

## СКАНУЮЧІ РЕНТГЕНІВСЬКІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МІНІАТЮРНИХ ТВЕРДОТІЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ\*

**В.О. Троїцький, М.М. Карманов, С.Р. Михайлов, В.О. Шалаєв, Р.О. Пастовенський**

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В даний час в світовій практиці замість плівкової радіографії отримали розвиток цифрові методи неруйнівного контролю з використанням повноформатних напівпровідникових рентгенівських плоскопанельних детекторів. Ці перетворювачі не можуть знайти в Україні широкого практичного застосування через велику вартість. Нами запропоновано рентгеноелектронні системи на основі відносно недорогих мініатюрних твердотільних перетворювачів. Збільшення зони контролю досягається електромеханічним скануванням з наступним програмним зшиванням отриманих окремих малоформатних цифрових рентгенівських зображень. Бібліогр. 8, рис. 13.

*Ключові слова:* рентгеноелектронний контроль, цифрові системи, сканер, рентгенівський детектор, мікроконтролер, цифрове зшивання зображень

В медицині, промисловості та на митниці вже сьогодні широко застосовують радіоскопію без проміжних носіїв інформації (радіографічні плівки, запам'ятовуючі пластини) за рахунок складних технологій отримання цифрових зображень [1]. Сучасні плоскопанельні рентгенівські детектори дозволяють отримати повноформатні (сумірні з розмірами рентгенівської плівки 30×40 см) рентгенівські зображення безпосередньо при просвічуванні контрольованого виробу. Основним недоліком таких повноформатних панелей є висока вартість (десятки тисяч доларів США), відносно низька роздільна здатність (близько 100 мкм), що в декілька разів поступається кращим рентгенівським плівкам [2].

В даний час серійно випускаються відносно недорогі малоформатні твердотільні детектори, які використовуються в неруйнівному контролі [3–5]: DR 7 NDT фірми DÜRR NDT, S10811-11 японської фірми Hamamatsu Photonics (рис. 1), The Remote RadEye HR x-ray detector канадської фірми Teledyne Dalsa. Роздільна здатність таких детекторів – 20 мкм. Основний їх недолік – малий розмір робочого поля (30...40 мм). В багатьох випадках цього недостатньо, щоб замінити ними традиційну рентгенівську плівку.

Одним з нових запропонованих нами напрямків цифрової радіографії є створення радіоскопічних перетворювачів (сканерів) з використанням сенсорів на основі недорогих високочутливих мініатюрних твердотільних детекторів, які застосовуються в медицині (стоматології) [1]. Для контролю протяжних зварних швів, які перевищують розміри робочого поля детектора (см. рис. 1), пропонується використовувати принцип сканування зони, що контролюється. Для цього виконується

покрокове переміщення рентгенівського детектора, при цьому крок переміщення відповідає його ширині робочого поля. Отримані при скануванні суміжні фрагменти цифрових рентгенівських зображень зварного шва запам'ятовуються в комп'ютері та програмно зшиваються в єдине повноформатне цифрове зображення.

На цьому принципі було створено макет рентгеноелектронної системи (РТВС) з однією лінійною направляючою (рис. 2). В якості електропривода використовується кроковий двигун.

Управління кроковим двигуном відбувається за допомогою мікроконтролера Arduino Uno, який підключено до комп'ютера через кабель USB. Для систем управління електромеханічними приводами передбачено плату розширення CNC Shield v3.0, яка працює з драйверами двигунів A4988 або



Рис. 1. Зовнішній вигляд детектора S10811-11 японської фірми Hamamatsu Photonics з розміром робочого поля 34×24 мм

\* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.



Рис. 2. Макет РТВС: сканер (а), каретка в зборі (б): 1 – корпус каретки, 2 – гвинт приводу, 3 – гайка приводу, 4 – лінійна направляюча, 5 – лінійний підшипник

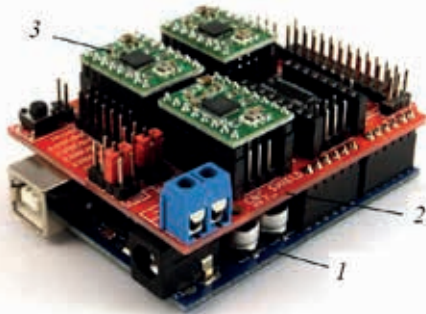


Рис. 3. Контролер управління кроковим двигуном 1 – Arduino Uno; 2 – CNC Shield v3.0, 3 – A4988

DRV8825 [6]. Зручна їх конструкція дозволяє зібрати контролер управління приводом без пайки та додаткових дротів (рис. 3).

Управління детектором S10811-11 здійснюється від комп'ютера через порт USB 2.0 за допомогою модуля обробки сигналів C9266-04, який перетворює аналоговий сигнал детектора в цифровий (АЦП – 12 біт), формує сигнали управління детектором (вмикання/вимикання), визначає формат цифрового зображення (8 або 12 біт), експозицію та виконує ряд налаштувань детектора.

В запропонованій одновісній кінематиці РТВС внаслідок неспіввідповідності гвинтової передачі та лінійної направляючої при переміщенні каретки сенсора виникали її вібрації. Це призводило до

зниження точності позиціонування каретки та погіршення якості зображень.

Для виключення вібрацій при переміщенні сенсора та усунення люфту електропривода було спроектовано та виготовлено сканер на основі двох направляючих з використанням подвійної безлюфтової гайки з пружиною (рис. 4). В цьому випадку отримуємо точність сканування, порівняну з роздільною здатністю сенсора.

В наступній конструкції РТВС для зменшення габаритів сканера та спрощення його конструкції замість гвинтового приводу та лінійних направляючих застосовано рейкову направляючу (рис. 5, 6) з ременною (зубчатою) передачею [6].

На рис. 7. наведені окремі фрагменти рентгенівського зображення зварного з'єднання (а), повноформатне рентгенівське зображення (б), отримане при цифровому зшиванні окремих фрагментів. Висока роздільна здатність використовуваного плоскочастинного детектора дозволила виконувати значне цифрове збільшення (зум) зображення без погіршення його якості (в).

Для покращення якості цифрового зшивання зображення передбачене програмне доведення зображень до одного контрасту. Для усунення візуалізації границь зшивання зображень передбачені опції вирівнювання фону та розмивання зображень в зоні зшивання.

Для бездротової передачі даних пропонується об'єднати комп'ютери в мережу через Wi-Fi (рис. 8).



Рис. 4. Нова РТВС з двома направляючими привода переміщення рентгенотелевізійного детектора (а), подвійна гайка з пружиною (б) безлюфтового приводу



Рис. 5. Каретка з лінійною рейковою направляючою



Рис. 6. Рентгенотелевізійний сканер з лінійною рейковою направляючою

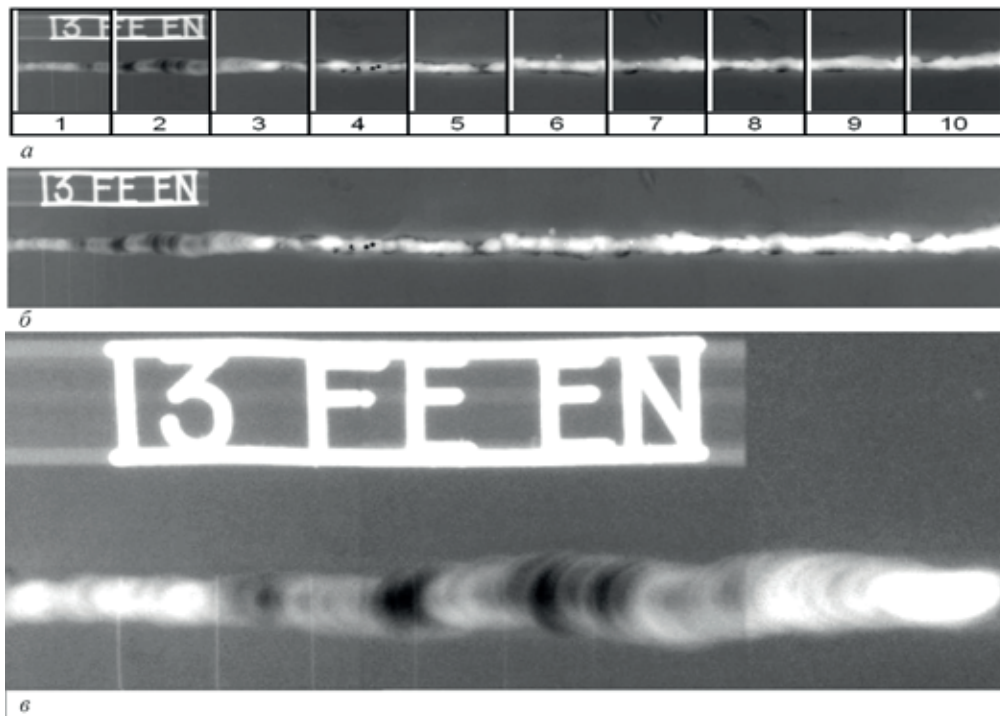


Рис. 7. Рентгеновські зображення, отримані при скануванні зварного з'єднання контрольованого об'єкта: *а* – вихідні фрагменти рентгеновських зображень (24×34 мм); *б* – результати зшивання фрагментів зображень (повноформатне рентгеновське зображення, отримане з окремих фрагментів); *в* – збільшена ділянка цифрового рентгенотелевізійного зображення зварного з'єднання

Один комп'ютер використовується для безпосереднього управління рентгенотелевізійним сканером, через другий комп'ютер оператор локальної бездротової мережі здійснює доступ до першого комп'ютера та дистанційно керує ним.

Було розроблено програмне забезпечення, яке розширює функціональні можливості переносних бездротових РТВС та дозволяє оператору отримувати цифрові рентгеновські зображення, коли він знаходиться на безпечній відстані від контрольованого об'єкта. Це суттєво полегшує роботу дефектоскопіста в процесі пошуку та аналізу дефектів. Програмне забезпечення дозволяє також контролювати рівень бездротового сигналу в мережі та рівень заряду акумуляторної батареї у випадку автономного електроживлення (наприклад, при проведенні контролю в польових умовах). Передбачено також вимірювання рівня рентгеновського випромінювання з автоматичним вимиканням рентгеновської установки у випадку необхідності (рис. 9).

Для організації такої конфігурації системи з дистанційним бездротовим управлінням достатньо замінити стаціонарний комп'ютер на мікрокомп'ютер. Для цих цілей було обрано Raspberry

Pi 3 Model B+ – один з найбільш відомих недорогих та популярних мікрокомп'ютерів [7]. Було проведено дослідження можливості мікрокомп'ютерного управління кроковими двигунами та двигунами постійного струму з використанням драйвера L298, що підключається до Raspberry Pi через інтерфейс GPIO. Було виявлено деякі проблеми при роботі с Windows on ARM, яка не підтримує стандартні драйвери x86. В нашому випадку неможливо до нього підключити рентгеновський детектор. В якості альтернативного варіанта розглянута можливість переходу на мікрокомп'ютер Beelink BT3-X Mini Apollo з вбудованим Windows 10 [8].

Для рентгеновського контролю якості відносно великих конструкцій виконувалось комбіноване просвічування: з використанням великоформатних рентгенотелевізійних камер розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ: РТВ-4 (робоче поле 110×80 мм), РТВ-3 (160×120 мм), РТВ (360×270 мм) (рис. 10) [4]. Зазначені підозрілі ділянки додатково просвічувались за допомогою мініатюрного детектора.

Ця технологія рентгеновського контролю якості зварних з'єднань



Рис. 8. Локальна комп'ютерна мережа рентгенотелевізійної системи



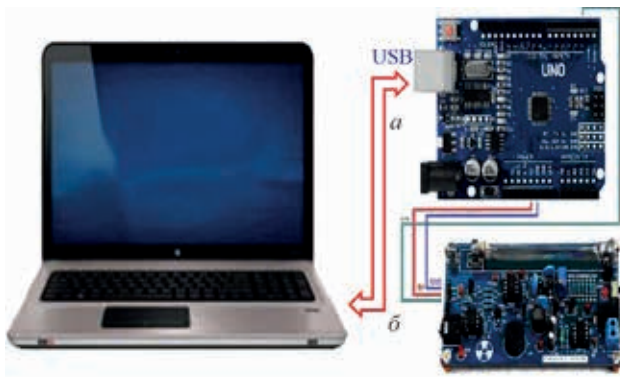


Рис. 9. Мікроконтролерний дозиметр: *a* – мікроконтролер Arduino Uno; *б* – лічильник Гейгера

поліетиленових труб діаметром 110×11 мм. Зварний шов мав ширину 11 мм та висоту 3...3,3 мм (рис. 11). Анодна напруга 30 кВ, струм 10 мА, фокусна відстань 840 мм, час накопичення 10 с.

Для робіт, що виконуються на авіаційному заводі з диверсифікації постачальників напівфабрикатів з алюмінієвих сплавів, які застосовуються при виробництві вузлів з легкосплавних матеріалів, було розроблено технології вхідного контролю труб малого діаметра (рис. 12) діаметром 18×1,3 мм; 36×1,4; 48×1,4.

Рентгенотелевізійна цифрова технологія використовувалась також для контролю кілець з матеріалу СГП-0,5 для торцевих ущільнювачів насосного обладнання атомних електростанцій (рис. 13).

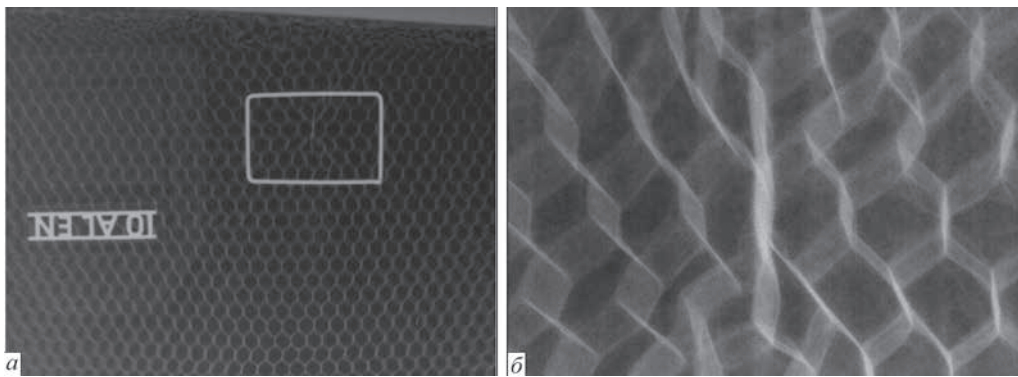


Рис. 10. Цифрове зображення фрагмента сотової конструкції закріпки літака (*a*) з локалізацією дефектної ділянки за допомогою детектора S10811-11 (*б*) (збільшене зображення)

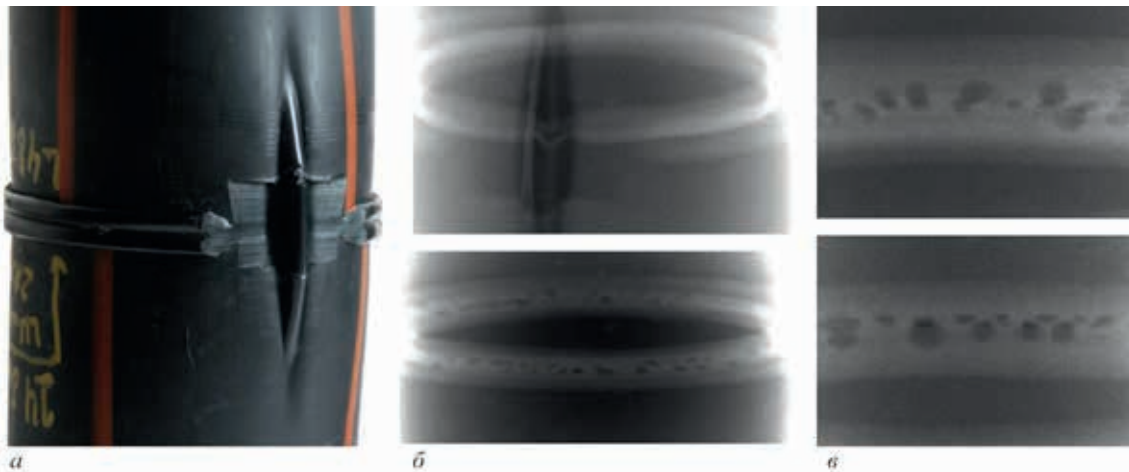


Рис. 11. Результати контролю зразків поліетиленової труби (*a*) з використанням повноформатної камери РТВ-4 (*б*) та мініатюрного детектора (*в*)



Рис. 12. Штучні дефекти на торці труби діаметром 48 мм: отвори діаметром 1 мм, штучна подряпина глибиною 0,1...0,2 мм (*a*), рентенограма даної ділянки труби (*б*), чутливість 0,1 мм (мінімальна канавка еталона відповідає значенню 0,1 мм)

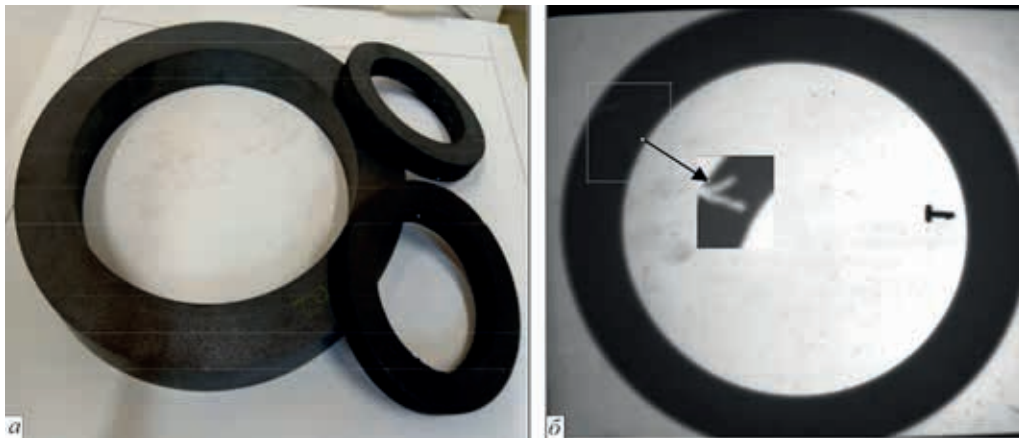


Рис. 13. Зовнішній вигляд кілець для торцевих ущільнювачів (а), цифрова рентгенограма кільця, на якій показано контрастна дефектна ділянка кільця

## Висновки

1. Вперше в світовій практиці рентгенівського контролю виконано дослідження можливості використання імпульсних випромінювачів (рентгенівський апарат МИРА-2Д) в цифрових рентгено-телевізійних системах, що містять рентгенівські детектори високої роздільної здатності.

2. Дослідно-промислові випробування підтвердили можливість створення скануючих рентгено-телевізійних систем з використанням малоформатних детекторів, що дозволило суттєво (в декілька разів) знизити вартість рентгеноскопичного контролю в порівнянні з технологіями на основі великоформатних плоскопанельних детекторів.

3. Розроблено та випробувано мікрокомп'ютерні засоби, які забезпечують бездротове дистанційне управління рентгенотелевізійними системами НК, високу точність сканування та цифрове зшивання окремих фрагментів зображень.

## Список літератури

1. (2018) Дефектоскопія XXI століття. Основні напрямки роботи ІЗС ім. Е.О. Патона НАН України по розвитку технологій неінвазивного контролю зварних з'єднань. Троицкий В.А. (ред.). Київ, ІЗС ім. Е.О. Патона НАН України.
2. Майоров А.А. (2007) Рентгеновское телевидение в промышленном НК. *Технология машиностроения*, **11**, 60–67.
3. DR 7 NDT Installation and Operating Instruction. DÜRR NDT.
4. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Михайлов С.Р. и др. (2016) X-ray mini технология контроля на основе твердотельных детекторов. *Збірник доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016»*. Київ, УТ НКТД, 275–284.

5. Remote RadEye Product Family. Teledyne Dalsa. Рекламний проспект.
6. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Шалаев В.А. (2019) Портативная рентгенотелевизионная система на основе миниатюрного твердотельного преобразователя. *Збірник доповідей 9-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019»*. Київ, УТ НКТД, 102–106.
7. Raspberry Pi 3 Model B+. URL: <https://www.waveshare.com/raspberry-pi-3-model-b-plus-package-d.htm>.
8. Новый мини-ПК Beelink BT3-X Mini на базе процессора Apollo Lake. URL: <https://hd-mediaplayers.ru/novyj-mini-pk-beelink-bt3-x-mini-na-baze-processora-apollo-lake/>.

## References

1. (2018) Flaw detection of the XXIst century. Main directions of work performed by PWI of the NAS of Ukraine on development of technologies of nondestructive testing of welded joints. Ed. by V.A. Troitskyi. Kiev, PWI [in Russian].
2. Majorov, A.A. (2007) X-Ray TV in industrial NDT. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **11**, 60-67 [in Russian].
3. DR 7 NDT Installation and Operating Instruction. DÜRR NDT.
4. Troitskyi, V.A., Karmanov, M.N., Mikhailov, S.R. et al. (2016) X-Ray mini technology of control based on solid-state detectors. In: *Proc. of 8th National Sci.-Techn. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics – UkrNDT-2016*. Kyiv, US NDT, 275 – 284 [in Russian].
5. Remote RadEye Product Family. Teledyne Dalsa. Advertising material.
6. Troitskyi, V.A., Karmanov, M.N., Shalaev, V.A. (2019) Portable X-Ray TV system based on miniature solid-state transducer. In: *Proc. of 9th National Sci.-Techn. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics – UkrNDT-2016*. Kyiv, 102-106 [in Russian].
7. Raspberry, Pi. 3 Model B+. URL: <https://www.waveshare.com/raspberry-pi-3-model-b-plus-package-d.htm>.
8. New mini-PC Beelink BT3-X Mini based on Apollo Lake Processor. URL: <https://hd-mediaplayers.ru/novyj-mini-pk-beelink-bt3-x-mini-na-baze-processora-apollo-lake/>.

## SCANNING X-RAY SYSTEM BASED ON MINIATURE SOLID-STATE TRANSDUCERS

V.O. Troitskyi, M.M. Karmanov, S.R. Mikhailov, V.O. Shalaev, R.O. Pastovenskyi

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Nowadays digital methods of nondestructive testing using full-scale semi-conductor X-Ray plane-parallel detectors became developed instead of film radiography in the world practice. These transducers cannot find wide practical application in Ukraine, because of their high cost. We proposed X-Ray TV systems based on relatively inexpensive miniature solid-state transducers. Enlargement of the inspected zone is achieved by electromechanical scanning with subsequent program stitching of the obtained separate small format digital X-ray images. 8 Ref., Fig. 13

*Keywords:* X-ray TV inspection, digital systems, scanner, X-Ray detector, microcontroller, digital stitching of images

Надійшла до редакції 15.07.2020