

Поліпшення параметрів рентгенотелевізійних систем на основі електронних перетворювачів

Шинкаренко Н. В., ORCID [0000-0003-1650-4783](https://orcid.org/0000-0003-1650-4783)

e-mail: shinkarenko@fel.kpi.ua

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—Відзначені переваги плоскпанельних детекторів, які є основою перспективної цифрової рентгенотехніки, порівняно з рентгеновською плівкою, запам'ятовуваними пластинами комп'ютерної радіографії та електронно-оптичними трубками. Серед переваг можна зазначити економію часу, завдяки відсутності хімічної обробки та можливість цифрової передачі даних, а також кращу якість зображення. Описані найбільш важливі параметри різних технологій. Здійснено порівняння сучасних плоскпанельних детекторів та рентгеновських електронно-оптичних перетворювачів, а також рентгенотелевізійних систем постійної та імпульсної дії.

Бібл. 36, рис. 4, табл. 3.

Ключові слова — плоский детектор; КМОН; ПЗЗ; рентген.

I. Вступ

Поява та поширення промислового телебачення, створення різних типів вакуумних передавальних трубок, зокрема для рентгеновського діапазону, а потім і їх твердотільних аналогів сприяло використанню та розвитку рентгенотелевізійних методів дефектоскопії [1]–[16]. У порівнянні із рентгенографічними, ці методи мають суттєві переваги та відкривають принципово нові можливості досліджень. Із створенням та масовим впровадженням сучасної обчислювальної техніки, зокрема її залученням до процесів реєстрації, візуалізації та обробки тінєвих рентгеновських зображень об'єктів, ці переваги та можливості набули ще більш істотного характеру. В даний час особливу галузь складають рентгеновські системи імпульсної дії, що широко використовуються у медицині, дефектоскопії, військовій справі та різних технологічних процесах. Завдяки ряду суттєвих позитивних якостей (мала вага та габарити, простота конструкції, можливість як панорамного, так і напрямленого просвічування, мала потужність, що споживається, а також можливість контролювати динамічні об'єкти та процеси) апарати отримали найбільше використання у техніці неруйнівного контролю матеріалів у нестационарних умовах.

Метою даної статті є огляд сучасних рентгенотелевізійних систем дефектоскопії на основі твердотільних перетворювачів, а також порівняння їх основних параметрів з параметрами систем на рентгеновських електронно-оптичних перетворювачах (РЕОП).

II. РЕНТГЕНІВСЬКИЙ ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

РЕОП-електровакуумний прилад, усередині якого вхідний екран перетворює рентгеновське зображення у видиме з подальшим посиленням його яскравості електронно-оптичною системою. [2], [16]–[19]

У цьому пристрої вхідний екран перетворювача є елементом вакуумної системи, що використовує метод електростатичного перенесення електронів за допомогою високовольних прискорюючих електродів на вихідний люмінесцентний екран. Формування зображення відбувається вже на вихідному екрані невеликого розміру - приблизно 25 мм.

Схема сучасного РЕОП з осьовим розташуванням ПЗЗ-камери (прилад з зарядовим зв'язком) наведена на рис. 1а. Конструктивно на вході РЕОП розташований екранно-катодний вузол, що складається з сцинтиляційного екрану і фотокатода, який перебуває з ним в оптичному контакті. Екран перетворює тінєве рентгеновське зображення у видиме. Фотокатод під дією світлових фотонів за рахунок зовнішнього фотоефекту випускає електрони, які прискорюються і фокусуються електронно-оптичною системою РЕОП. Прискорені і сфокусовані електрони бомбардують вихідний екран, виготовлений із дрібнозернистого люмінофора і розташованого на внутрішній стороні вихідного вікна РЕОП. В результаті взаємодії електронного потоку з люмінофорним екраном, останній перетворює електронне зображення у видиме зображення високої яскравості. Перетворення вхідного рентгеновського зображення у вихідне супроводжується зменшенням його розміру приблизно в 10 разів. Діаметр робочого поля різних типів



РЕОП становить від 120 до 350 мм. Найбільш поширені 9-дюймові з діаметром робочого поля 230 мм. Діаметр вихідного екрану складає 15, 20, 25, 30 або 35 мм.

Вхідні екрани в сучасних РЕОП виготовляють в основному з йодиду цезію (CsI), головною перевагою якого є однорідна щільність речовини, яка забезпечує високу ефективність поглинання рентгенівського випромінювання. Для поліпшення взаємної спектральної відповідності фотокатода і екрану з 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 зарядовим зв'язком (ПЗЗ-матриці), а також КМОН – сенсори (комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник). Електричний відеосигнал з виходу телевізійної камери подають на телевізійний монітор, на якому відтворюється рентгенотелевізійне зображення контрольованого об'єкту, а також на комп'ютер для обробки та архівування зображень. Перетворення рентгенівського

випромінювання в доступне для оператора зображення на моніторі проходить декілька стадій (рис. 1б), при цьому при кожному перетворенні початкова інформація спотворюється, що призводить до значних втрат інформації і низької якості візуального зображення. [20] Найважливішими параметрами РЕОПа, що визначають його властивості та впливають на якість зображення, є коефіцієнт перетворення, коефіцієнт підсилення, роздільна здатність, відношення сигнал/шум, частотно-контрастна характеристика, динамічний діапазон. Параметри деяких типів РЕОП наведені у табл. 1. Детектори на рентгенівських електронно-оптичних перетворювачах відносяться до класу електровакуумних приладів та мають високі техніко-економічні показники: коефіцієнт підсилення яскравості; коефіцієнт радіаційно-оптичного перетворення; роздільна здатність. Ці показники забезпечують дефектоскопічну чутливість на рівні 1,5%. [2], [16] Проте застосування РЕОПів в мобільних рентгеноскопичних системах обмежене ваго-габаритними характеристиками, значним енергоспоживанням, необхідністю мати високовольтне живлення до 30 кВ та вимагає належного ставлення, що створює великі труднощі при експлуатації в польових умовах.

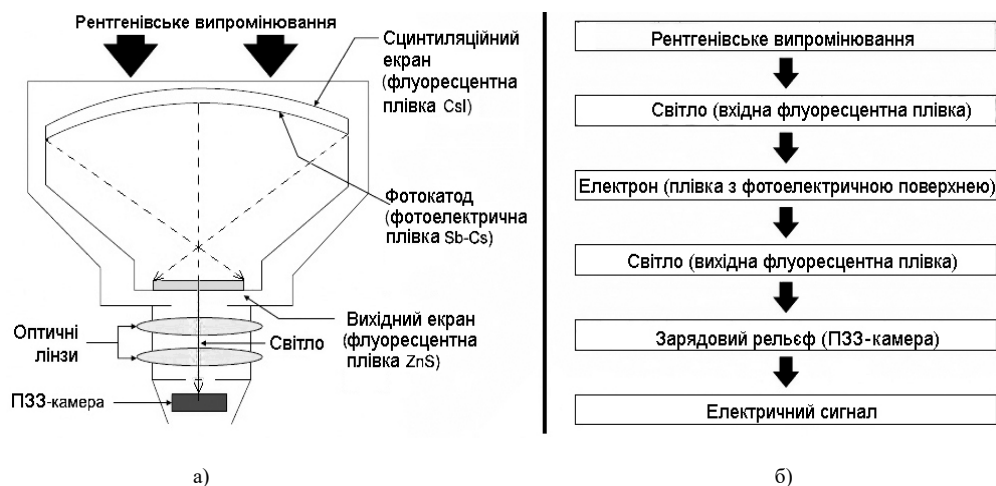


Рис. 1 Функціональна схема РЕОП (а) та схема перетворення інформації в пристрої (б)

ТАБЛИЦЯ 1 ПОРІВНЯЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Параметр	РЕОП		
	<i>Thales XRI 420 9"</i>	<i>Siemens 23-3M 9"</i>	<i>ФИЛИН 9Н765М</i>
Діаметр вхідного вікна, мм	230	230	230
Корисний діаметр вхідного вікна, мм	215	170	215
Коефіцієнт перетворення, кд/м ² /мР/с	200	148	–
Роздільна здатність, центр/70%/93%, пл/мм	4,8/5,6/6,4	5,2/5,8/6,4	4,0/5,0/6,2
Коефіцієнт контрасту (10%)	23/25/30	23/35/45	–/–/36
Відношення сигнал / шум, дБ	62	–	–
Вага, кг	18	31	38

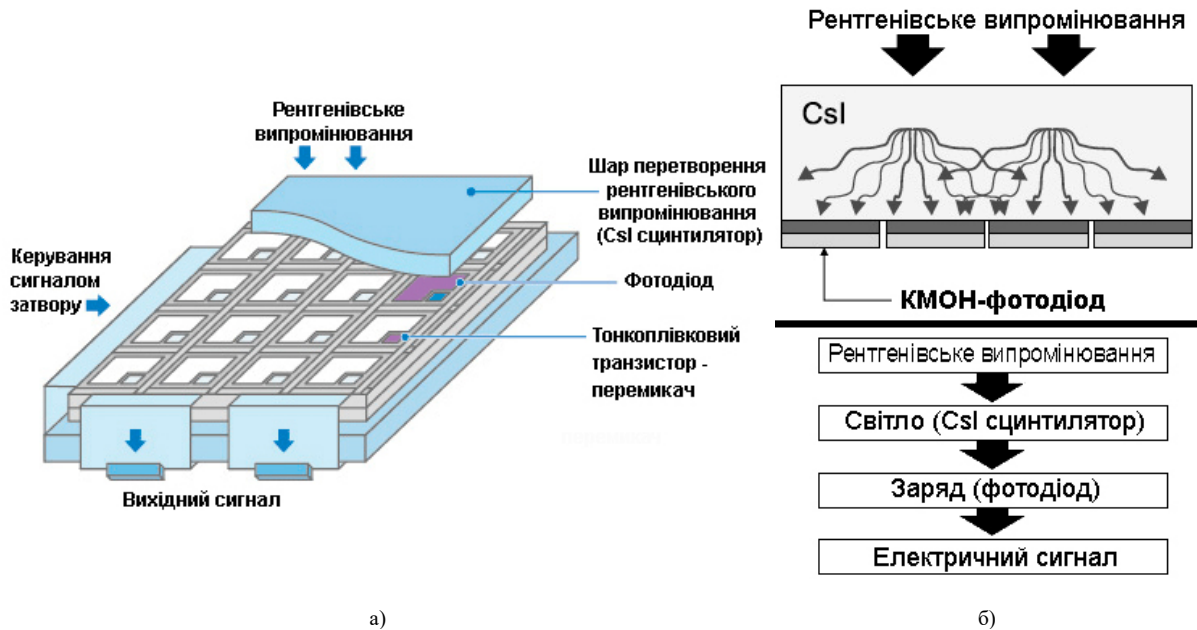


Рис. 2 Структура цифрового плоскопанельного детектора непрямого перетворення (а) та схема перетворення інформації в детекторі (б)

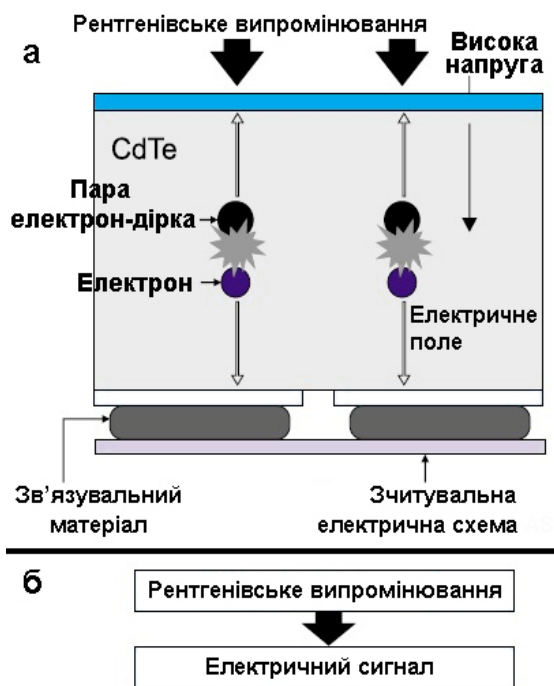


Рис. 3 Структура цифрового плоскопанельного детектора прямого перетворення (а) та схема перетворення інформації в детекторі (б)

III. ЦИФРОВИЙ ПЛОСКОПАНЕЛЬНИЙ ДЕТЕКТОР

Плоскопанельний рентгенівський цифровий детектор – це пристрій, що має високу роздільну здатність і призначений для отримання відеозображення у реальному часі в цифровій рентгеноскопії та рентгенографії. [20]–[23]

Рентгенівська панель складається з фотодіодної КМОН матриці, з вбудованою схемою обробки сигналу, скінтілятором, нанесеного на поверхню актив-

ної області матриці та цифрового інтерфейсу з розрядністю від 12 до 16 біт для безпосереднього перенесення даних на комп'ютер користувача (рис. 2). При цьому в детекторах можуть застосовуватися матриці «прямого» або «непрямого» перетворення рентгенівського випромінювання.

А. Цифрові детектори непрямого перетворення рентгенівського випромінювання

Принцип дії таких систем полягає в тому, що рентгенівські кванти, взаємодіючи зі скінтілятором, утворюють фотони світла. Потім вони перетворюються або безпосередньо в електричний сигнал (плоскі детектори), або в потік електронів у рентгенівському електронно-оптичному перетворювачі (РЕОП), який утворює видиме зображення на люмінофорному екрані [24]. В якості матеріалів панелей плоских детекторів застосовують аморфний кремній (αSi), а в якості скінтіляторів – йодид цезію (CsI), йодид натрію (NaI) або оксисульфід гадолінію ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$). Твердотільні перетворювачі мають більш високу роздільну здатність та динамічний діапазон, у порівнянні із РЕОП.

В. Цифрові детектори прямого перетворення рентгенівського випромінювання

У системах прямого перетворення (рис. 3) [6], [20] при дії рентгенівських квантів усередині напівпровідника генеруються електронно-діркові пари. Зовнішній шар такого плоского детектора є високовольтним електродом зміщення. Якщо прикласти напругу, виникатиме електричний струм, який може бути підсилений та перетворений у видиме зображення. В якості матеріалів для детекторів із прямим перетворенням застосовують аморфний селен (αSe) та монокристалічний телурид кадмію (CdTe). Внаслідок відсутності розсіювання та оптимального відношення сигнал/шум, якість зображення досягає якості середньозернистої плівки. Але шар із аморфного селену

може функціонувати у досить обмеженому діапазоні температур (від 5 до 30°C) та енергій рентгенівських квантів (до 180 кеВ). Шар із телуриду кадмію може функціонувати у більш широкому діапазоні температур та енергій (до 1000 кеВ), маючи при цьому у декілька разів більшу чутливість. Для цифрових детекторних систем (ЦДС), на відміну від «фосфорних» запам'ятовуваних пластин багаторазового використання, існує алгоритм корекції дефектних пікселів (не підсилюючих, надчутливих та недостатньо чутливих пікселів), який усереднює сигнали від сусідніх пікселів, використовуючи це середнє значення для виправлення дефектних пікселів. Така операція можлива за наявності хоча б трьох нормально працюючих сусідніх пікселів. Це дає змогу покращити контрастну чутливість, підвищити відношення сигнал/шум, а також зменшити час експозиції.

С. Гібридна сенсорна технологія

Ця технологія використовується компанією Princeton Instruments. Вона поєднує найкращі параметри ПЗЗ та КМОН технологій, даючи можливість отримати більшу чутливість та швидкодію. Обидві технології використовують захоплення фотонів за схожими принципами, але мають різні процедури зчитування [25]. КМОН прилади мають на кожному пікселі електричне коло, що робить тилове опромінення недоцільним. Його наявність також зменшує коефіцієнт заповнення та обмежує чутливість приладу. З іншого боку, така конструкція дає можливість отримати прямий доступ та неруйнівне зчитування. Ще однією перевагою КМОН технології є можливість об'єднання аналогової та цифрової електроніки на єдиному кристалі (детекторі). КМОН прилади можуть мати надзвичайно велику швидкодію зчитування, що дає можливість отримати високу частоту змінювання кадрів.

ПЗЗ матриці мають високий квантовий вихід. Вони використовуються для збирання та перетворення фотонів світла в електрони у потенціальних ямах. ПЗЗ матриці можуть опромінюватись з обох сторін, вони мають більшу чутливість ніж КМОН прилади. Гібридна сенсорна технологія виключає необхідність у підсилювачі для ПЗЗ. Заряд переміщується від ПЗЗ до КМОН кремнієвого кристалу, а потім підсилюється. КМОН підсилювач функціонує на кГц частотах при дуже низьких шумах. ПЗЗ розділяють на малі області та підключають їх до окремих підсилювачів. Таким чином, можна отримати високу пропускну здатність каналу, чутливість.

Д. ПЗЗ камери для прямого перетворення

ПЗЗ камери були спроектовані для приймання рентгенівських квантів у широкому діапазоні енергій (від 100 еВ до 100 кеВ). У залежності від цього розрізняють ПЗЗ з антирефракційним або глибоким збідненням шаром, ПЗЗ із тиловим або фронтальним опроміненням. Ширина епітаксialного шару підбирається так, щоб отримати найвищий квантовий вихід приладу. При фронтальному опроміненні він становить 20 мкм, а при тиловому – 15 мкм. Енергетична роздільна здатність ПЗЗ камер залежить від типу ПЗЗ, ефективності переносу заряду, теплового шуму та

лінійності характеристики по всьому динамічному діапазону. Середнє значення енергії, необхідної для створення однієї електронно-діркової пари у ПЗЗ, становить 3,65 еВ. [25]

Е. Плоскопанельні детекторні КМОН системи

Плоскопанельний детектор складається із сенсора та керуючого пристрою. Сенсор містить багато зарядових підсилювачів. Підсилений аналоговий сигнал передається на керуючий пристрій та перетворюється у цифровий вид. Основою плоскопанельного детектору є КМОН кристал, який складається з фотодіодної матриці, низькошумного підсилювача та вертикального регістру зсуву. КМОН технологія дозволяє отримати великий коефіцієнт заповнення елементів фотодіодної матриці: 79 % для 50x50 мкм пікселя, 87 % для 100 мкм пікселя. Для дослідження швидкоплинних процесів використовується режим розбиття 2x2 або 4x4. При цьому область матриці 2x2 (4x4) пікселя сприймається як єдиний елемент, даючи можливість збільшити вдвічі (або вчетверо) частоту змінювання кадрів. Просторова роздільна здатність такого детектора визначається за частотно-контрастною характеристикою [21], [26].

Виробництво інтегральних схем за КМОН технологією має розвинену промислову базу. Рівень шумів наблизився до рівня ПЗЗ матриць, тоді як динамічний діапазон та просторова роздільна здатність у декілька разів вищі. Вже досить скоро ціна таких панелей досягне рівня цін на РЕОП з подібними характеристиками, що дозволить більш ефективно застосувати їх у рентгенотелевізійних системах та комплексах. Порівняльні характеристики деяких виробників плоских детекторних систем наведені в табл. 2.

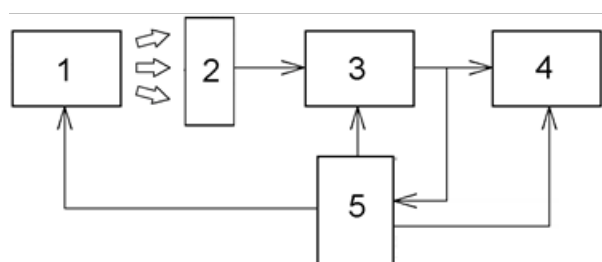
До переваг плоскопанельного детектора відносяться низький рівень шумів, велика стійкість до прямого рентгенівського випромінювання, низькі габаритні/вагові характеристики. До недоліків плоскопанельних детекторів треба віднести мале число кадрів в секунду та високу вартість (на 25–30% більше ніж РЕОПа). Поява на ринку детектора PerkinElmer XRD 0822 дозволяє стверджувати, що і ці недоліки будуть подолані в найближчий час, а вартість плоскопанельних детекторів буде зменшуватись та наблизиться до вартості РЕОПів.

IV. РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНІ СИСТЕМИ.

Підвищення вимог до продуктивності, оперативності та достовірності контролю призвели до необхідності використання автоматизованої системи, яка працює у режимі реального часу та характеризується оперативністю та простотою комп'ютеризації [6], [7], [16]. У загальному вигляді вся різноманітність сучасних типів РТВС може бути зведена до наступної структурної схеми (рис. 4а). У залежності від призначення, конкретного типу РТВС, кожна з перерахованих ланок може, в свою чергу, складатися з декількох різних структурних елементів, відмінних для різних систем навіть за фізичним принципом (наприклад: ПЗЗ-матриця чи плоскопанельний детектор). [6], [21], [27]

ТАБЛИЦЯ 2 ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУЧАСНИХ ПЛОСКИХ ДЕТЕКТОРНИХ СИСТЕМ

Параметр	Плоскопанельний детектор		
	<i>Perkin Elmer XRD 0822</i>	<i>Thales FlashScan 35</i>	<i>Hamamatsu C7942 CA-22</i>
Розмір робочої області, мм	295 x 360	296 x 406	120 x 120
Тип сцинтилятора	Gd ₂ O ₂ S/CsI	Gd ₂ O ₂ S	CsI
Кількість пікселів в робочій зоні	1024 x 1024	2240 x 3200	2400 x 2400
Розмір пікселя, мкм	200	127	50
Частота кадрів за секунду	25	1,4	1,9
Роздільна здатність, пл./мм	2	-	6
Відношення сигнал/шум, дБ	>88	-	-
Аналогоцифровий конвертер, біт	16	14	12
Діапазон рентгенівського випромінювання, кВ	20-15000	25-160	100
Вага, кг	3,7	9,1	2,4



а)



б)

Рис. 4 Узагальнена структурна схема сучасної РТВС (а) 1 – джерело рентгенівського випромінювання (РА); 2 – об'єкт, що досліджується; 3 – рентгенотелевізійний перетворювач інформації; 4 – відео-контрольний пристрій (ВКП); 5 – блок керування РТВС (включає комп'ютер). Зовнішній вигляд портативного рентгенотелевізійного комплексу «Норка М» (б).

РТВС поділяються на стаціонарні і мобільні (портативні), а численні варіанти побудови цифрових РТВС можна звести до кількох найпоширеніших схем:

А. Системи на базі підсилювача яскравості рентгенівського зображення

Принцип роботи оснований на перетворенні рентгенівського випромінювання у світлове випромінювання в шарі сцинтилятора. Одержане випромінювання передається через оптичну систему з наступним перетворенням світлового випромінювання в електричний сигнал ПЗЗ-матрицею. Дані системи мають деякі недоліки:

- у системі вихідна інформація спотворюється через велику кількість перетворень (розмиття в сцинтиляційному шарі, дисторсія зображення в оптиці перенесення);
- сцинтилятори, що використовуються як середовище перетворення рентгенівського випромінювання, схильні до ефекту "випалювання", що призводить до постійної деградації чутливості;
- деградація оптики перенесення під впливом рентгенівського випромінювання [2], [4], [16].

Системи з РЕОП мають режими електронно-оптичного збільшення, що задається перемиканням значень високої напруги на електродах РЕОП. При цьому на вихідне вікно фокусується зображення тільки з частини вхідного вікна і, таким чином, підвищується роздільна здатність системи. Ці особливості забезпечують високу якість зображення, що знижує стомлюваність оператора. До недоліків таких систем слід віднести їх чутливість до струсів і ударів, що ускладнює їх застосування у мобільних РТВС.

В. Системи на основі комбінації «сцинтилятор – оптика – ПЗЗ – матриця».

Ці системи основані на зйомці зображення з рентгенолюмінесцентного екрану за допомогою телевізійного перетворювача на ПЗЗ-матриці. Рентгенівське зображення перетворюється у видиме рентгенолюмінесцентним екраном. За допомогою світлосильного об'єктива це зображення проектується на ПЗЗ-матрицю телевізійної камери, яка перетворює світло в електричні сигнали, і з виходу камери стандартний телевізійний сигнал надходить у комп'ютерну систему для подальшої обробки та архівування. Вибір якості перетворювача світло-сигнал ПЗЗ-матриці, обумовлений характеристиками приладів із зарядовим зв'язком: високою квантовою ефективністю, що досягає -0,8, динамічним діапазоном, який перевищує 3000, малі споживані потужність та габарити, висока

механічна міцність, стійкість до вібрацій та електромагнітних полів, надійність і великий експлуатаційний термін роботи. [6], [16], [21]

C. Системи сканування на основі лінійки детекторів.

В системах сканування на основі лінійки детекторів використаний принцип просвічування об'єкта контролю (ОК) в'ялоподібним пучком рентгенівського випромінювання (РВ), який формується за допомогою щільного коліматора джерела випромінювання, і однієї або декількох лінійок детекторів (одновимірних матричних детекторів) також колімованим для зниження впливу розсіяного рентгенівського випромінювання. Вузкий в'ялоподібний пучок РВ, проходячи через ОК, опромінює лінійку детекторів, сигнали з кожного детектору посилюються і попередньо обробляються, а потім надходять через аналого-цифрові перетворювачі на комп'ютер, де вони нормалізуються і зберігаються, формуючи відповідний рядок відліків. Потім ці відліки візуалізуються на екрані дисплея, утворюючи рядок півтонування. Повне зображення формується шляхом одноразового сканування ОК горизонтальним в'ялоподібним пучком по вертикалі (або вертикальним пучком по горизонталі). Системи сканування на основі лінійки детекторів мають цілу низку переваг:

- відсічення розсіяного випромінювання;
- мале дозове навантаження на ОК;
- великий динамічний діапазон;
- висока ефективність реєстрації випромінювання;
- можливість контролю великогабаритних об'єктів;
- висока можливість автоматизації процесу.

В існуючих системах лінійки детекторів можуть мати довжину в кілька метрів з розміром одного детектора до 50 мкм, а число детекторів у лінійці від декількох десятків до декількох тисяч. Роздільна здатність 1-3 пар ліній/мм. До недоліків систем сканування на основі лінійки детекторів відноситься необхідність забезпечення однорідності до випромінювання по всіх елементах лінійки і порівняно низька продуктивність контролю [28], [29].

D. Системи на основі плоскпанельних матричних детекторів

Їх можна поділити на системи, що використовують детектори з сцинтиляційним шаром і без нього. Схеми перетворень інформації в цих системах суттєво відрізняються одна від одної за кількістю перетворень первинної інформації (рис. 3). У детекторах з сцинтиляційним шаром (непряме перетворення) у якості сцинтилятора використовуються сполуки цезію або гадолінію, а перетворювач світла в електричний заряд – матриця світлодіодів на основі аморфного кремнію. Детектори на основі сполук цезію мають перевагу перед детекторами на основі сполук гадолінію через монокристалічну структуру, крізь яку світло, що утворюється в результаті фото ефекту,

поширюється до фотодіодної матриці вздовж волокон. Це призводить до істотного зниження розсіювання світла, і як наслідок, до покращення роздільної здатності детектору [6].

РТВС з непрямим перетворенням рентгенівського випромінювання найбільш часто використовуються на практиці в діапазоні енергій 40 – 300 кеВ. Якість зображення для даного типу РТВС з використанням сучасних плоскпанельних детекторів перевищує якість, отриману на запам'ятовуваних пластинах, і наближається до якості зображення на панелях з аморфного селену. Більш того, лінійні детектори менш чутливі до властивостей навколишнього середовища, що робить можливим їх застосування у польових умовах і неконтрольованих процесах. Крім того, такі детектори мають більшу роздільну здатність і динамічний діапазон у порівнянні з РЕОП, але основним їх недоліком є висока ціна.

РТВС з прямим перетворенням рентгенівського випромінювання (для енергій рентгенівських квантів до 100 – 150 кеВ) на основі панелей з аморфного селену та монокристалічного телуриду кадмію, як найбільш поширені, дозволяють підвищувати якість зображення, що характерна для середньозернистої плівки, а також досягти оптимального відношення сигнал/шум та збільшення чутливості. Роздільна здатність таких систем може досягати – 7 пар ліній/мм. [30] За допомогою цифрових рентгенотелевізійних систем можна отримувати зображення, якість яких на порядок вища за якість рентгенівських плівок та комп'ютерної радіографії. Внаслідок великого відношення сигнал/шум для ЦДС можлива індикація дефектів, менших за розмір пікселя. Розміри твердотільних детекторів у декілька разів менші за РЕОП. До того ж вони не мають геометричних спотворень та відблисків. Іншою перевагою плоских детекторів є набагато швидкий процес обробки результатів при відносно високій якості зображення, що дає виграв у часі. Цифрова рентгенографія дозволяє зменшити дозу рентгенівського випромінювання за рахунок установки експозиції, при якій підтримується потрібний рівень шуму. У детекторах без використання сцинтиляційного шару, тобто з прямим перетворенням рентгенівського випромінювання в електричний заряд самим напівпровідником, використовуються монокристалічні, полікристалічні і аморфні напівпровідники. У найбільш поширених системах використовуються детектори на основі аморфного селену і монокристалічного телуриду кадмію. Останній має ряд переваг у порівнянні з іншими типами детекторів, а саме:

- велика чіткість зображення через відсутність сцинтиляційного шару та пов'язане з ним розсіювання;
- "ефект випалювання";
- високий коефіцієнт екранування рентгенівського випромінювання, що істотно знижує ефект тимчасової деградації зчитувальної електроніки;

ТАБЛИЦЯ 3 ПОРІВНЯЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕЯКИХ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ

№	Показник	“Шмель-100ТВ”	“Шмель-240ТВ”	“Очертание-ТВ”	“Рона”/”Норка”
1	Тип рентгенівських апаратів	Імпульсний	Імпульсний	Постійний	Постійний
2	Напруга на рентгенівській трубці, кВ	100	240	75/100	75/100
3	Розмір фокусної плями, мм	2,5	2,0		0,4
4	Можливість проведення контролю за перешкодою з сумарної товщиною стінок з: сталі, мм алюмінію, мм	10 35	19 72	10 40	10 40
5	Робоче поле контролю, мм x мм	180x240	240x320, 320x420	250x250 320x320	90x120 190x260 270x360 294x360
6	Роздільна здатність системи, піксель	768x570	768x570	795x596	768x570
7	Можливість роботи у реальному масштабі часу	+	+	+	+
8	Кількість зображень, що запам'ятовуються	5000	5000	за вимогою	3000
9	Звукове супроводження при запису кадру	+	+	–	–
10	Псевдорозфарбування	+	+	за вимогою	–
11	Режим автоматичного вибору телевізійною камерою експозиції	+	+	–	–
12	Температурний діапазон експлуатації, °С: блок керування та обробки, рентгенівський апарат, перетворювач	–5...+45 –30...+50	–5...+45 –30...+50	5...+35 –	5...+35 –
13	Зовнішнє живлення, В	≈24 ≈220	≈24 ≈220	≈24 ≈220	– ≈220
14	Час безперервної роботи від вбудованих акумуляторних батарей, години	2,5	2,5	2,0	–
15	Маса складових частин комплексу, кг: рентгенівський апарат перетворювач блок управління і обробки зображення Загальна маса, кг	6,2 3,1 8,5 18,8	8,9 3,5 8,0 21,9	12 4 – 6 9 30	15,0 6,2 15,0 36,2

- відсутність "фантомних зображень" характерних для аморфного селену при високих енергіях рентгенівського випромінювання (> 180 кеВ).

Електричні сигнали, що отримані на виході матричного детектора (рис. 3), зчитуються електронікою з використанням різних технологій (ПЗЗ, КМОП, тонкоплівкові транзистори) [6]. Системи на основі плоскочаспелельних матричних детекторів мають більш високу роздільну здатність і динамічний діапазон у порівнянні з РЕОП. Крім того, вони невеликі за

розмірами і можуть використовуватися в мобільних (портативних) системах.

Е. Мобільні (портативні) системи

Мобільні (портативні) системи використовуються, як правило, в польових умовах, відрізняються малою вагою та підвищеною стійкістю до тяжких умов експлуатації. Мобільні РТВС складаються з моноблочного рентгенівського апарату, рентгенотелевізійного перетворювача, блоку обробки і відображення [1], [30]. Моноблочні рентгенівські апарати постійного потенціалу, використовуються як дже-

рело випромінювання та містять високовольтний трансформатор, помножувач і рентгенівську трубку [31]. Джерелом електронів у більшості рентгенівських апаратів служить катод, що підігривається. Виняток становлять імпульсні рентгенівські трубки з холодним катодом, в яких використаний принцип автоелектронної емісії [32]–[34]. РТВС відносять до категорії імпульсних, якщо в них використовуються спеціальні рентгенівські трубки. Ці трубки генерують випромінювання у вигляді коротких (від одиниць наносекунд до десятка мікросекунд) імпульсів, які слідуєть з частотою від одиниць до 100 Гц.

Використання імпульсного рентгенівського випромінювання забезпечило, разом з вивченням балістичних і вибухових процесів, можливість широкого застосування для вирішення завдань дефектоскопії, технічної діагностики, а також використання у якості пошукових засобів [35], [36]. Типові розміри фокусних плям серійних рентгенівських трубок для портативних апаратів постійного потенціалу складають 1 - 2 мм, а імпульсних 1 - 3 мм для рефлекторних трубок і 2 - 5 мм для трансмісійних [33], що забезпечує роздільну здатність достатню для вирішення більшості завдань неруйнівного контролю. Необхідно відмітити, що імпульсні рентгенівські апарати генерують випромінювання у вигляді пачки рентгенівських фотонів, при цьому їх щільність в пачці дуже висока. Це обумовлено тим, що випромінювання накопиченої енергії займає не більше 10 - 20 нс [32], [34]. Імпульсні рентгенівські апарати, не допускають регулювання напруги і струму, а тому, перш ніж приступити до контролю різних матеріалів різної товщини, необхідно підібрати апарат, розрядник-загострювач якого спрацює при заданій напрузі. Неможливість регулювання напруги компенсується можливістю вибору експозиції, під якою розуміється кількість імпульсів випромінювання. По роздільній здатності, чутливості контролю і просвічуваній товщині портативні апарати постійного потенціалу істотно перевершують імпульсні аналоги, наприклад, такі, як "АРИНА" і "ШМЕЛЬ". Проте такі переваги імпульсних апаратів як мала вага, невеликі розміри, низька вартість забезпечують досить широке їх застосування. Системи постійного та імпульсного потенціалу реалізовані як на перетворювачах типу РЕОП, твердотільної багатоелементної матриці, так і на основі систем, що складаються з сцинтиляційних перетворювачів з подальшою реєстрацією світлового потоку світлочутливими детекторами типу ПЗЗ матриць.

До складу мобільних рентгенотелевізійних систем також входить блок обробки та візуалізації. Блок призначений для управління і синхронізації роботи рентгенівського апарата і перетворювача та дозволяє: зберігання і обробку зображень, одержаних від передавальної цифрової телевізійної камери перетворювача, візуалізацію рентгенівських зображень на екрані монітора, що входить до складу блоку, а також ведення архіву зображень.

Впровадження телевізійної техніки у системи рентгеноскопії створило принципово нові можливості. З'явилася можливість за рахунок методів електронної техніки здійснювати фільтрацію зображень з метою

зменшення шумів, корекцію просторових та часових спотворень. До арсеналу засобів оператора РТВС додалися можливості затримки у часі та запам'ятовування зображень, інтегрування зображень з метою підвищення відношення сигнал/шум, додавання чи віднімання зображень для виділення їх визначених елементів або компенсації фону, документування зображень, для тривалого зберігання в електронному вигляді на носіях того чи іншого типу, у тому числі у глобальній мережі інтернет.

В табл. 3 наведені порівняльні характеристики деяких рентгенотелевізійних комплексів імпульсного та постійного потенціалу, які застосовують цифрові детекторні системи (ЦДС).

ВИСНОВКИ

Розвиток і вдосконалення технологій та технічних засобів у рентгенівському неруйнівному контролі йде по шляху використання високостабільних джерел випромінювань, сучасних радіаційних перетворювачів, комп'ютерних методів управління ними, застосування новітніх методів цифрової обробки зображень та їх аналізу. Йде активний перехід систем контролю з використанням радіаційних РЕОП на системи з використанням багатоелементних перетворювачів, що випускаються за технологіями мікроелектроніки: з аморфним селеном і аморфним кремнієм. Застосування телевізійного каналу в таких системах значно розширює функціональні можливості апаратури: ефективність, чутливість, роздільну здатність.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] V. V. Kljuev, F. R. Sosnin, and A. V. Kovalev, *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika: spravochnik [Non-destructive testing and diagnostics: reference book]*. Moscow, Russia: Mashynostroenie, 2005. ISBN: 5-217-03300-2
- [2] V. V. Kljuev and F. R. Sosnin, *Teoriya i praktika radiacionnogo kontrolja. [Theory and practice of radiation monitoring]*. Moscow, Russia: Mashynostroenie, 1998.
- [3] M. B. Lebedev, V. A. Sidulenko, and V. A. Udov, "Analiz sovremennogo sostojanija i razvitija sistem cifrovoj rentgenografii [Analysis of the current state and development of digital radiography systems]," *Bull. Tomsk Polytech. Univ.*, vol. 312, no. 2, pp. 47–55, 2008. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/ru/archive/old/article.html?id=187641&journalId=176237>
- [4] I. B. Belova and V. M. Kitaev, "Cifrovye tehnologii poluchenija rentgenovskogo izobrazhenija: princip formirovanija i tipy (obzor literatury) [Digital technology for X-ray imaging: the principle of formation and types (literature review)]," *Med. vizualizacija*, no. 1, pp. 30–40, 2000.
- [5] O. A. Sidulenko, "Sovremennoe sostojanie i napravlenija sovershenstvovanija tehnologij radiacionnogo kontrolja [Current state condition and improvement directions of X-Ray inspection technologies]," *Expo. Oil Gas*, no. 3 (28), pp. 14–16, 2013. URL: <http://runeft.ru/en/articles/39/55382.htm>
- [6] A. A. Maiorov, "Cifrovye tehnologii v radiacionnom kontrole. [Digital technologies in radiation monitoring]," *V MIRE Nerazrus. KONTROLJA (V MIRE NK)*, no. 3 (45), pp. 5–12, 2009. URL: <http://www.ndtworld.com/catalog.html?itemid=115&choice=1>
- [7] S. V. Denbnoveckij and O. V. Leshhishin, *Elektronni sistemi. Navchalnyi posibnyk. [Electronic systems. Schoolbook.]* Kyiv, Ukraine: NTUU "KPI", 2011. ISBN: 978-966-622-418-0
- [8] A. I. Mazurov, "Poslednie dostizhenija v cifrovoj rentgenotehnike" ["Recent advances in digital X-ray technology]," *Med. Teh.*, no. 5, pp. 10–14, 2010.
- [9] D. Bernard and K. Brajnt, "Ispol'zovanie poslednih tehnologicheskikh dostizhenij dlja rentgenovskogo kontrolja



- jelektronnyh izdelij [Use of the latest technological advances for X-ray inspection of electronic products],” *Technol. Electron. Ind.*, no. 2, pp. 16–21, 2012. URL: http://www.tech-e.ru/2012_2_34.php
- [10] S. Gaft, “Rentgenovskij kontrol’ – moshnoe sredstvo dlja diagnostiki i lokalizacii defektov sovremennyh pechatnih uzlov [X-ray inspection is a powerful tool for diagnosing and localizing defects in modern printing units],” *Kompon. i Tehnol.*, no. 7, 2004. URL: www.kit-e.ru/articles/circuitbrd/2004_07_182.php
- [11] V. V. Kljuev, “Sovremennye sredstva i metody cifrovoj radiacionnoj defektoskopii [Modern means and methods of digital radiation defectoscopy],” *V MIRE Nerazrus. KONTROLYA (V MIRE NK)*, no. 4, pp. 52–56, 2002.
- [12] M. Shmakov, “Vybor sistemy rentgenovskogo kontrolja. Vzglyad tehnologa [Selecting the X-ray inspection system],” *Technol. Electron. Ind.*, no. 4, pp. 60–68, 2006. URL: http://www.tech-e.ru/2006_4_60.php
- [13] I. I. Cukkerman, “Puti povysheniya informacionnoj emkosti v teledidenii [Ways to improve information capacity in television],” *Usp. nauchnoj Fotogr.*, no. XXIII, pp. 58–62, 1985.
- [14] L. Y. Mogilner and E. N. Markina, “Opyt primeneniya tehnologii cifrovoj radiografii v praktike stroitel’stva i jekspluatcii truboprovodov [Experience of radiography digital technology in practice of construction and operation of pipelines],” *V MIRE Nerazrus. KONTROLYA (V MIRE NK)*, no. 2, pp. 42–46, 2009. URL: <http://www.ndtworld.com/catalog.html?itemid=114&choice=8>
- [15] V. A. Troickij, “Perspektivy razvitiya radiacionnogo kontrolja svarnyh soedinenij [Perspective for the development of radiation monitoring of welded joints],” *Qual. Control Tools Tech.*, no. 1 (34), pp. 5–13, 2015. URL: <http://mpky.nung.edu.ua/uk/content/%E2%84%9634-2015>
- [16] V. A. Troitskii, S. R. Mikhailov, R. A. Pastovenskii, and D. S. Shilo, “Sovremennye sistemy radiacionnogo nerazrushajushhego kontrolja [Modern systems of radiation nondestructive inspection],” *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrus. Kontrol.*, no. 1, pp. 23–35, Jan. 2015. DOI: [10.15407/tdnk2015.01.03](https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01.03)
- [17] D. N. Nikolaev, “Jelektronno-opticheskie preobrazovateli. Istorija razvitiya i vidy pokolenij [Electron-optical converters. History of development and types of generations],” *Proc. Tomsk State Univ. Control Syst. Radioelectron.*, no. 1, pp. 29–33, 2007. URL: <https://journal.tusur.ru/en/archive/1-2007/electron-optical-converters-history-of-development-and-kinds-of-generations>
- [18] “Filin 16N2048M.” [Online]. Available: <http://www.tehastor.ru/index.php?page=filin>. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [19] “Siemens HIDEQ 33-4 ISX (13») datasheet.” Siemens. URL: http://w9.siemens.com/cms/oemproducts/Home/Products/Documents/ds_HIDEQ_33-4_ISX_eng_2012-02.pdf
- [20] A. Litvinov, “Vysokoe kachestvo izobrazhenija. Poslednee pokolenie detektorov rentgenovskogo izluchenija ‘SID-A50’ [High quality of image. The latest generation of X-ray detectors ‘SID-A50’],” *Technol. Electron. Ind.*, no. 6, pp. 44–47, 2011. URL: http://www.tech-e.ru/2011_6_44.php
- [21] “Flat panel sensor C7942CA-22 | Hamamatsu Photonics.” [Online]. Available: <http://www.hamamatsu.com/us/en/community/xndt/product/search/C7942CA-22/index.html>. [Accessed: 10-Jun-2017].
- [22] A. A. Borisov, J. A. Vej, A. I. Mazurov, and M. B. Jelinson, “O dvuh tehnologijah postroeniya cifrovychh priemnikov rentgenovskih izo-brazhenij [About two technologies for building digital x-ray re-ceivers],” *Med. Teh.*, no. 5, pp. 7–10, 2006.
- [23] M. S. Grigorov, A. A. Nevrov, and O. O. Basov, “Raspoznavanie kontaktnyh ploshhadok kristallov integral’nyh mikroshem na rentgenovskih izobrazhenijah [Recognition of contact areas of crystals of integrated microcircuits on X-ray images],” *Inf. Syst. Technol.*, no. 1, pp. 59–65, 2015.
- [24] M. Wronski, “Development of a Flat Panel Detector with Avalanche Gain for Interventional Radiology,” University of Toronto, 2009. URL: <https://tspace.library.utoronto.ca/handle/1807/19249>
- [25] “Excellence in X-ray Detection. Advanced X-ray Cameras for Scientific and Industrial Applications.” Princeton Instruments, p. 76, 2010. URL: http://www.princetoninstruments.com.cn/userfiles/files/assetLibrary/Catalogs/Princeton_Instruments-X-ray-camera-brochure_Final_B0_web.pdf
- [26] M. Farrier, T. Achterkirchen, G. Wecksler, and A. Mrozack, “Shirokoformatnye KMOP-sensory s aktivnymi pikselami dlja cifrovoj rentgenografii [Very Large area CMOS active-pixel sensor for digital radiography],” *Photonics*, no. 2, pp. 88–99, 2013. URL: <http://www.photonics.su/journal/article/3655>
- [27] M. S. Grigorov, “Classification of Digital Systems of Non-Destructive X-Ray Control of Microelectronic Products,” *SPIIRAS Proc.*, vol. 4, no. 35, p. 94, 2014. DOI: [10.15622/sp.35.7](https://doi.org/10.15622/sp.35.7)
- [28] N. N. Blinov and E. Al., “Issledovanie parametrov skanirujushhih rentgenovskih sistem [Investigation of the parameters of scanning X-ray systems],” *Med. Teh.*, no. 5, pp. 8–11, 2004.
- [29] V. A. Udod, V. A. Klimenov, A. I. Buller, E. J. Usachev, and A. K. Temnik, “Optimizacija osnovnyh parametrov mnogokanal’nyh skanirujushhih sistem cifrovoj radiografii [Optimization of the main parameters of multichannel scanning systems of digital radiography],” *Izv. Vyss. uchebnyh Zaved. Fiz.*, vol. 56, no. 1–2, pp. 254–257, 2013. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21635406>
- [30] “Rentgenotelevizionnyie sistemy [X-ray television systems].” [Online]. Available: <http://www.unitest-roentgen.ru/produksiya/rentgenotelevizionnyie-sistemy-kontrast/213-rentgenotelevizionnyie-sistemy-kontrast-pd-s-ploskopanelnymi-detektorami>. [Accessed: 10-Jun-2017].
- [31] D. Bernard, “Kriterii vybora rentgenovskoj trubki [X-ray tube selection criteria],” *Technol. Electron. Ind.*, no. 4, pp. 38–43, 2010. URL: http://tech-e.ru/2010_4_38.php
- [32] G. A. Mesjac, *Impul’snaja jenergetika i jelektronika [Impulse energy and electronics]*. Moscow, Russia: Nauka, 2004. ISBN: 5-02-033049-3
- [33] S. P. Vavilov and V. I. Gorbunov, *Impul’snoe rentgenovskoe izluchenie v defektoskopii [Pulsed x-ray radiation in defectoscopy]*. Moscow, USSR: Energoatomizdat, 1985.
- [34] A. I. Pushkarev, J. I. Isakova, R. V. Sazanov, and G. E. Holodnaja, *Generacija puchkov zarjzhennyh chastic v diodah so zryvo-jemissionnym katodom [Generation of charged particle beams in diodes with explosive emission cathode]*. Moscow, Russia: Fizmatlit, 2013. ISBN: 978-5-9221-1411-0
- [35] N. G. Belii, V. N. Bukhenskii, S. R. Mikhailov, N. V. Slobodjan, and D. S. Shilo, “Otnositel’naja chuvstvitel’nost’ rentgenotelevizionnyh sistem na osnove impul’snyh rentgenovskih apparatov [Relative sensitivity of X-ray television systems based on pulsed X-ray units],” *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrus. Kontrol.*, no. 1, pp. 39–44, 2013. URL: <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/2013/01/06>
- [36] N. G. Bely, S. V. Denbnovetskii, A. V. Leshchishin, S. R. Mikhailov, N. V. Slobodjan, and V. A. Troitskii, “Otnositel’naja chuvstvitel’nost’ rentgenotelevizionnyh sistem na osnove vysokochuvstvitel’nyh PZS-kamer i rent-genovskih monokristallicheskih jekranov [Relative sensitivity of X-ray television systems based on high-sensitivity CCD cameras and X-ray single-crystal screens],” *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrus. Kontrol.*, no. 2, pp. 34–40, 2007.

Надійшла до редакції 13 червня 2017 р.



Улучшение параметров рентгенотелевизионных систем на основе электронных преобразователей

Шинкаренко Н. В., ORCID [0000-0003-1650-4783](https://orcid.org/0000-0003-1650-4783)

e-mail: shinkarenko@fel.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Отмечены преимущества плоскпанельных детекторов, которые являются основой перспективной цифровой рентгенотехники, по сравнению с рентгеновской пленкой, запоминающими пластинами компьютерной радиологии и электронно-оптическими трубками. Среди преимуществ можно отметить экономию времени благодаря отсутствию химической обработки и возможность цифровой передачи данных, а также лучшее качество изображения. Описаны наиболее важные параметры различных технологий. Проведено сравнение современных плоскпанельных детекторов и рентгеновских электронно-оптических преобразователей, а также рентгенотелевизионных систем постоянного и импульсного действия.

Библ. 36, рис. 4, табл. 3.

Ключевые слова — плоский детектор; КМОП; ПЗС; рентген.

UDC 621.397.13

Improvement of parameters x-ray television systems on the basis of electronic converters

N. V. Shynkarenko, ORCID [0000-0003-1650-4783](https://orcid.org/0000-0003-1650-4783)

e-mail: shinkarenko@fel.kpi.ua

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—Flat Panel Detectors (FPD) emerge as a next-generation digital x-ray technology. The numerous advantages of flat panel detectors over x-ray film, computed radiography image plates, and image-intensifier tubes are given. They include time efficiency through bypassing chemical processing and the ability to digitally transfer and enhance images. The most important parameters of different technologies are discussed. The comparison table of modern FPD is presented.

Emergence and distribution of industrial television, creation of different types of vacuum transfer tubes, in particular for x-ray range, and then and their solid-state analogs promoted use and development the x-ray TV systems of methods of researches. In comparison with radiographic these methods have essential advantages and open essentially new opportunities of researches. With creation and mass introduction of modern computer facilities, in particular her attraction to processes of registration, visualization and processing of shadow x-ray images of objects. Now the special branch is put by x-ray TV systems of pulse action that are widely used in medicine, defectoscopy, military science and different technological processes. Thanks to a number of essential positive qualities (the small weight and dimensions, simplicity of a design, an opportunity of both the panoramic, and directed raying, the low power consumption and also an opportunity to control dynamic objects and processes) devices have received the greatest use in technology of nondestructive control of materials in non-stationary conditions.

The device and the scheme of operation of the x-ray electron-optical converter with an axial arrangement of the receiver is considered. As the converter light signal matrixes on the basis of charge-coupled devices, and also CMOS sensors are



used. Transformation of x-ray radiation to the image, available to the operator, takes place several stages. At each step of transformations primary information is distorted that leads to deterioration in the visual image. Key parameters of x-ray electron-optical converter are specified, shortcomings of this type of technologies are noted.

By means of digital the x-ray TV systems of systems it is possible to receive images which quality is much higher qualities of x-ray films and computer radiography. As a result of the big relation signal/noise for digital detector system possible indication of defects, is less than the size of pixel. The sizes of solid-state detectors several times smaller for x-ray electron-optical converter. Besides they have no geometrical distortions and reflections. Other advantage of flat detectors is much faster processing of results at rather high quality of the image which gives a gain in time. The digital X-ray analysis allows to reduce a dose of x-ray radiation due to installation of an exposition at which the necessary noise level is supported.

The development and improvement of technologies and technical means in the x-ray non-destructive control has taken the way of using highly stable sources of radiation, modern radiation converters, computer methods of their management, application of the newest methods of digital image processing and their analysis. There is an active transition of control systems with the use of radiation x-ray electron-optical converter to systems using multi-element transducers manufactured by microelectronics: amorphous selenium and amorphous silicon. The use of a television channel in such systems greatly expands the functionality of the equipment.

Ref. 36, fig. 4, tabl. 3

Key words — Flat Panel Detector; CMOS; CCD; X-Ray.

