

СПЕКТРАЛЬНА ВІДПОВІДНІСТЬ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ЕКРАНА ДО СЕНСОРА В РЕНТГЕНОТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМАХ

С.Р. Михайлов^{1,2}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: smihajlov@ukr.net

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Email: ndt@paton.kiev.ua

Плівкова радіографія досі є поширеним методом неруйнівного контролю якості матеріалів і виробів у всіх галузях промисловості завдяки добре відпрацьованій нормативній базі та існуючій інфраструктурі (фотолабораторії, обладнання, кваліфікований персонал тощо). Однак суттєві недоліки плівкової радіографії (низька продуктивність і висока вартість контролю, неможливість контролю об'єктів у режимі реального часу) стимулюють розробку нових методів реєстрації рентгенівських зображень, зокрема цифрової радіографії. Цифрова рентгенографія реалізується за допомогою цифрових рентгенотелевізійних систем. Наразі використовуються різні цифрові рентгенотелевізійні системи: системи на основі рентгенівських електронно-оптичних перетворювачів, скануючі системи на основі лінійних детекторів, системи на основі напівпровідникових плоскочасових детекторів, системи типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗС- (КМОН-) сенсор» та ін. Останні системи мають низку переваг перед іншими: високі чутливість контролю та просторова роздільна здатність; можливість зміни рентгенівського сцинтиляційного екрана, що дозволяє змінювати розмір робочого поля та ін. параметри системи; короткий час отримання зображення; простота конструкції; малі габарити та вага; низька вартість. Для забезпечення високої чутливості контролю використовуються високочутливі ПЗС- (КМОН-) сенсори, світлосильні об'єктиви та рентгенівські екрани з високою конверсійною ефективністю. Однак важливою умовою досягнення високої чутливості контролю є відповідність спектральної характеристики рентгенівського випромінювання спектральній характеристиці чутливості ПЗС- (КМОН-) сенсора. Метою роботи є дослідження спектральної відповідності найбільш розповсюджених та ефективних рентгенівських екранів до низки сучасних ПЗС- (КМОН-) сенсорів. Виконано розрахунки коефіцієнтів спектральної відповідності для сцинтиляційних рентгенівських екранів до ПЗС- та КМОН-сенсорів. Для розрахунку коефіцієнтів спектральної відповідності використано відношення чутливості ПЗС- та КМОН-сенсорів до спектра, що випромінюється екраном, до максимальної чутливості сенсора. Побудовано таблицю коефіцієнтів спектральної відповідності рентгенівських екранів до ПЗС- (КМОН-) сенсорів. Визначено, що найкращу спектральну відповідність мають комбінації екрана Gd2O2S(Tb) і ПЗС-сенсора ICX285AL, КМОН-сенсора IMX421, ПЗС-сенсора ICX674ALG, КМОН-сенсора MT9M034 та КМОН-сенсора IMX174. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: цифрова рентгенографія, рентгенівська телевізійна система, рентгенівський екран, ПЗС-сенсор, КМОН-сенсор, взаємне спектральне узгодження

Вступ. Плівкова радіографія досі є розповсюдженим методом неруйнівного контролю якості матеріалів і виробів в усіх галузях промисловості з-за добре відпрацьованої нормативної бази та існуючої інфраструктури (фотолабораторії, обладнання, кваліфікований персонал тощо). Однак суттєві недоліки плівкової радіографії (низька продуктивність і висока вартість контролю, неможливість контролю об'єктів у реальному часі) стимулюють розробку нових методів реєстрації рентгенівських зображень, зокрема цифрової рентгенографії [1].

Цифрова рентгенографія реалізується за допомогою цифрових рентгенотелевізійних систем (РТВС). Нині використовуються різноманітні цифрові РТВС як непрямого перетворення рент-

генівських зображень, так і системи прямого перетворення: системи на основі рентгенівських електронно-оптичних перетворювачів (РЕОП), скануючі системи на основі лінійних детекторів, системи на основі напівпровідникових плоскочасових детекторів, системи типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗС- (КМОН-) сенсор» та ін. Системи на основі напівпровідникових плоскочасових детекторів є одними з найперспективніших. Однак такі системи мають суттєві недоліки: високу вартість та обмежену радіаційну стійкість напівпровідникових детекторів, що призводить до скорочення строку служби таких систем [2, 3].

Альтернативою системам на основі плоскочасових детекторів є рентгенотелевізійні системи типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗС- (КМОН-) сенсор». Такі системи мають низку переваг перед іншими: високі чутливість контролю та просторова роздільна здатність; можливість

зміни рентгенівського скінтіляційного екрана, що дозволяє змінювати розмір робочого поля та інші параметри системи; малий час отримання зображення; простота конструкції; малі габарити й вага; низька вартість. Для забезпечення високої чутливості контролю в системах застосовують високочутливі ПЗЗ-(КМОН-) сенсори, світлосильні об'єктиви та рентгенівські екрани з високою конверсійною ефективністю.

Проте важливою характеристикою рентгенівських екранів є спектр випромінювання. Спектральні характеристики випромінювання екранів вирізняються зазвичай максимумом випромінювання на певній довжині хвилі та шириною смуги випромінювання. А всі ПЗЗ-(КМОН-) сенсори є селективними приймачами світла та мають свої спектральні характеристики чутливості. Тому ефективність екрана в системі значною мірою залежить від ступеня його спектральної відповідності до ПЗЗ-(КМОН-) сенсора, і для досягнення високої чутливості контролю необхідно забезпечити високий ступінь спектральної відповідності характеристики випромінювання рентгенівського екрана до спектральної характеристики чутливості ПЗЗ-(КМОН-) сенсора [4].

Метою роботи є дослідження спектральної відповідності найбільш розповсюджених та ефективних рентгенівських екранів до низки сучасних ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів.

Взаємна спектральна відповідність рентгенівських екранів і ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів. Якщо спектральна характеристика випромінювання рентгенівського екрана $I(\lambda)$, то променевий потік випромінювання Φ від екрана становить:

$$\Phi = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі світла.

Якщо спектральна характеристика чутливості ПЗЗ-(КМОН-) сенсора $S(\lambda)$, то величина ефективного потоку випромінювання F , що визначає дію на даний сенсор усього випромінювання:

$$F = \int_0^{\infty} I(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

Оскільки всі ПЗЗ-(КМОН-) сенсори є селективними приймачами світла, ефективність екрана значною мірою залежить від ступеня його спектральної відповідності до сенсора. Згідно з (1) та (2) відношення ефективностей двох екранів, спектри випромінювання яких вирізняються функціями $I_1(\lambda)$ та $I_2(\lambda)$, при використанні їх з одним і тим

самим сенсором, може бути наведено у вигляді рівняння:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\int_0^{\infty} I_1(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} I_2(\lambda)S(\lambda)d\lambda} = \frac{(I_{max})_1 \int_0^{\infty} I'_1(\lambda)S'(\lambda)d\lambda}{(I_{max})_2 \int_0^{\infty} I'_2(\lambda)S'(\lambda)d\lambda} \quad (3)$$

де $S(\lambda)$ – спектральна характеристика чутливості сенсора; штрихом помічені величини, що нормовані по максимуму:

$$I'(\lambda) = I(\lambda) / I_{max}; S'(\lambda) = S(\lambda) / S_{max} \quad (4)$$

З іншого боку, відношення відповідних променевих потоків від екранів становить:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\int_0^{\infty} I_1(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} I_2(\lambda)d\lambda} = \frac{(I_{max})_1 \int_0^{\infty} I'_1(\lambda)d\lambda}{(I_{max})_2 \int_0^{\infty} I'_2(\lambda)d\lambda} \quad (5)$$

З виразів (3) та (5) знаходимо:

$$\frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{\Phi_1}{\Phi_2}\right) \cdot \left(\frac{K_1}{K_2}\right), \quad (6)$$

$$\text{де } K_i = \frac{\int_0^{\infty} I'_i(\lambda)S'(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} I'_i(\lambda)d\lambda} \quad (7)$$

Звідси випливає, що відношення ефективних потоків дорівнює відношенню променевих потоків, помноженому на відношення відповідних коефіцієнтів K_i . Оскільки відмінність ефективного потоку від променевого визначається спектральними характеристиками джерела та приймача світла, то величина K є мірою їхньої взаємної спектральної відповідності та має назву коефіцієнта спектральної відповідності.

Таким чином, коефіцієнт спектральної відповідності K являє собою чутливість ПЗЗ-(КМОН-) сенсора до спектра, що випромінюється рентгенівським екраном, віднесена до максимальної чутливості сенсора. Цей коефіцієнт досягає найбільшого значення, що дорівнює одиниці, у тому випадку, коли відносна чутливість $S(\lambda)$ ПЗЗ-(КМОН-) сенсора є максимальною, тобто дорівнює одиниці в усій спектральній області випромінювання екрана. Або, іншими словами, коли випромінювання екрана сконцентровано в області довжин хвиль, при яких характеристика $S(\lambda)$ досягає найбільшого значення. У всіх інших випадках, у тому числі й при збігу максимумів смуги випромінювання екрана та смуги чутливості сенсора, $K < 1$. Отже

найбільша спектральна відповідь може бути отримана у разі рентгенівських екранів із вузькими смугами випромінювання.

Розрахунки коефіцієнтів спектральної відповідності. Для розрахунку коефіцієнтів спектральної відповідності були обрані монохромні ПЗЗ-сенсори: ICX285AL [5], ICX274AL [6], ICX674ALG [7], KAI2020 [8]; а також монохромні КМОН-сенсори: IMX174 [9], IMX421 [10], IMX422 [11], IMX432 [12], MT9M034 [13].

В останні роки КМОН-сенсори за такими параметрами, як чутливість і рівень власних шумів, зрівнялися з ПЗЗ-сенсорами. У той же час КМОН-сенсори у порівнянні з ПЗЗ-сенсорами мають такі суттєві переваги, як: вища швидкість зчитування зображень, можливість зчитування окремих фрагментів повних зображень, значно нижча вартість. Усе це призводить до того, що високочутливі телевізійні камери, які застосовуються в РТВС, усе частіше розробляються на основі КМОН-сенсорів.

Одним із критеріїв вибору сенсорів був великий розмір пікселя для забезпечення високої чутливості контролю РТВС. В обраних сенсорах розмір пікселя складає 4,5...9 мкм. Виключенням є сенсор MT9M034 фірми ON Semiconductor з розміром пікселя 3,75 мкм, але який має високу чутливість (5,48 В/лк·с). Іншою вимогою була якомога більша кількість пікселів сенсора для забезпечення високої просторової роздільної здатності РТВС.

У якості сцинтиляційних рентгенівських екранів обрано: вольфраматні CaWO_4 , лужно-галогенні CsI(Tl) та NaI(Tl) [4,14], оксисульфідні $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ [14,15,16] та напівпровідникові ZnSe(Te) [4] екрани. У дужках хімічної формули рентгенолюмінофору рентгенівських екранів наведено елементи, які використовуються у якості активатора.

Спектральні характеристики випромінювання екранів і чутливості сенсорів у технічній та довідниковій літературі наведено у вигляді графіків. А для розрахунку коефіцієнтів спектральної відповідності K потрібні аналітичні залежності випромінювання екранів і чутливості сенсорів від довжини хвилі світла. Тому графічні спектральні характеристики екранів і сенсорів були інтерпольовані за допомогою кубічних сплайнів і нормовані за допомогою (4) за максимальним значенням.

На рис. 1 зображено інтерпольовані спектральні характеристики обраних КМОН-сенсорів і рентгенівських екранів, а на рис. 2 – інтерпольовані спектральні характеристики обраних ПЗЗ-сен-

сорів і рентгенівських екранів. Розрахунок коефіцієнтів спектральної відповідності K виконувався за (7). Інтерполяція кубічними сплайнами спектральних характеристик і розрахунки коефіцієнтів спектральної відповідності K виконувались у програмному середовищі MathCAD. Результати розрахунків коефіцієнтів спектральної відповідності K рентгенівських екранів до ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів наведено в таблиці.

Як видно з таблиці, найменші значення коефіцієнтів спектральної відповідності має екран ZnSe(Te) до більшості ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів (окрім IMX422, IMX432 та ICX674ALG). Причиною цьому є те, що максимум випромінювання цих екранів зміщений у червону область спектру. Тому цей екран доцільно використовувати в комбінації з перерахованими сенсорами, у яких спектральна характеристика чутливості охоплює червону область спектру.

Найбільші значення коефіцієнтів спектральної відповідності мають екрани $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ та CaWO_4 до більшості сенсорів. Рентгенівські екрани CaWO_4 поступаються за конверсійною ефективністю та роздільною здатністю гадолінієвим екранам $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ і використовуються переважно в якості підсилюючих екранів у комбінації з радіографічною плівкою.

Рентгенівські екрани $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ являють собою шар рентгенолімінофора, який нанесений на гнучку пластикову підкладку. Екрани призначені для використання у РТВС різного призначення, а також у цифрових флюорографах. Прикладом таких екранів є екрани РЕНЕКС ЕРЛ-Г ЗАТ «РЕНЕКС», які мають роздільну здатність 5,5...20 пар лін./мм і розмір 40×40 см. За спектральною відповідністю до більшості сенсорів екрани $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ переважають решту екранів. Найкращу спектральну відповідність має гадолінієвий екран $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ до ПЗЗ-сенсора ICX285AL.

Монокристалічні рентгенівські екрани CsI(Tl) мають гіршу на 6...8 % спектральну відповідність до більшості сенсорів у порівнянні з гадолінієвими екранами $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$. Найкраща спектральна відповідність екранів CsI(Tl) досягається у комбінації з КМОН-сенсором IMX421 ($K = 0,915$).

Рентгенівські екрани NaI(Tl) мають високе значення коефіцієнта спектральної відповідності тільки до сенсора KAI2020 ($K = 0,959$), а до решти сенсорів спектральна відповідність таких екранів гірша на 10...35 % порівняно з екранами $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$. Значення коефіцієнта спектральної відповідності екранів NaI(Tl) до КМОН-сенсорів

IMX174 MT9M034 та IMX421 знаходиться в межах $K = 0,826...0,848$.

Серед досліджених сенсорів необхідно виділити КМОН-сенсор із кадровим затвором фірми Sony, який за параметрами переважає решту сенсорів. Сенсор виконаний за фірмовою технологією Pregius, має великий розмір пікселя 5,86 мкм, формат 1/1,2", кількість пікселів 1936×1216, швидкість зчитування зображення 164,5 кадр/с і високе значення коефіцієнта спектральної відповідності у комбінації з рентгенівськими екранами Gd2O2S(Tb), CsI(Tl) та NaI(Tl).

Результати досліджень спектральної відповідності рентгенівських екранів до ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів були використані при розробці низки рентгенотелевізійних систем типу «рентгенів-

ський екран – оптика – ПЗЗ-(КМОН-) сенсор» різного призначення.

На рис. 3, а наведено зовнішній вигляд розробленої цифрової рентгенотелевізійної системи на основі телевізійної камери Atik 314L+, яку виконано на ПЗЗ-сенсорі Sony ICX-285AL. РТВС закріплено на трубопроводі за допомогою спеціального кріплення, яке дозволяє кріпити її на трубопроводі різного діаметра. ПЗЗ-сенсор Sony ICX285AL має формат 2/3" (діагональ 11 мм), кількість пікселів 1392×1040, розміри пікселя 6,45×6,45 мкм. Телевізійна камера має 16-розрядний вбудований АЦП і систему охолодження ПЗЗ-сенсора на основі елементів Пельть'є. У якості рентгенівського екрана в системі застосовується гадолінієвий екран Gd2O2S(Tb) РЕНЕКС ЕРЛ-Г з товщиною

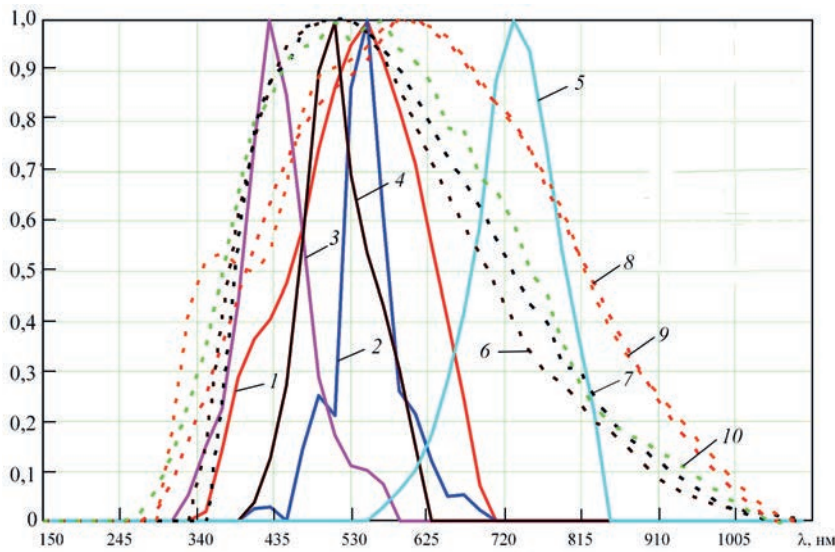


Рис. 1. Спектральні характеристики чутливості КМОН-сенсорів і спектральні характеристики випромінювання рентгенівських екранів: 1 – CsI(Tl), $I_1(\lambda)$; 2 – Gd2O2S(Tb), $I_2(\lambda)$; 3 – NaI(Tl), $I_3(\lambda)$; 4 – CaWO4, $I_4(\lambda)$; 5 – ZnSe(Te), $I_5(\lambda)$; 6 – IMX174, $S_1(\lambda)$; 7 – MT9M034, $S_2(\lambda)$; 8 – IMX422, $S_4(\lambda)$; 9 – IMX432, $S_5(\lambda)$; 10 – IMX421, $S_7(\lambda)$

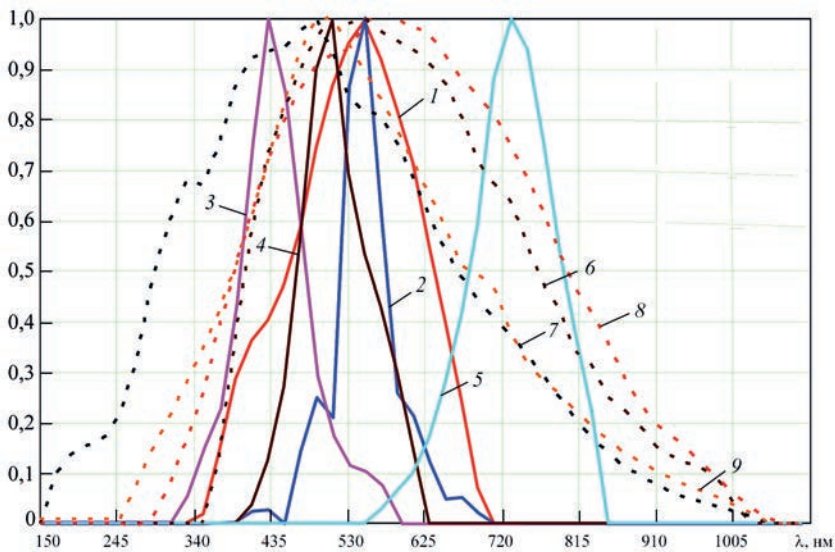


Рис. 2. Спектральні характеристики чутливості ПЗЗ-сенсорів і спектральні характеристики випромінювання рентгенівських екранів: 1 – CsI(Tl), $I_1(\lambda)$; 2 – Gd2O2S(Tb), $I_2(\lambda)$; 3 – NaI(Tl), $I_3(\lambda)$; 4 – CaWO4, $I_4(\lambda)$; 5 – ZnSe(Te), $I_5(\lambda)$; 6 – ICX285AL, $S_3(\lambda)$; 7 – KAl2O20, $S_6(\lambda)$; 8 – ICX674ALG, $S_8(\lambda)$; 9 – ICX274AL, $S_9(\lambda)$

Коефіцієнти спектральної відповідності K рентгенівських екранів до ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів

Сенсор (фірма, формат, кількість пікселів)	Рентгенівський екран				
	CsI(Tl)	Gd2O2S(Tb)	NaI(Tl)	CaWO4	ZnSe(Te)
IMX174 (Sony, 1/1.2", 2.3 MP)	0,878	0,943	0,848	0,967	0,417
MT9M034 (ON Semiconductor, 1/3", 1.2 MP)	0,893	0,957	0,826	0,972	0,498
ICX285AL (Sony, 2/3", 1.45 MP)	0,892	0,979	0,674	0,955	0,608
IMX422 (Sony, 1/1.8", 2.0 MP)	0,861	0,921	0,61	0,866	0,768
IMX432 (Sony, 1.1", 1.8 MP)	0,875	0,942	0.606	0,89	0,772
KAI2020 (ON Semiconductor, 1", 1.9 MP)	0,819	0,821	0,959	0,897	0,374
IMX421 (Sony, 2/3", 2.86 MP)	0,915	0,968	0,833	0,964	0,568
ICX674ALG (Sony, 2/3", 2.8 MP)	0,891	0,959	0,678	0,915	0,716
ICX274AL (Sony, 1/1.8", 2.0 MP)	0,805	0,874	0,744	0,913	0,390

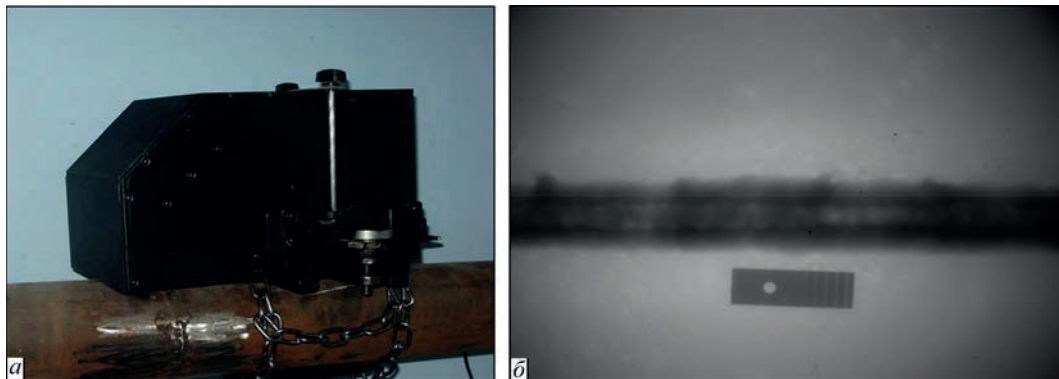


Рис. 3. Зовнішній вигляд РТВС на основі ПЗЗ-сенсора ICX-285AL і рентгенівського екрану Gd2O2S(Tb) (а) і зображення зварного з'єднання сталевих пластин завтовшки 10 мм та еталона чутливості (б)

люмінофорного шару 200 мкм та роздільною здатністю 5,5 пар лін/мм. Система оснащена світлосильним об'єктивом Computar M1214-MP2 і має розміри робочого поля 160×120 мм. Комбінація гадолінієвого екрану Gd2O2S(Tb) та ПЗЗ-сенсора ICX285AL у РТВС забезпечує високе значення коефіцієнта спектральної відповідності $K = 0,979$ (див. таблицю).

На рис. 3, б наведено зображення зварного з'єднання сталевих пластин завтовшки 10 мм, яке отримано за допомогою розробленої РТВС при просвічуванні рентгенівським апаратом Екстравольт-350, фокусній відстані 30 см та експозиції 20 с у ПЗЗ-сенсорі. Розроблена РТВС забезпечує відносну чутливість контролю 0,8 % та роздільну здатність 5 пар лін/мм, що дозволяє замінити у багатьох випадках плівкову радіографію.

Для контролю зварних з'єднань трубопроводів малого діаметра розроблено портативну РТВС із розміром робочого поля 110×80 мм, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 4. У телевізійній ка-

мері системи застосовано високочутливий 1/3" КМОН-сенсор MT9M034 фірми ON Semiconductor з кількістю пікселів 1280×960 [14]. У якості рентгенівського екрану використовується гадолінієвий екран Gd2O2S(Tb) РЕНЕКС ЕРЛ-Г з товщиною люмінофорного шару 200 мкм. Комбінація



Рис. 4. Зовнішній вигляд РТВС на основі КМОН-сенсора MT9M034 і рентгенівського екрану Gd2O2S(Tb) для контролю зварних з'єднань трубопроводів малого діаметра

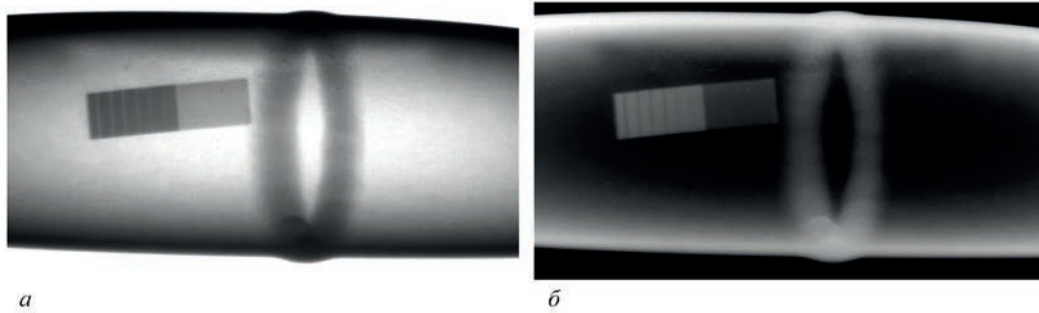


Рис. 5. Зображення зварного з'єднання алюмінієвого трубопроводу $\text{Ø}50 \times 3$ мм та еталона чутливості: *а* – зображення позитивної полярності, *б* – зображення негативної полярності

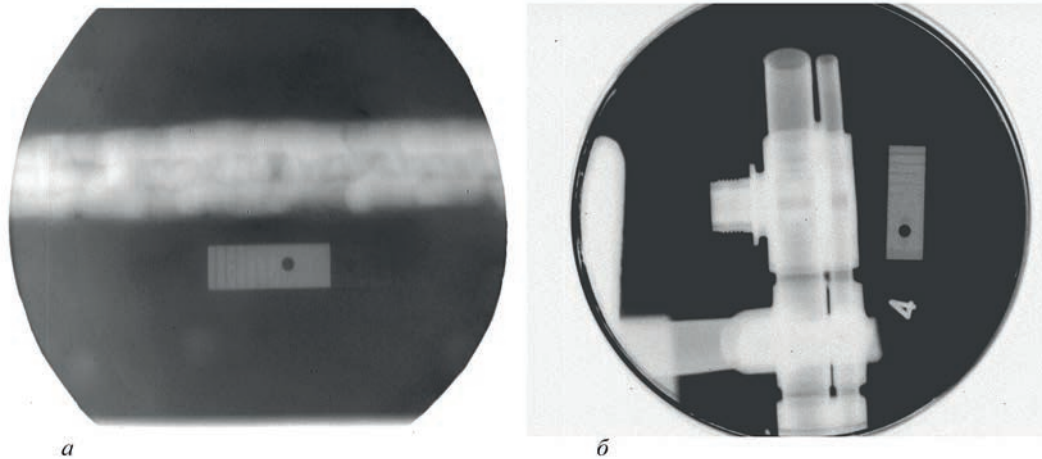


Рис. 6. Негативні зображення зварного з'єднання сталевих пластин завтовшки 10 мм з еталонем чутливості (*а*) та зображення трубопроводу з еталонем чутливості (*б*)

гадолінієвого екрана $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}(\text{Tb})$ і КМОН-сенсора МТ9М034 у РТВС забезпечує високе значення коефіцієнта спектральної відповідності $K = 0,957$ (див. таблицю).

На рис. 5 наведені приклади зображень зварного з'єднання, отриманих при контролі за допомогою розробленої РТВС алюмінієвого трубопроводу $\text{Ø}50 \times 3$ мм. На рис. 5, *а* представлено зображення позитивної полярності, а на рис. 5, *б* – негативної полярності. Контроль виконувався рентгенівським апаратом РАП-150/300, фокусна відстань становила 60 см, час експозиції 50 с. Анодні напруга та струм становили 50 кВ і 10 мА. Розроблена РТВС забезпечує чутливість контролю, що відповідає 1 класу ДСТУ 7512-82 (виявляються канавки завглибшки 0,1 мм).

Розроблено низку РТВС із використанням ПЗ3-сенсорів і монокристалічних рентгенівських екранів $\text{CsI}(\text{Tl})$ діаметром 120, 150 та 200 мм. На рис. 6 наведені негативні зображення зварного з'єднання сталевих пластин завтовшки 10 мм (*а*) та зображення трубопроводу (*б*), які отримані за допомогою РТВС на основі ПЗ3-сенсора ICX429ALL форматом 1/2" із мікролінзами фірми Sony (технологія EXview HAD CCD) у комбінації з монокристалічним екраном $\text{CsI}(\text{Tl})$ діаметром

120 мм. Контроль виконувався рентгенівським апаратом РАП-150/300, час експозиції 30 с. Для оцінки коефіцієнта спектральної відповідності РТВС можна використати спектральну характеристику чутливості ПЗ3-сенсора ICX674ALG (рис. 2), бо вона близька до спектральної характеристики ПЗ3-сенсора ICX429ALL. Комбінація монокристалічного екрана $\text{CsI}(\text{Tl})$ і ПЗ3-сенсора ICX674ALG у РТВС забезпечує високе значення коефіцієнта спектральної відповідності $K = 0,891$ (див. таблицю). Відносна чутливість контролю зварного з'єднання за канавковим еталонем становить 0,83 % (рис. 6, *а*).

Висновки

Для досягнення високої чутливості контролю рентгенотелевізійних систем типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗ3-(КМОН-) сенсор» необхідно забезпечити високий ступінь спектральної відповідності характеристики випромінювання рентгенівського екрана до спектральної характеристики чутливості сенсора.

Мірою взаємної спектральної відповідності рентгенівського екрана та сенсора є коефіцієнт спектральної відповідності K , який досягає найбільшого значення, що дорівнює одиниці, у тому випадку,

коли відносна чутливість сенсора є максимальною, тобто дорівнює одиниці в усій спектральній області випромінювання екрана. У всіх інших випадках, у тому числі й при збігу максимумів смуги випромінювання екрана та смуги чутливості сенсора, $K < 1$.

За результатами досліджень спектральної відповідності рентгенівських екранів до ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів найпридатнішими до використання у рентгенотелевізійних системах типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗЗ-(КМОН-) сенсор» є рентгенівські екрани на основі оксисульфиду гадолінію, активованого тербієм. Найкращу спектральну відповідність мають комбінації екрана Gd₂O₂S(Tb) і ПЗЗ-сенсора ICX285AL, КМОН-сенсора IMX421, ПЗЗ-сенсора ICX674ALG, КМОН-сенсора MT9M034 та КМОН-сенсора IMX174.

Монокристалічні рентгенівські екрани CsI(Tl) мають гіршу на 6...8 % спектральну відповідність до більшості сенсорів у порівнянні з гадолінієвими екранами Gd₂O₂S(Tb). Найкраща спектральна відповідність екранів CsI(Tl) досягається в комбінації з КМОН-сенсором IMX421.

Рентгенівські екрани NaI(Tl) мають високу спектральну відповідність тільки до сенсора KAI2020, а до решти сенсорів спектральна відповідність таких екранів гірша на 10...35 % порівняно з екранами Gd₂O₂S(Tb).

Напівпровідникові екрани ZnSe(Te) мають найгіршу спектральну відповідність до більшості ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів, окрім IMX422, IMX432 та ICX674ALG.

Список літератури/References

1. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.О., Шило Д.С. (2015) Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 23–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01>
2. Troitskiy, V.A., Mikhailov, S.R., Pastovenskii, R.O., Shilo, D.S. (2015) Modern systems of radiation non-destructive testing. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **1**, 23–35 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01>
3. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.О., Шалаев В.А. (2023) Scanning X-Ray detector for nondestructive testing. *Materials Evaluation*, **81(5)**, 22–29. DOI: <https://doi.org/10.32548/2023.me-04290>
4. Гринев Б.В., Рыжиков В.Д., Семиноженко В.П. (2007) *Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе*. Киев, Наук. думка. ISBN 978-966-00-0668-3
5. Grynyov, B.V., Ryzhikov, V.D., Semynozhenko V.P. (2007) *Scintillation detectors and radiation control systems on their basis*. Kyiv, Naukova Dumka. ISBN 978-966-00-0668-3
6. Sony Corporation. ICX285AL Datasheet (PDF) – Sony Corporation. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/47475/SONY/ICX285AL/691/8/ICX285AL.html>
7. Sony Corporation. ICX274AL. https://www.1stvision.com/cameras/sensor_specs/ICX274.pdf
8. Sony Corporation. ICX674ALG/ICX674AQG. https://www.1stvision.com/cameras/sensor_specs/icx674alg_aqg.pdf
9. RkBlog. RkBlog: Sensor: KAI2020. <https://rk.edu.pl/astro/kamery-ccd/matryca/kai2020/>
10. ZWO Company. ASI174MM Mini (mono) | ZWO ASI. <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi1600mm-cool>
11. Graftek Imaging Inc.. Pixelink PL-D753MU-T, 2/3 in. format, C-Mount, 1936×1464, 143 fps, Monochrome, CMOS Global Shutter, USB3 Vision with Trigger – Graftek Imaging Inc. <https://graftek.biz/products/pixelink-pl-d753mu-t>
12. Emergent Vision Technologies. HB-2000-S: 25GigE camera with Sony Pregius IMX422 – Emergent. <https://emergentvisiontec.com/products/bolt-hb-25gige-cameras-rdma-area-scan/hb-2000-s/>
13. Player One Astronomy. Apollo-M MAX USB3.0 Mono Camera (IMX432) – Player One Astronomy. <https://player-one-astronomy.com/product/apollo-m-max-imx432/>
14. ON Semiconductor. MT9M034 1/3-Inch CMOS Digital Image Sensor. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mt9m034-d.pdf>
15. Cha, B.K., Kim, J.Y., Kim, T.J. et al. (2010) Fabrication and imaging characterization of high sensitive CsI(Tl) and Gd₂O₂S(Tb) scintillator screens for X-ray imaging detectors. *Radiation Measurements*, **45(3–6)**, 742–745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.12.025>
16. Jung, I.D., Cho, M.K., Lee, S.M. et al. (2009) Flexible Gd₂O₂S:Tb scintillators pixelated with polyethylene microstructures for digital x-ray image sensors. *J. of Micromechanics and Microengineering*, **19(1)**, 15014–15025. DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/1/015014>
17. Chang-Woo Seo, Bo Kyung Cha, Sungchae Jeon, Ryun Kyung Kim, Young Huh (2013) Characterization of indirect X-ray imaging detector based on nanocrystalline gadolinium oxide scintillators for high-resolution imaging application. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **699**, 129–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.05.072>

SPECTRAL CORRESPONDENCE OF X-RAY SCREEN TO THE SENSOR IN X-RAY TELEVISION SYSTEMS

S.R. Mikhailov^{1,2}

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: smihajlov@ukr.net

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

Email: ndt@paton.kiev.ua

Film radiography is still a common method of non-destructive quality control of materials and products in all industries due to the well-established regulatory framework and existing infrastructure (photo laboratories, equipment, qualified personnel, etc.). However, significant disadvantages of film radiography (low productivity and high cost of control, inability to control objects in real time) stimulate the development of new methods of recording X-ray images, in particular digital radiography. Digital radiography is implemented using digital X-ray television systems. Currently, various digital X-ray television systems are used: systems based on X-ray electron-optical converters, scanning systems based on linear detectors, systems based on semiconductor flat-panel detectors, systems of the “X-ray screen – optics – CCD-(CMOS-) sensor” type, etc. The latter systems have a number

of advantages over others: high control sensitivity and spatial resolution; the ability to change the X-ray scintillation screen, which allows you to change the size of the working field and other system parameters; short image acquisition time; simplicity of design; small dimensions and weight; low cost. To ensure high sensitivity of control, highly sensitive CCD- (CMOS-) sensors, high-aperture lenses and X-ray screens with high conversion efficiency are used. However, an important condition for achieving high control sensitivity is the correspondence of the spectral characteristic of X-ray radiation to the spectral characteristic of the sensitivity of the CCD- (CMOS-) sensor. The aim of the work is to study the spectral correspondence of the most common and effective X-ray screens to a number of modern CCD-(CMOS-) sensors. Calculations of spectral correspondence coefficients for scintillation X-ray screens to CCD- and CMOS-sensors have been performed. To calculate the spectral matching coefficients, the ratio of the sensitivity of CCD and CMOS sensors to the spectrum emitted by the screen to the maximum sensitivity of the sensor was used. A table of spectral matching coefficients of X-ray screens to CCD-(CMOS-) sensors was constructed. It was determined that the best spectral matching is achieved by combinations of the Gd2O2S(Tb) screen and the CCD-sensor ICX285AL, the CMOS-sensor IMX421, the CCD-sensor ICX674ALG, the CMOS-sensor MT9M034 and the CMOS-sensor IMX174. 16 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: digital radiography, X-ray television system, X-ray screen, CCD sensor, CMOS sensor, mutual spectral matching

ORCID

Михайлов С.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-4314-785X>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

С.Р. Михайлов

Національний технічний унікальний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37.

E-mail: smihajlov@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.Р. Михайлов (2026) Спектральна відповідність рентгенівського екрана до сенсора в рентгенотелевізійних системах. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **02**, 51–58. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.06>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 30.03.2026

Отримано у переглянутому вигляді 27.04.2026

Підписано до друку 01.06.2026

Оприлюднено 30.06.2026




**ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРИВАННЯ
ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ
ВІДДІЛ №4 НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ
ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**



пропонує такі послуги:

- Діагностика і моніторинг конструкцій та споруд за допомогою рентген-телевізійного, радіографічного, ультразвукового, магнітного, капілярного, теплового вихрострумowego, та інших методів НК.
- Розробка та реалізація технологічних рішень, виготовлення супровідної документації.
- Навчання, атестація і сертифікація персоналу згідно з EN ISO 9712, SNT-TC-1A, НПАОП 0.00-1-63-13.
- Технічний огляд та паспортизація промислових споруд.
- Аналіз можливості продовження ресурсу безпечної експлуатації обладнання та конструкцій.
- Ремонт та оновлення дефектоскопічного обладнання.
- Розроблення нормативної документації.
- Гармонізація європейських та міжнародних стандартів.



м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23, корп. 6
т. (044) 205-22-15, 200-80-57; e-mail: ndt@paton.kiev.ua

