбардують вихідний екран 6, виготовлений з дрібнозернистого люмінофора і розташованого на внутрішній стороні вихідного вікна РЕОП. В результаті такої бомбардування електронами люмінофорний екран 6 перетворює електронне зображення на видиме зображення високої яскравості. Перетворення вхідного рентгенівського зображення в вихідний супроводжується зменшенням його розміру приблизно в 10 разів. Таким чином, в РЕОП має місце потрійне перетворення зображення: рентгенівського в видиме, видимого в електронне і електронного знову в видиме.

Рис. 1.3. Рентгенівський електронно-оптичний перетворювач: 1 – сцинтиляційний екран; 2 – фотокатод; 3, 4 і 5 – електроди електронно-оптичної системи; 6 – вихідний екран; РВ – рентгенівське випромінювання

Діаметр робочого поля різних типів РЕОП становить від 120 до 400 мм. Діаметр вихідного екрану складає 20, 25, 30 або 35 мм. Вхідні сцинтиляційні екрани у сучасних РЕОП виготовляють в основному з йодиду цезію (CsI). Для поліпшення взаємного спектрального відповідності фотокатода і екрану CsI в якості активатора в нього вводять натрій (Na).

Зображення, сформоване на вихідному екрані РЕОП, за допомогою оптичної системи переносять на вхід перетворювача світло-сигнал телевізійної камери. В якості перетворювачів світло-сигнал в сучасних телевізійних камерах застосовуються матриці на основі приладів із зарядним зв'язком (ПЗЗ-матриці), а також КМОП-сенсори. Електричний відеосигнал з виходу телевізійної камери подають на телевізійний монітор, на якому відтворюється рентгенотелевізійного зображення контрольованого об'єкта, а також в комп'ютер для обробки, аналізу та архівування зображень.

Рентгенотелевізійні системи на основі РЕОП та телевізійної камери широко застосовуються для неруйнівного контролю об'єктів, що рухаються зі швидкістю до 3 м/хв. Відносна чутливість контролю таких систем становить 2-3%, роздільна здатність - від 3-х до 5 пар лін./мм.

Недоліками систем на основі РЕОП є висока вартість, великі габарити і, відносно невеликий розмір робочого поля, чутливість до вібрацій і ударів.

### 1.2.3 Рентгенотелевізійні системи «рентгенівський екран-камера»

Такі системи мають ряд переваг перед системами на основі РЕОП: можливість зміни сцинтиляційного екрану, що дозволяє змінювати розмір робочого поля і інші параметри системи; простота конструкції; малі габарити і

вага; низька вартість і ін. Схема рентгенотелевізійної системи «рентгенівський екран – камера» приведена на рис. 1.4.

Рис. 1.4. Схема рентгенотелевізійної системи "рентгенівський екран – камера"

Через низьку яскравості світіння сцинтиляційних екранів в телевізійних камерах таких систем необхідно застосовувати високочутливі ПЗЗ-матриці [12]. Придатні, наприклад, ПЗЗ-матриці з мікролінзами фірми Sony (технологія EXview HAD CCD). Для підвищення відносної чутливості контролю та зменшення шумів на зображенні застосовують режим тривалого накопичення зображень на ПЗЗ-матриці [13]. Переведення ПЗЗ-матриць в режим тривалого накопичення зображень, поряд з підвищенням чутливості, дозволяє використовувати для просвічування об'єктів малогабаритні імпульсні рентгенівські апарати [14]. Збільшення можливих тривалостей накопичення зображень можливо за рахунок охолодження ПЗЗ-матриць за допомогою елементів Пельтьє.

Відносна чутливість контролю рентгенотелевізійних систем «сцинтилятор-ПЗЗ» відповідає чутливості плівкової радіографії. Роздільна здатність таких систем залежить від роздільної здатності екрану і ПЗЗ-матриці, а також розміру робочого поля та становить від 2 до 10 пар лін./мм.

Для збільшення розміру робочого поля і роздільної здатності таких систем необхідно застосовувати ПЗЗ-матриці великих розмірів з великою кількістю пікселів, що призводить до збільшення габаритів, ваги та вартості таких систем. Збільшення габаритів і вартості таких систем обумовлена також складністю виготовлення світлосильних об'єктивів для ПЗЗ-матриць великих розмірів.

Для подолання зазначених труднощів було запропоновано зчитувати зображення з сцинтиляційного екрану декількома ПЗЗ-матрицями (від 4 до 88). Кожна ПЗЗ-матриця (сенсор) формує часткове (парціальний) зображення. Зображення від кожного окремого сенсора при обробці зшиваються і формується результуюче зображення об'єкта. Така багатосенсорна технологія дозволила створити відносно недорогі і оптимальні за параметрами рентгенівські детектори [15].

#### 1.2.4 Рентгенотелевізійні системи на основі плоскопанельних детекторів

В останні роки розроблені плоскопанельні матричні детектори іонізуючого випромінювання на основі напівпровідникових структур. В детекторах непрямого перетворення (типу «сцинтилятор-напівпровідник») використовується проміжне перетворення іонізуючого випромінювання в видиме. В детекторах прямого перетворення іонізуюче випромінювання безпосередньо перетворюється в електричний сигнал. Найбільш поширеними в даний час є плоскопанельні детектори непрямого перетворення [16].

У якості плоскопанельних детекторів «сцинтилятор-напівпровідник» найчастіше використовуються панелі на основі аморфного кремнію (a-Si) в комбінації з сцинтилятором з оксисульфіда гадолінію  $Gd_2O_2S$ , активованого Tb або Eu, чи з йодиду цезію CsI, активованного Tl або Na [17] (рис. 1.5).

Перспективним також є використання як сцинтилятор оксиду гадолінію  $Gd_2O_3$ , який дозволяє збільшити просторову роздільну здатність детектора [18].

Рис. 1.5. Схема реєстрації рентгенівського випромінювання плоско-панельним детектором непрямого перетворення на основі аморфного кремнію: а – зі сцинтилятором з оксисульфиду гадолінію; б – з покриттям CsI.

Сцинтилятори перетворюють рентгенівське випромінювання в видиме світло, яке надходить на матрицю фотодіодів з аморфного кремнію і конвертується в електричний заряд. Чутливість і роздільна здатність детектора з порошковим сцинтилятором з  $Gd_2O_2S$  залежить від товщини і зернистості сцинтилятора. Однак при збільшенні його товщини зростає розсіювання світла і погіршується роздільна здатність детектора.

Для зменшення розсіювання світла в сцинтиляторі та збільшення роздільної здатності детектора застосовують сцинтилятор CsI з монокристалічною голчастою структурою. Монокристали CsI голчастої структури орієнтовані перпендикулярно до поверхні сцинтилятора і направляють світло до фотодіодної матриці без розсіювання.

Плоскопанельні детектори непрямого перетворення є збірками фотодіодів з нанесеним на них сцинтилятором на активній TFT-матриці. Матриця TFT-транзисторів має досить просту структуру електронних перемикачів (рис.1.6).

Максимальні розміри плоскопанельних детекторів «сцинтилятор-напівпровідник» складають  $40 \times 40$  см, а роздільна здатність - до 10 пар лін. / мм, що відповідає розміру пікселя 50 мкм.

Відмінною особливістю аморфного кремнію є висока радіаційна стійкість, що дозволяє застосовувати такі детектори при високих енергіях рентгенівського випромінювання. Оскільки процес виробництва плоскопанельних детекторів на базі аморфних напівпровідників і TFT-технології вимагає спеціального технологічного устаткування, такі детектори є досить дорогими.

У плоскопанельних детекторах прямого перетворення напівпровідниковий шар розташовується безпосередньо на матриці TFT-транзисторів (рис. 1.6). У напівпровідниковому шарі при впливі рентгенівського випромінювання всередині напівпровідника генеруються електронно-діркові пари. Під дією прикладеної напруги виникає електричний струм, який посилюється за допомогою зчитувальної електроніки і використовується для формування зображення контрольованого об'єкта.

Найбільш поширеними варіантами детекторів прямого перетворення є панелі на основі аморфного селену (a-Se) і монокристалічного телуриду кадмію (CdTe).

Рис. 1.6. Схема реєстрації рентгенівського випромінювання плоскопанельним детектором прямого перетворення

Недоліком детекторів на основі аморфного селену є вузький діапазон робочих температур. Як при роботі, так і при збереженні температура детектора повинна знаходитися в діапазоні від 5 до  $30^\circ\text{C}$  для того, щоб уникнути кристалізації селенового шару.

Плоскопанельні детектори прямого перетворення на основі CdTe можуть працювати в набагато ширшому температурному діапазоні при енергіях рентгенівського випромінювання до 300 кеВ, володіючи при цьому в кілька разів більшою чутливістю. Крім того, телурид кадмію CdTe має значний коефіцієнт екранування рентгенівського випромінювання (понад 99% при товщині 1 мм і енергії 120 кеВ), що забезпечує високу радіаційну стійкість і великий термін служби таких детекторів [19].

Як показали дослідження, плоскопанельні цифрові детектори дозволяють отримати значно вищу якість зображення, ніж плівкова радіографія та комп'ютерна радіографія внаслідок високого відношення сигнал / шум, що дозволяє знизити межу виявлення зміни товщини матеріалу до 0,1% [16].

До недоліків плоскопанельних цифрових детекторів можна віднести високу вартість, критичність до умов навколишнього середовища і обмежену радіаційну стійкість.

### 1.3 Застосування мікроконтролерів у рентгенотелевізійних системах

Так як рентгенотелевізійні системи є складними системами для керування використовуються мікроконтролери.

Мікроконтролери характеризуються шириною шини, набором команд і структурою пам'яті. Основними типами мікроконтролерів на сьогоднішній день є AVR, ARM, 8051 та PIC мікроконтролери.[20]

Мікроконтролер 8051 - це 8-бітне сімейство мікроконтролерів, розроблене Intel в 1981 році. Цей мікроконтролер спочатку називався «системою на кристалі», оскільки він має 128 байт оперативної пам'яті, 4 Кб ПЗП, 2 таймера, 1 послідовний порт і 4 порту на одному кристалі. Процесор може обробляти до 8 біт даних одночасно. Якщо дані більше 8 біт, то вони повинні бути розбиті на частини, щоб процесор міг легко їх обробляти. Більшість мікроконтролерів серії 8051 різних виробників містять 4 Кб ПЗП, хоча обсяг ПЗП може бути розширений до 64 Кб.

Контролер периферійного інтерфейсу (PIC) - це серія мікроконтролерів, розроблена компанією Microchip. Мікроконтролер PIC швидше і простіше реалізує програми в порівнянні з 8051. Простота програмування і простота взаємодії з іншими периферійними пристроями робить PIC більш успішним мікро контролером. Він складається з центрального процесора, ОЗП, ПЗП, таймерів, лічильників, АЦП, ЦАП. Мікроконтролер PIC також підтримує протоколи, такі як CAN, SPI, UART для взаємодії з додатковими периферійними пристроями. PIC в основному використовує модифіковану гарвардську архітектуру, а також підтримує RISC (скорочений набір команд).

Мікроконтролер AVR розроблений Альф-Егілом Богеном та Вегаром Волланом від корпорації Atmel. Мікроконтролери AVR - це модифікована гарвардська архітектура RISC, з окремими запам'ятовуваними даними та програмами, а швидкість AVR вища ніж у 8051 та PIC. AVR має 16 Кб внутрішньої системної флеш пам'яті та 512 байт EEPROM, 16-бітний таймер з додатковими функціями, до 256 Кб вбудованої флеш пам'яті, має підтримку CAN і USB-контролерів, 16 каналний 10-бітний аналого-цифровий перетворювач. [21]

Мікроконтролери з ядром ARM також є одним з сімейств процесорів на базі архітектури RISC, розробленим компанією Advanced RISC Machines (ARM). Мікроконтролери ARM засновані на 32-бітних і 64-бітних багатоядерних процесорах RISC. Процесори RISC призначені для виконання меншої кількості інструкцій, щоб вони могли працювати з більшою швидкістю, виконуючи додаткові мільйони інструкцій в секунду (MIPS). Усуваючи непотрібні інструкції і оптимізуючи обробку інформації, RISC-процесори забезпечують більшу продуктивність у порівнянні з більшістю розглянутих вище мікроконтролерів. Через скороченого набору команд їм потрібно менше транзисторів, що дозволяє зменшити розмір матриці інтегральної схеми. Процесори ARM з меншими розмірами зменшують складність проектування і скорочують енергоспоживання, що робить їх придатними для більш мініатюрних пристроїв.

З порівняльної таблиці 1.1 можна зробити висновок що найкращими мікроконтролерами є мікроконтролери ARM та AVR. Ключовою різницею між даними архітектурами є розрядність, що дозволяє мікроконтролеру на ARM виконувати 32 бітні операції в 4 рази швидше. Але для даного проекту доцільніше використовувати мікроконтролер AVR через його доступність та наявність готових плат розширень до платформи Arduino.

Табл. 1.1 Основні відмінності між мікроконтролерами AVR, ARM, 8051 і PIC [20]

#### Висновки до розділу 1

Радіаційні системи неруйнівного контролю з проміжними носіями інформації (плівкова радіографія, електрорадіографія, комп'ютерна радіографія) широко застосовуються для контролю матеріалів і виробів в промисловості та забезпечують високу відносну чутливість контролю (1%) та роздільну здатність (10-20 пар лін./мм). Однак такі системи мають суттєві недоліки: неможливість проводити контроль об'єктів в реальному часі, низька продуктивність і висока вартість контролю.

Найбільш перспективними є радіаційні системи непрямого перетворення на основі плоскопанельних детекторів типу «сцинтилятор-напівпровідник», а також системи прямого перетворення на основі напівпровідникових плоскопанельних детекторів. Такі системи, які є системами реального часу, забезпечують такі відносну чутливість контролю і роздільну здатність, які навіть перевершують плівкову радіографію. Широкому поширенню таких детекторів перешкоджає їх висока вартість і обмежена радіаційна стійкість.

Альтернативою системам на основі повноформатних плоскопанельних детекторів можуть слугувати перспективні рентгенотелевізійні системи «сцинтилятор - ПЗЗ-матриця», які мають низьку вартість та високі рентгенотехнічні характеристики, та скануючі рентгенотелевізійні системи на основі малоформатних плоскопанельних детекторів із електромеханічним скануванням контрольованого об'єкту з наступним програмним зшиванням отриманих малоформатних цифрових рентгенівських зображень.

Рентгенотелевізійні системи є складними системами та потребують керування режимами роботи як системи в цілому, так і окремих пристроїв, що входять до її складу. Для керування режимами роботи рентгенотелевізійних

систем доцільно використовувати сучасні мікроконтролери.

## **2. РОЗРОБКА МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СКАНУЮЧОЮ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ**

### **2.1 Опис скануючої рентгентелевізійної системи**

Склад цифрової скануючої рентгентелевізійної системи наведений на рис.

2.1. До складу скануючої рентгентелевізійної системи входить: джерело радіаційного випромінювання, об'єкт контролю, твердотільний плоскпанельний детектор S10811-11, контролер обробки сигналів C9266-04, електромеханічний сканер, блок живлення та управління сканером, а також комп'ютер.

Рис. 2.1. Склад цифрової скануючої рентгентелевізійної системи

Скануюча рентгентелевізійна система працює таким чином:

Джерело радіаційного випромінювання опромінює об'єкт контролю. Подається команда отримання зображення на контролер обробки сигналів. Детектор перетворює тіньове рентгенівське зображення об'єкту контролю у цифрове та передає його на комп'ютер. Подається команда на блок управління кроковим двигуном на пересування детектору. Мікроконтролер отримує команду та перетворює цифровий сигнал команди у аналоговий сигнал руху двигуна. Операції повторюються до тих пір, доки не буде отримано повне зображення, або досягнута максимальна кількість зображень. Після отримання окремих цифрових зображень проводиться їх програмне зшивання.

У структурній схемі цифрової скануючої рентгентелевізійної системи можна виділити 3 частини:

☉ джерело радіаційного випромінювання;

☉ об'єкт контролю;

☉ скануюча рентгентелевізійна установка, що складається з твердотільного плоскпанельного детектора S10811-11, контролера обробки сигналів C9266-04, електромеханічного сканера, блока живлення та управління сканером, а також комп'ютера.

Розглянемо більш детально структурну схему скануючої рентгентелевізійної установки.

### **2.2 Структурна схема цифрової скануючої рентгентелевізійної установки**

За принципом роботи можна побудувати структурну схему скануючої рентгентелевізійної установки (рис. 2.2). До складу скануючої рентгентелевізійної установки входять:

1. Твердотільний плоскпанельний детектор S10811-11;
2. Контролер обробки сигналів C9266-04;
3. Мікроконтролер Arduino Uno;
4. Плата розширення CNC Shield v3.0;
5. Драйвер керування двигуном A4988;
6. Кроковий двигун NEMA17;
7. Комп'ютер.

До системи керування цифровою скануючою рентгентелевізійною установкою входять: мікроконтролер Arduino Uno, плата розширення CNC Shield, драйвер керування двигуном A4988, кроковий двигун NEMA17.

Рис. 2.2. Структурна схема цифрової скануючої рентгентелевізійної установки

### 2.3 Вибір мікроконтролера системи керування рентгентелевізійною установкою

Для програмного керування приводом скануючої рентгентелевізійної установки прийнято рішення використовувати мікроконтролер Arduino UNO. Перевагами платформи Arduino UNO над іншими мікроконтролерними платформами є:

1. Низька вартість (окремі плати коштують від декількох десятків до декількох сотень гривень);
2. Зручна конструкція з можливістю додавання модулів без пайки та додаткових дротів;
3. Просте і зручне середовище програмування;
4. Відкритий вихідний код ПЗ, що розвивається програмістами з усього світу;
5. Наявність сторонніх наборів робототехнічної електромеханіки, що орієнтована на роботу з платами Arduino.

Рис. 2.3. Конструкція мікроконтролера Arduino Uno із зазначенням вхідних/вихідних сигналів

Arduino UNO працює на основі чіпу ATmega328, що має 32 Кб флеш-пам'яті, 2 Кб SRAM та 1 Кб EEPROM пам'яті. Плата має 14 цифрових (з яких 6 можуть використовуватися як виходи ШИМ) та 6 аналогових каналів вводу та виводу, кварцовий генератор 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм ICSP і кнопку перезавантаження. Технічні характеристики Arduino UNO наведені у таблиці 2.1.

Табл. 2.1 Характеристики Arduino UNO[22]

Живлення плати потребує або підключення через USB, або живлення адаптером AC/DC чи батареї в діапазоні напруги 6-20 В. Принципова електрична схема плати Arduino UNO R3 зображена на рис 2.4.

Рис. 2.4 Принципова електрична схема Arduino UNO

### 2.4 Вибір крокового двигуна системи керування рентгентелевізійною установкою

В якості електроприводу рентгентелевізійного сканеру було вибрано кроковий двигун NEMA 17, що дозволяє здійснювати обертання ротора на заданий кут без використання датчика кута повороту.

Кроковий двигун забезпечує велику точність переміщення, що необхідна для подальшої обробки отриманих рентгенівських зображень.

Для виконання повного оберту NEMA 17 необхідно виконати 200 кроків, тобто за один крок двигун робить оберт на  $1,8^\circ$ .

Рис. 2.5 Кроковий двигун NEMA 17

NEMA 17 – біполярний кроковий двигун, що має чотири дроти підключення до двох незалежних наборів котушок.

Характеристики двигуна NEMA 17 17HS4401:

1. Фази 2;
2. Діаметр валу 5 мм;

3. Крок 1,8 град.;
4. Макс. струм обмотки 1,68А;
5. Опір обмотки 1,65 Ом +/- 10%;
6. Індуктивність 2,8 мГн +/- 20%;
7. Момент утримання 54 Нсм;
8. Крутячий момент 1,5 Н;
9. Макс. робоча температура 80С;
10. Розміри 42x42x47мм, фланець NEMA17;
11. Вага 350 г.

### 2.5 Вибір драйверу двигуна системи керування рентгенотелевізійною установкою

Для керування кроковим двигуном необхідно використовувати спеціальний драйвер крокового двигуна. Одним з драйверів, що широко використовується є драйвер A4988 (табл. 2.2). Він працює в діапазоні напруг 8-35 В і забезпечує силу струму 1 А на фазу, має захист від перенапруження та перегріву та блокування живлення при зниженій напрузі. Драйвер забезпечує переміщення двигуна на 5 різних дозволів: повний крок (1), 1/2 кроку, 1/4 кроку, 1/8 кроку, 1/16 кроку. A4988 має потенціометр, що дозволяє встановити максимальний вихідний струм, це дасть можливість досягти більш високу кутову швидкість кроку двигуна.

Табл. 2.2 Порівняння драйверів крокового двигуна

Як видно з табл. 2.2, драйвер DRV8825 має більшу потужність порівняно із драйвером A4988. Але не для всіх задач необхідна така потужність. Доцільніше буде використовувати драйвер A4988 через більш низьку вартість та більшу розповсюдженість.

Рис 2.6 Схема підключення крокового двигуна до контролера A4988

Рис. 2.7 Принципова електрична схема драйвера A4988

### 2.6 Плата розширення CNC Shield

Для забезпечення роботи драйвера передбачена плата розширення CNC Shield v3.0. Дана плата розширення може забезпечити роботу до 4 крокових двигунів та підтримує прошивку Arduino GRBL та G код. CNC Shield v3.0 може працювати з драйверами двигунів A4988 або DRV8825. Керування кроком двигуна відбувається за допомогою переминок.

Рис. 2.8. Контакти електричних сигналів плати розширення CNC Shield v3.0

- 1 – кнопка reset;
- 2 – колодка, піни типу "x.step/Dir" для підключення зовнішніх драйверів крокового двигуна;
- 3 – колодка для регулювання дублювання осей;
- 4 – роз'єм живлення (12 ÷ 36 В);
- 5 – колодки управління мікрокроком для драйверів крокового двигуна;
- 6 – підключення біполярного крокового двигуна (на 4 дроти);
- 7 – підключення кнопок аварійна зупинка, пауза, скасування і повернення;
- 8 – піни управління шпинделем і насосом;
- 9 – піни для підключення датчиків крайнього положення елементів електромеханічного приводу;

10 – сигнали синхронізації rx tx (UART), scl (clock line), sda (data line), 3.3 В, 5 В, reset і земля.

### 2.7 Твердотільний плоскопанельний детектор S10811-11

Твердотільний плоскопанельний детектор S10811-11 призначений для цифрової рентгенографії. Детектор має 1700×1200 пікселів, кожен з яких має розмір 20×20 мкм. Перенесення зображення з сцинтилятора на напівпровідникову ПЗЗ матрицю відбувається за допомогою волоконно-оптичної пластини товщиною 1,5 мм, яка також захищає матрицю від рентгенівського випромінювання. Детектор забезпечує високі чутливість та роздільну здатність (20 пар.лін./мм).

Характеристики твердотільного плоскопанельного детектору S10811-11:

1. Розмір робочого поля - 34×24 мм;
2. Розмір пікселю - 20×20 мкм;
3. Тип сцинтилятора CsI;
4. Роздільна здатність - 20 пар.лін./мм
5. Розміри детектора - 42.3×30.0 мм

Рис. 2.9 Твердотільний плоскопанельний детектор S10811-11

### 2.8 Контролер обробки сигналів C9266-04

C9266-04 – це контролер обробки сигналів, призначений для детекторів НАМАМATSU S10810, S10811. C9266-04 можна використовувати в рентгенівських задачах, таких як рентгенівські знімки та неруйнівний контроль у поєднанні з цими датчиками зображення ПЗЗ.

C9266-04 містить схему драйверів ПЗЗ, аналогову схему обробки відеосигналу (12-бітний аналогово-цифровий перетворювач), генератор синхронізації, ланцюг управління та джерело живлення. C9266-04 перетворює аналогові відеосигнали з ПЗЗ в цифрові сигнали та виводить їх. USB-роз'єм (USB 2.0), що є стандартною функцією, надає змогу легко підключитися до ПК для управління та збору даних.

Для C9266-04 не потрібно додаткове джерело живлення, оскільки використовується живлення від комп'ютера через роз'єм USB. C9266-04 також має 36-контактний MDR роз'єм для підключення до ПЗЗ.

Переваги плоскопанельного детектора S10811-11:

- відносно низька вартість сенсора;
- висока роздільна здатність;
- низький рівень шумів;
- АЦП – 12 біт.

Рис. 2.10 Схема підключення плоскопанельного детектора S10811-11 до комп'ютера

Для керування ПЗЗ матрицею існує програмне забезпечення C9266DCamAPL, що працює на операційній системі Windows. ПЗ керування плоскопанельним детектором S10811-11 забезпечує стандартні функції введення зображення: задання формату зображення (8 або 16 біт), встановлення тривалості експозиції, налаштування якості вихідного зображення та ін.

### 2.9 Розробка конструкції скануючої рентгенотелевізійної установки

В процесі розробки та макетування портативної рентгенотелевізійної установки на базі твердотільного плоскопанельного детектора S10811-11 було

визначено основні вісі направляючих рухомих елементів установки з двома направляючими електроприводу (рис. 2.11).

Відповідно схеми було розроблено відповідні креслення несучого корпусу портативної рентгенотелевізійної установки (рис. 2.12), корпусу каретки приводу (рис. 2.13) та корпусу блоку живлення (рис. 2.14) у графічному редакторі КОМПАС. Далі із використанням розроблених креслень за допомогою автоматичного лазерного розкроювання відповідних елементів конструкції виготовлено корпус портативної рентгенотелевізійної установки на базі твердотільного плоскопанельного детектора S10811-11.

Рис. 2.11. Схема основних осей направляючих рухомих елементів рентгенотелевізійної установки з двома направляючими електроприводу

Рис. 2.12. Ескізне креслення несучого корпусу рентгенотелевізійної установки

Рис. 2.13. Ескізне креслення несучого корпусу каретки приводу

Рисунок 2.14 – Креслення корпусу блоку живлення портативної рентгенотелевізійної установки

### 2.10 Принципова електрична схема системи керування

Система керування складається з плати Arduino Uno R3, плати розширення CNC Shield, драйверу a4988 та крокового двигуна NEMA 17.

Arduino забезпечує перетворення команд оператора у аналоговий сигнал керування у вигляді імпульсів для повороту. Драйвер a4988 забезпечує перетворення аналогових імпульсів мікроконтролера у живлення двигуна з врахуванням напрямку обертання (рис. 2.15).

Рис. 2.15 Схема підключення драйверу A4988

CNC Shield є платою розширенням для Arduino, що дозволяє підключити драйвер напряму без пайки та дрітків та вибрати розмір кроку.

Принципова електрична схема буде складатися з плати Arduino Uno та драйверу a4988 та змодельована за допомогою Altium Designer.

Принципова схема наведена у ДП.6205.000 ЕЗ та в додатку Б.

### Висновки до розділу 2

Розроблена оригінальна конструкція скануючої рентгенотелевізійної установки, в основу якої закладені принципи створення кінематичної схеми сканера із застосуванням крокового двигуна та мікроконтролерного блока керування його обертанням.

Використання електромеханічного сканування малоформатного плоскопанельного цифрового детектора рентгенотелевізійної установки дозволяє проводити рентгенівський контроль протяжних об'єктів з високою роздільною здатністю (20 пар лін./мм).

Застосування при розробці скануючої рентгенотелевізійної установки графічного редактора КОМПАС та автоматичного лазерного розкроювання дозволило забезпечити високу точність розмірів відповідних елементів конструкції.

На основі сучасної компонентної бази розроблено мікроконтролерну систему керування скануючою рентгенотелевізійною установкою, яка містить мікроконтролер Arduino Uno R3, кроковий двигун Nema 17, драйвер двигуна A4988 та плату розширення CNC Shield.

### 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

#### 3.1 Розробка програмного забезпечення

Для керування електроприводом, в якості якого виступає кроковий двигун NEMA17, необхідно передавати команди управління до мікроконтролерного блоку управління. Команди управління мікроконтролером подаються від комп'ютера через USB кабель. Сигнали управління кроковим двигуном через електричний кабель подаються від мікроконтролерного блоку управління, створеного на базі мікроконтролерів серії Arduino до крокового двигуна.

В сучасних мікроконтролерах передбачена можливість їх програмування за допомогою прошивки, що забезпечує можливість виконання команд зовнішнього програмування (від комп'ютера) на виконавчі механізми (управління кроковим двигуном). Тому для управління кроковим двигуном електроприводу рентгенотелевізійного сканера відповідне програмне забезпечення включає в себе:

- зовнішню програму керування приводом (враховує специфіку управління конкретним приводом), фізично розміщена в комп'ютері;

- внутрішню програму прошивки мікроконтролера, що фізично розміщена в мікроконтролері.

В цьому випадку програмне забезпечення аналогічне тому, яке використовується в пристроях з числовим програмним управлінням (ЧПУ), для яких, відповідно до стандарту ISO 6983-1:2009 [23], зовнішня програма управління формує виконавчі команди (крок, швидкість переміщення, одиниці виміру), написаними на спеціальній мові програмування G-кодів. Ці команди, через бібліотеку прошивки, перетворюються мікроконтролером в електричні сигнали управління кроковим двигуном.

Для перевірки можливості зовнішнього програмного управління кроковим двигуном використовуємо один з варіантів його реалізації в G кодів [24]. Перевагою подібного способу виконання програм є повна незалежність коду керуючих команд обраної операційної системи і устаткування. Команди в контролер Arduino UNO [25] надходять через USB порт, який емулюється як послідовний COM порт.

##### 3.1.1 Зовнішня програма управління приводом

Зовнішньою програмою виступає Universal Gcode Sender, програма з відкритим вихідним кодом, що дозволяє керувати електроприводом.

G-Code - це мова програмування, що використовується для відправки команд на верстати з ЧПУ.

Повнофункціональна платформа Gcode використовується для взаємодії з передовими контролерами ЧПУ, такими як GRBL та TinyG. Universal Gcode Sender - це автономна програма Java, що потребує Java Runtime Environment для своєї роботи[26].

##### Особливості:

1. Крос-платформеність, працює на Windows, OSX, Linux та Raspberry Pi.
2. Виконавчий JAR-файл - файл JAR містить вбудовані залежності для всіх

підтримуваних операційних систем.

3. 3D-візуалізатор g-коду з кольоровими лінійними сегментами та відгуками про положення у режимі реального часу.
4. Оцінки тривалості.
5. Понад 3000 рядків одиничного тестового коду та ще 1000 рядків коментарів, що документують тести.
6. Налаштування оптимізації g-коду

Даним програмним забезпеченням можна керувати приводом, не вводючи код, а використовуючи можливість програми керувати за допомогою інтерактивного управління пристроєм (рис. 3.1).

Рис. 3.1. Вікно зовнішньої програми керування приводом

### 3.1.2 Внутрішня програма прошивки мікроконтролера

Інтерпретація команд ЧПУ в мікроконтролері ATMEGA328P виконується під управлінням внутрішнього програмного забезпечення - бібліотеки grbl [27], яка прошивається в його пам'ять за допомогою середовища розробки ПЗ для Arduino [28].

GRBL - це програмне забезпечення або прошивка з відкритим кодом, яке дозволяє керувати рухом для машин з ЧПУ. Для отримання потужного ЧПУ контролеру необхідно прошити плату Arduino. GRBL використовує G-код як вхідний сигнал і виводить управління рухом через Arduino. Лістинг прошивки мікроконтролеру наведено у додатку А.

Функції GRBL [29]:

1. Аналізування G-Code, що використовуються для опису ідеалізованих дій ЧПУ.
2. Побудувати модель цих дій і перевести їх в фізично можливу послідовність рухів для даної машини.
3. Виконати ці рухи, відправивши сигнал у вигляді узгоджених високочастотних імпульсів на крокові двигуни.

### 3.2 Моделювання роботи мікроконтролерної системи керування у програмному середовищі Proteus

Proteus - це сучасна система проектування та моделювання роботи аналогових та цифрових електронних приладів та пристроїв. Proteus дозволяє зібрати схему будь-якого приладу та змоделювати його роботу, виявляючи помилки проектування.

У даному програмному забезпеченні є можливість додавання зовнішніх бібліотек. Для моделювання мікроконтролерної системи керування рентгенотелевізійною системою було використано бібліотеку arduino ide, що дозволило отримати повноцінну програмну модель мікроконтролеру з можливістю його прошивки.

У якості драйверу двигуна було використано 2 стандартні моделі драйверів L297 та L298. Кроковим двигуном виступав віртуальний кроковий двигун NEMA 17.

Так як для керування використовується комп'ютер з зовнішнім програмним забезпеченням, необхідно виконати з'єднання через віртуальний серійний порт Virtual Serial Port Emulator (рис. 3.2).

Рис. 3.2 Вікно програми Virtual Serial Port Emulator

Створено віртуальну пару серійних портів, що з'єднані між собою (COM2 та COM3). Для з'єднання віртуального порту та моделі мікроконтролеру Arduino було використано програмний ком - порт. Було задано такі параметри: порт COM2, швидкість передачі даних 115200 бод.

Зовнішнє програмне забезпечення Universal Gcode Sender у даному випадку працює через порт COM3 та швидкістю 115200 бод, сумісність з прошивкою grbl. У параметрах мікроконтролеру було вибрано HEX-файл grbl прошивки.

Рис 3.3. Симуляція роботи системи керування рентгенотелевізійною установкою

Керування системою відбувається за допомогою команд, написаних у вигляді G коду, що проходять через канал COM3 до COM2. Команда у вигляді G коду надходить до мікроконтролера та обробляється програмою, прошитою у мікроконтролері.

### Висновки до розділу 3

Для управління кроковим двигуном електроприводу рентгенотелевізійного сканера відповідне програмне забезпечення включає в себе як зовнішню програму керування приводом (враховує специфіку управління конкретним приводом), що фізично розміщена в комп'ютері, так і внутрішню програму прошивки мікроконтролера, що фізично розміщена в мікроконтролері.

У якості зовнішньої програми керування приводом використовується програма Universal Gcode Sender, яка дозволяє керувати приводом, не вводячи код, а за допомогою інтерактивних можливостей програми.

Інтерпретація команд зовнішньої програми керування приводом в мікроконтролері Arduino виконується за допомогою внутрішнього програмного забезпечення GRBL, яке перетворює G-Code зовнішньої програми в фізично можливу послідовність рухів крокового двигуна.

Було проведено симуляцію роботи системи керування рентгенотелевізійною установкою та отримано робочу модель даної системи. На основі даної моделі можна спостерігати керування віртуальним двигуном. Створена робоча модель системи керування дозволяє досліджувати процес керування віртуальним двигуном та підтверджує працездатність розробленої системи керування.

## 4. ЕКСПЕРИМЕНАЛЬНА ЧАСТИНА

Для проведення експериментального дослідження необхідно зібрати скануючу рентгенотелевізійну систему. Для просвічування тестового зразку рентгенівським випромінюванням використовується рентгенівський апарат РАП-150/300. Дослідження проводилися у лабораторії ІЕЗ ім. Є.О Патона НАН України.

У якості тестового зразку використовувався зразок стикового зварного з'єднання алюмінієвої пластини (розміром 125x300 мм та товщиною 5 мм) (рис. 4.1) та еталон чутливості EN 462-W13Fe по EN ISO 19232 (табл. 4.1).

Рисунок 4.1 – Зразок стикового зварного з'єднання (алюміній, товщина 5 мм)  
Табл. 4.1. Параметри еталона чутливості EN 462-W13Fe

#### 4.1 Підготовка експерименту

Перед проведенням експерименту необхідно налаштувати драйвер A4988 та виставити напругу  $V_{ref}$  за допомогою потенціометра що знаходиться на платі.

$V_{ref}$  для A4988 залежить від струму двигуна та резистору  $R_s$ . Номінал резистора  $R_s$  – 0,1 Ом.

У зв'язку з тим що робочий струм двигуна дорівнює 70% від струму утримання. Отримане значення нам потрібно помножити на 0,7. В іншому випадку двигун в режимі утримання буде сильно нагріватися.

Після налаштування драйверу можна виконати експериментальні знімки рентгенівських зображень зразку.

#### 4.2 Проведення експерименту

На електромеханічний сканер кладеться зразок зварного з'єднання та керування сканером відбувається через комп'ютер. Для отримання одного довгого зображення при електромеханічному скануванні необхідно зробити декілька знімків і в подальшому провести їх зшивання. Так як розмір вихідних фрагментів зображень дорівнює 24 x 34 мм доцільно робити крок між зображеннями 22 мм. Зона перекриття при зшиванні фрагментів зображення у такому випадку буде становити 2 мм (рис. 4.2).

Рис. 2.35. Перекриття границь двох суміжних фрагментів рентгенівських зображень при електромеханічному скануванні

Зшивання рентгенівських зображень відбувається програмно кореляційним методом. Зшивання проводиться у місці найбільшого співпадіння першого ряду пікселів одного зображення з останніми рядами пікселів попереднього [30].

Окремі фрагменти рентгенівських зображень, отримані при скануванні контрольованого зразка, показані на рис. 4.3. Результати зшивання зазначених фрагментів показані на рис. 4.4.

Рис. 4.3 – Вихідні фрагменти рентгенівський зображень (24 x 36 мм)

Рис. 4.4 – Результати зшивання фрагментів зображень

Також окремо було отримано рентгенівські зображення без міток з еталоном чутливості EN 462-W13Fe. Окремі фрагменти рентгенівських зображень і результати їх зшивання при скануванні контрольованого зразка без міток показані відповідно на рис. 4.5 та 4.6. На рис. 4.7 наведена збільшена ділянка цифрового рентгенотелевізійного зображення зварного з'єднання з еталоном чутливості.

Рис. 4.5. Вихідні фрагменти рентгенівський зображень (24 x 36 мм)

Рис. 4.6. Результати зшивання фрагментів зображень

Рис. 4.7. Ділянка цифрового рентгенотелевізійного зображення зварного з'єднання з еталоном чутливості

На еталоні чутливості (рис. 4.7) останньою видимою проволочкою є 6 проволочка, чутливість контролю становить W18, що є високим показником для товщини зразку (5 мм).

#### Висновки до розділу 4

Вперше у практиці рентгенівського контролю протяжних об'єктів створена портативна скануюча рентгенотелевізійна установка на основі

малоформатного плоскопанельного цифрового детектора з електромеханічним скануванням протяжної області і з наступним програмним зшиванням отриманих малоформатних цифрових рентгенівських зображень.

Макет портативної рентгенотелевізійної системи забезпечує отримання повноформатних знімків до 25 см при цифровому зшиванні малоформатних рентгенівських зображень з точністю до 20 мкм при товщині алюмінію до 3 мм.

При збільшенні товщини контрольованих зразків до 2,5 мм (сталь) і до 5 мм (алюміній), точність зшивання зменшується до 100 мкм.

Підвищення точності електромеханічного позиціонування дозволяє підвищити швидкодію процедури програмного зшивання окремих фрагментів.

### ВИСНОВКИ

За результатами дипломного проекту було спроектовано та розроблено портативну рентгенотелевізійну систему. Ця система може сканувати контрольовані зразки до 5 мм. Керування даною системою відбувається за допомогою комп'ютера. Даний пристрій було розроблено для використання в дефектоскопії, і він є конкурентом іншим системам радіаційного неруйнівного контролю.

Вперше у практиці рентгенівського контролю протяжних об'єктів створена портативна скануюча рентгенотелевізійна установка на основі недорогого малоформатного плоскопанельного цифрового детектора з електромеханічним скануванням протяжної області і з наступним програмним зшиванням отриманих малоформатних цифрових рентгенівських зображень.

У відповідності до розробленої структурної схеми було проведено вибір компонентів системи, опис роботи та підключення структурних блоків.

Для забезпечення роботи системи було використано програмне забезпечення мікроконтролера grbl, представлено у додатку А, та програмне забезпечення комп'ютеру для керування приводом, формування зображень та їх подальшого зшивання.

Макет портативної рентгенотелевізійної системи забезпечує отримання повноформатних знімків до 25 см при цифровому зшиванні малоформатних рентгенівських зображень з точністю до 20 мкм при товщині алюмінію до 3 мм і 100 мкм при товщині до 5 мм.

### SUMMARY

Microcontroller control system for scanning X-ray television unit

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization Electronic Devices and Systems. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE-62. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. - 68p., Ill. 31, tables 4.

**Keywords:** X-ray Detector, Microcontroller, stepper motor driver

#### Summary of the project:

Based on the results of the diploma project, a portable X-ray television system was designed and developed. This system can scan controlled samples up to 5 mm. This system is controlled by a computer. This device was developed for use in flaw detection, and it is a competitor to other non-destructive radiation control systems.

Radiation non-destructive testing systems (film radiography, electro radiography, computer radiography) are widely used for control of materials and products, and also provide high relative sensitivity of control (1%) and resolution (10-20 lines/mm). However, such systems have significant disadvantages: the inability to control objects in real time, low performance and high cost of control.

The most promising are indirect conversion systems based on flat-panel detectors such as "scintillator-semiconductor", as well as direct conversion systems based on semiconductor flat panel detectors. Such systems, being real-time systems, provide relative control sensitivity and resolution and even surpass film radiography. The widespread use of such detectors is hindered by their high cost and limited radiation resistance.

An alternative to systems based on flat-panel detectors can be promising X-ray television systems "scintillator-CCD". Such systems, having a low cost, provide relative control sensitivity and resolution are commensurate with film radiography, and allow real-time monitoring of objects.

Since the X-ray scintillator-CCD system is a complex system, it is necessary to be able to move small-format X-ray sensors and remote control using an Arduino microcontroller to provide more control.

The scanning X-ray television system includes: a radiation source, a control object, a solid-state flat panel detector S10811-11, a signal processing controller C9266-04, an electromechanical scanner, a power supply and scanner control unit, and a computer.

The source of radiation irradiates the object of control. The command to obtain the image is given to the signal controller. The detector receives and transmits the image to a computer. A command is given to the stepper motor control unit to move the detector. The microcontroller receives a command and converts the digital command signal into an analog motor motion signal. The operations are repeated until the full image is obtained or the maximum number of photos is reached. After receiving individual images, software stitching is performed.

A block diagram of an electromechanical scanning X-ray television system was developed. The selection of the main components of the control system according to the block diagram is carried out.

A digital X-ray scanning installation consists of three units: a control unit, a scanning unit, and a computer. The control system of the digital scanning X-ray television installation is an Arduino Uno microcontroller, CNC Shield expansion board, A4988 motor control driver, NEMA17 stepper motor.

The Arduino UNO is based on the ATmega328 chip, which has 32 KB of flash memory, 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM memory. The board has 14 digital (of which 6 can be used as PWM outputs) and 6 analog I / O channels, a 16 MHz quartz oscillator, a USB connector, a power connector, an ICSP connector and a reset button.

The CNC Shield v3.0 expansion card is selected to ensure the of driver. This expansion board can run up to 4 stepper motors and supports Arduino GRBL firmware and G code. CNC Shield v3.0 can work with A4988 or DRV8825 engine drivers. The motor step is controlled by jumpers.

A special stepper motor driver must be used to control the stepper motor. One of the widely used drivers is the A4988 driver. It operates in the voltage range of 8-35 V and provides a current of 1 A per phase, has protection against overvoltage and overheating and blocking the power supply at low voltage. The driver moves the engine to 5 different resolutions: full step (1), 1/2 step, 1/4 step, 1/8 step, 1/16 step. A4988 has a potentiometer that allows you to set the maximum output current, it will achieve a higher angular speed of the motor.

The NEMA 17 stepper motor was chosen as the electric drive of the X-ray television scanner, which allows to rotate the rotor at a given angle without using a rotation angle sensor. The stepper motor provides high accuracy of movement which is necessary for the further processing of the received X-ray images.

To control the electric drive, which is a stepper motor NEMA17, it is necessary to transmit control commands to the microcontroller control unit. Microcontroller control commands are given from a computer via a USB cable. The stepper motor control signals are fed via an electric cable from the microcontroller control unit created on the basis of Arduino series microcontrollers to the stepper motor.

The software of the scanning X-ray television system was selected, the internal firmware program of the microcontroller and the external drive control program. Universal Gcode Sender allows you to control the movement of the scanner to the required distance. The use of ready-made GRBL firmware ensures stable operation of the electric drive.

Modern microcontrollers provide the ability to program them using firmware, which provides the ability to execute external programming commands (from a computer) on the actuators (stepper motor control). Therefore, to control the stepper motor of the electric drive of the X-ray television scanner, the corresponding software includes: external drive control program (takes into account the specifics of controlling a specific drive), physically placed in the computer and internal firmware program of the microcontroller (firmware), physically placed in the microcontroller.

The external program is Universal Gcode Sender, an open source program that allows you to control the electric drive.

G-Code is a programming language used to send commands to CNC machines.

The full-featured Gcode platform is used to interact with advanced CNC controllers such as GRBL and TinyG.

GRBL is open source software or firmware that allows you to control traffic for CNC machines. To get a powerful CNC controller, you need to flash the Arduino board. GRBL uses the G-code as an input signal and outputs traffic control via the Arduino.

To conduct an experimental study, it is necessary to assemble a portable X-ray television system. An X-ray machine RAP-150/300 is used to irradiate the test sample with X-rays.

A sample of a welded joint of an aluminum plate (size 125x300 mm and thickness 5 mm) and a sensitivity standard EN 462-W13Fe according to EN ISO 19232 were used as a test sample.

A sample is placed on the electromechanical scanner and the scanner is controlled via a computer. To obtain one long image during electromechanical

scanning, it is necessary to take several pictures and then stitch them. Since the size of the original image fragments is 24 x 36 mm, it is advisable to make a step between the images of 22 mm. The overlap area when stitching fragments of the image in this case will be 2 mm.

Studies have shown that the specified maximum accuracy of crosslinking software in 20  $\mu\text{m}$  can be obtained by X-ray testing of aluminum products up to 2 - 3 mm thick. When the thickness of the controlled samples increases to 2.5 mm (steel) and up to 5 mm (aluminum), the sewing accuracy decreases sharply. It can be assumed that this is the maximum thickness of the products tested for this type of X-ray transducer, which is limited by the maximum allowable value of the voltage on the X-ray tube (70 kV). In this case, to increase the accuracy of software assembly, it is assumed to reduce the crosslinking area to the accuracy of positioning of the electromechanical sensor. Due to the use of two guides of the electric drive, the positioning accuracy of the sensor reaches 40  $\mu\text{m}$ . Due to the longitudinal calibration software it is possible to increase the scanning accuracy to the pixel size of the sensor matrix, which is equal to 20  $\mu\text{m}$ . Improving the accuracy of electromechanical scanning can also significantly increase the speed of the software assembly procedure for individual fragments. In this case, the size of the analyzed image overlap area is limited by the scanning accuracy.

The layout of the portable X-ray television system provides full-format images up to 25 cm with digital stitching of small-format X-ray images with an accuracy of up to 20  $\mu\text{m}$  at aluminum thicknesses up to 3 mm and 100  $\mu\text{m}$  at thicknesses up to 5 mm.

For the first time in the practice of X-ray control of extended objects, a portable scanning X-ray television installation based on an inexpensive small-format flat-panel digital detector with electromechanical scanning of the extended region and subsequent software stitching of the obtained small-format digital X-ray images was created.

## Схожість

Схожість із джерелами з Інтернету

32

|    |                                                                                                                                                                                                                                                     |            |       |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|
| 2  | <a href="http://el.z-pdf.ru/31fizika/28232-2-radiofizichni-metodi-dagnostiki-materialiv-seredovisch-pidruchnik-rekomendovan">http://el.z-pdf.ru/31fizika/28232-2-radiofizichni-metodi-dagnostiki-materialiv-seredovisch-pidruchnik-rekomendovan</a> | 3 Джерело  | 7.54% |
| 4  | <a href="https://divovo.in.ua/radiofizichni-metodi-dagnostiki-materialiv-i-seredovish.html?page=15">https://divovo.in.ua/radiofizichni-metodi-dagnostiki-materialiv-i-seredovish.html?page=15</a>                                                   | 2 Джерело  | 7.27% |
| 5  | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28873/1/Chychkan_magistr.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28873/1/Chychkan_magistr.pdf</a>                                                                                               |            | 2.38% |
| 8  | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/33048/1/MEA2017_22-6_p18-28.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/33048/1/MEA2017_22-6_p18-28.pdf</a>                                                                                         |            | 0.69% |
| 11 | <a href="http://eds.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/06/Blank_Diplom_Bachalavr2020.docx">http://eds.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/06/Blank_Diplom_Bachalavr2020.docx</a>                                                                             | 3 Джерело  | 0.44% |
| 15 | <a href="https://greenchip.com.ua/23-0-0-1.html">https://greenchip.com.ua/23-0-0-1.html</a>                                                                                                                                                         |            | 0.14% |
| 16 | <a href="https://www.jumia.com.ng/uno-r3-arduino-mpg218279.html">https://www.jumia.com.ng/uno-r3-arduino-mpg218279.html</a>                                                                                                                         | 16 Джерело | 0.13% |
| 18 | <a href="https://pikabu.ru/story/arduino_cnc_shield_ot_protoneer_4251812?cid=67098907">https://pikabu.ru/story/arduino_cnc_shield_ot_protoneer_4251812?cid=67098907</a>                                                                             |            | 0.12% |
| 19 | <a href="https://www.pololu.com/product/2876">https://www.pololu.com/product/2876</a>                                                                                                                                                               | 2 Джерело  | 0.12% |
| 21 | <a href="https://www.softpedia.com/get/Others/Miscellaneous/Universal-Gcode-Sender.shtml">https://www.softpedia.com/get/Others/Miscellaneous/Universal-Gcode-Sender.shtml</a>                                                                       |            | 0.1%  |
| 22 | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28928/1/Salarov_bakalavr.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28928/1/Salarov_bakalavr.pdf</a>                                                                                               |            | 0.1%  |

Схожість по Бібліотеці акаунту

114

|    |                                                              |                      |                                                                                    |            |       |
|----|--------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|
| 1  | 2020_Богатов_Федір_система_контролю_композитних_матеріалів_f | ID файлу: 1003270779 | Institut                                                                           | 3 Джерело  | 9.67% |
| 3  | Електронні системи контролю якості та діагностики            | ID файлу: 1000953915 | Institution: National Technical Un...                                              |            | 7.41% |
| 6  | 107063-252722-2-CE                                           | ID файлу: 3659523    | Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institu... |            | 1.39% |
| 7  | Студентська робота                                           | ID файлу: 1000054844 | Institution: Lviv Polytechnic National University                                  |            | 0.85% |
| 9  | 2020-bachelor-EDD_Ulizko_elektronni_paneli_fch               | ID файлу: 1004040156 | Institution: National Technical Univ                                               | 24 Джерело | 0.69% |
| 10 | 2020-bachelor-EDS_Zelinskyy_pokryttya_fch                    | ID файлу: 1004030960 | Institution: National Technical Universit                                          | 11 Джерело | 0.54% |
| 12 | Студентська робота                                           | ID файлу: 1001000907 | Institution: National Aviation University                                          |            | 0.16% |
| 13 | Студентська робота                                           | ID файлу: 1584545    | Institution: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University                        | 31 Джерело | 0.15% |

|    |                                        |                      |                                                                                    |            |       |
|----|----------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|
| 14 | Студентська робота                     | ID файлу: 1000083638 | Institution: National University of Water Management and Na                        | 2 Джерело  | 0.14% |
| 17 | Студентська робота                     | ID файлу: 1000813772 | Institution: National University of Water Management and Natural Re...             |            | 0.12% |
| 20 | 1595-Текст статті-3855-1-2-20190821(1) | ID файлу: 1000111356 | Institution: National Technical University of                                      | 29 Джерело | 0.12% |
| 23 | Voloshyn диплом Full                   | ID файлу: 1000081011 | Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Pol                    | 3 Джерело  | 0.1%  |
| 24 | Студентська робота                     | ID файлу: 1000058061 | Institution: Lviv Polytechnic National University                                  | 2 Джерело  | 0.1%  |
| 25 | Романюк І О                            | ID файлу: 8345281    | Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" |            | 0.1%  |
| 26 | Степанюк                               | ID файлу: 1003972149 | Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" |            | 0.09% |
| 27 | Студентська робота                     | ID файлу: 53602      | Institution: Lviv Polytechnic National University                                  |            | 0.09% |
| 28 | Скляр Ю.О. Антиплагіат                 | ID файлу: 1003856117 | Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytec...             |            | 0.09% |