

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ЭКРАНА И ПЗС-МАТРИЦЫ

В. А. ТРОИЦКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ², Д. С. ШИЛО²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Выполнено сравнение рентгеновских изображений, формируемых цифровой рентгенотелевизионной системой прямого преобразования типа «сцинтилляционный экран–объектив–ПЗС-матрица» с изображениями, полученными при моделировании этой системы. Универсальность математической модели, на которой базируется расчет изображений, позволяет на этапе проектирования рентгенотелевизионной системы определить оптимальные режимы ее работы. Модель может быть адаптирована под конкретную техническую задачу, что дает более точную оценку параметров проектируемой системы. Так же модель можно адаптировать для расчета параметров рентгенотелевизионных систем с детекторами прямого преобразования. Библиогр. 9, рис. 8.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, цифровая радиография, сцинтилляционный экран, рентгенотелевизионная система, рентгеновская трубка, ПЗС-матрица, канавочный эталон чувствительности

В современной промышленности вопрос надежности производимой продукции является одним из важнейших. Особенно это касается тех отраслей, продукция которых так или иначе связана с безопасностью человека и окружающей среды. Для оценки качества продукции широко применяются методы неразрушающего контроля. Одним из самых востребованных на сегодняшний день является радиационный метод.

Радиационные системы с промежуточными носителями информации (плёночная радиография, электрорадиография, компьютерная радиография) широко применяются для контроля материалов и изделий в промышленности и обеспечивают высокие относительную чувствительность контроля (1 %) и разрешающую способность (порядка 10 пар лин./мм). Однако такие системы имеют существенные недостатки: невозможность проведения контроля объектов в реальном времени, низкая производительность и высокая стоимость контроля.

Недостатки традиционной радиографии и потребность в высокопроизводительных средствах диагностики стимулировали появление цифровой радиографии, которая позволяет повысить производительность контроля и снизить его стоимость. При использовании методов цифровой радиографии ионизирующее излучение, прошедшее через контролируемый объект, с помощью электронных средств преобразуется в массив электрических сигналов, которые оцифровываются, обрабатываются с помощью компьютерной техники и используются для формирования цифрового изображения контролируемого объекта.

Полученное цифровое изображение объекта содержит информацию о его внутренней структуре и может формироваться непосредственно во время просвечивания, т. е. в реальном времени [1, 2]. Для осуществления цифровой радиографии применяются различные цифровые рентгенотелевизионные системы (РТС).

К важным достоинствам РТС следует отнести возможность компьютерной обработки и анализа цифровых изображений, создания электронных архивов цифровых изображений, их документирования и передачи с использованием компьютерных сетей.

Основными задачами для совершенствования РТС являются: повышение чувствительности контроля и разрешающей способности, интенсивное внедрение цифровых технологий, широкое использование новых твердотельных детекторов рентгеновских изображений. Таким образом, разработка цифровых РТС требует решения серьезных научно-технических задач, к числу которых относятся: повышение отношения сигнал/шум и соответственно чувствительности контроля, увеличение квантовой эффективности преобразователей изображения, улучшение пространственной разрешающей способности, оптимизация режимов работы систем для обеспечения высокого качества радиационных изображений. Перечисленные задачи можно решить при помощи математического и физико-топологического моделирования таких систем.

В работах [3–5] предложена модель преобразования теневого рентгеновского изображения исследуемого объекта в цифровой сигнал на выходе РТС, построенных на основе сцинтилляци-

онных экранов и приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц). При помощи данной модели можно подбирать оптимальные режимы работы РТС для исследования тех или иных объектов с целью выявления в них дефектов и неоднородностей; оценить совместимость элементов, которые в них используются; исследовать возможность работы РТС в нестандартных режимах; уменьшить количество экспериментальных испытаний путем оптимизации режимов работы и т. д. Преимуществом данной модели также является ее универсальность, которая позволяет ее использовать также для моделирования систем с детекторами прямого преобразования.

Постановка задачи и цели работы. В процессе проектирования РТС важно иметь возможность оценивать значения ключевых параметров системы без необходимости создания опытного образца. Это позволяет разработчику экономить значительные средства и время на этапе выбора компонентов РТС.

РТС непрямого преобразования типа «сцинтилляционный экран – объектив – ПЗС-матрица» имеют ряд преимуществ перед другими РТС: возможность смены сцинтилляционного экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры систем; малое время получения изображения; простота конструкции; малые габариты и вес; низкая стоимость [2].

Такая РТС была разработана в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и представляет собой аппаратно-программный комплекс,

который состоит из рентгеновского аппарата «Экстравольт-350», рентгеновского преобразователя на основе сцинтилляционного экрана из оксисульфида гадолиния и телевизионной камеры Atik 314L + [6] с ПЗС-матрицей Sony ICX-285AL. В систему входит также компьютер со специальным программным обеспечением для управления режимами работы камеры, цифровой обработки, анализа и архивирования полученных изображений. Предложенная в работах [3–5] математическая модель была использована для моделирования данной РТС.

Структурная схема модели РТС типа «сцинтилляционный экран – объектив – ПЗС-матрица», с помощью которой проводились расчеты при преобразовании рентгеновских изображений, представлена на рис. 1.

Модель учитывает самопоглощение рентгеновских квантов в материале анода рентгеновской трубки, изменение рентгеновского спектра при прохождении исследуемого объекта, характеристики рентгеновского экрана, ПЗС-матрицы и объектива. Она позволяет рассчитывать необходимые характеристики рентгеновского излучения на выходе рентгеновской трубки и за исследуемым объектом, интенсивность свечения экрана, интенсивность света на поверхности ПЗС-матрицы после прохождения оптики, рассчитывать зарядовый пакет в пикселе и выходной сигнал на выходе ПЗС-матрицы, отношение сигнал/шум и квантовую эффективность детектирования рентгеновского преобразователя.

Результаты моделирования. Для того, чтобы оценить достоверность разработанной модели [3],

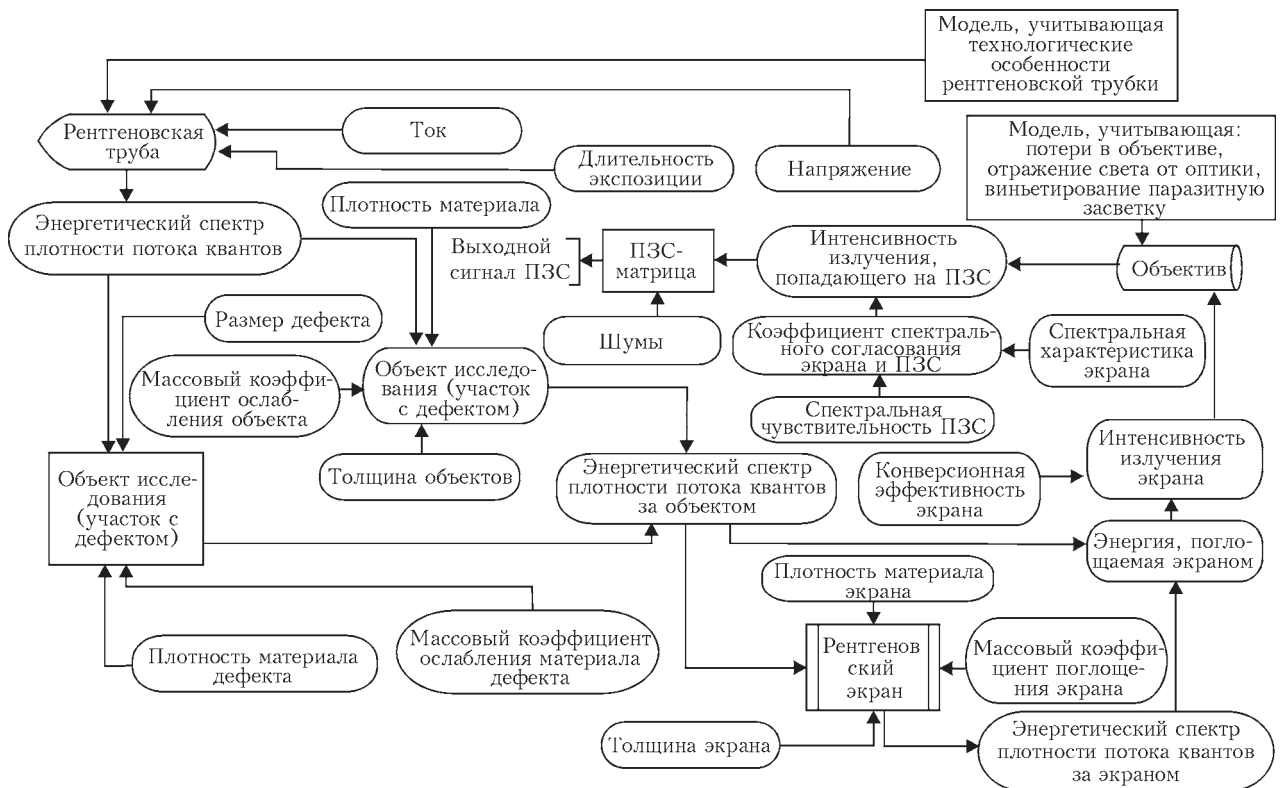


Рис. 1. Структурная схема модели РТС непрямого преобразования типа «сцинтилляционный экран–объектив–ПЗС-матрица»

было выполнено сравнение изображений исследуемого объекта, полученных на выходе разработанной РТС и изображений, которые были рассчитаны теоретически с помощью модели. В качестве объекта контроля использовалась стальная пластина со сварным швом толщиной $H_0 = 10$ мм. На пластине располагался канавочный эталон чувствительности № 1 (Fe), соответствующий ГОСТ 7512–82 (рис. 2) [7, 8].

На рис. 3–6 приведены экспериментальные и рассчитанные негативные изображения, полученные при длительностях накопления (t_i) 10 и 400 с. На практике накопление 400 с требуется далеко не всегда. Такая большая длительность была выбрана, чтобы сравнить результаты моделирования на разных участках динамического диапазона РТС.

На рассчитанных изображениях располагались два канавочных эталона чувствительности: один в центре, а другой – у левого края изображения (рис. 4, 6). Такое расположение эталонов позволяет анализировать влияние неравномерности сигнала по полю изображения на выявляемость канавок эталона.

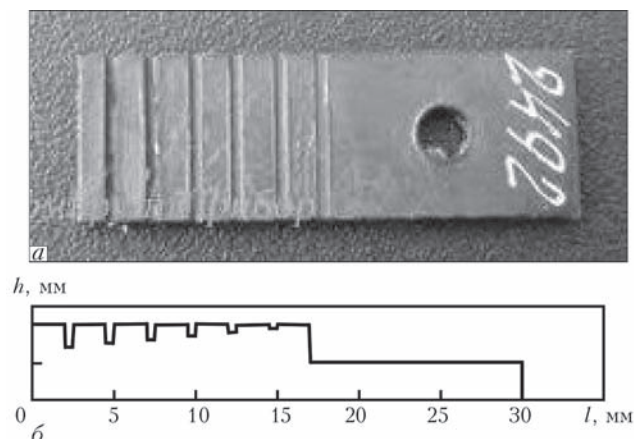


Рис. 2. Канавочный эталон чувствительности № 1 (Fe) в соответствии с ГОСТ 7512–82: а – фото эталона, маркированного отверстием; б – профиль эталона без отверстия, построенный в программном пакете Matlab

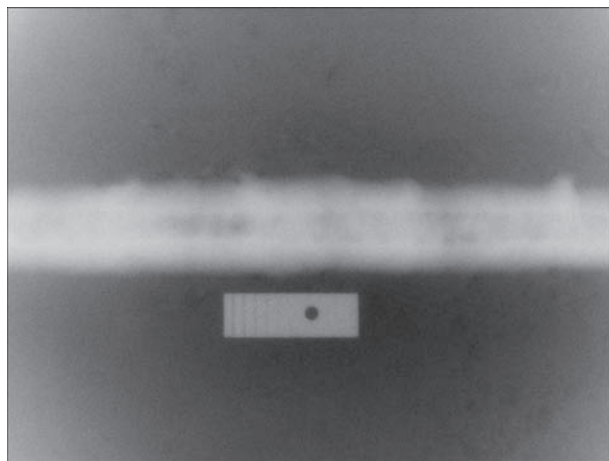


Рис. 3. Негативное изображение сварного шва и канавочного эталона чувствительности, полученное с помощью разработанной РТС (длительность накопления 10 с)

ПЗС-матрица реальной системы охлаждалась до температуры $T = -2,7$ °С при помощи элементов Пельтье. Для отображения полученных изображений на мониторе компьютера, выполнялось их преобразование. Это преобразование создает полутоновое изображение путем контрастирования исходного полутонового изображения. Значения яркости в диапазоне значений гистограммы исходного изображения (разрядность камеры 16 бит) преобразуются в значения яркости для передачи на мониторе персонального компьютера. Гамма-коррекция изображений не осуществлялась, т. е. свет-сигнальная характеристика камеры считалась линейной ($\gamma = 1$).

Рассчитанные изображения (рис. 4, 6) получены при тех же анодных напряжениях и токах рентгеновской трубки, при которых получены соответствующие реальные изображения на выходе разработанной РТС (рис. 3, 5).

Сварной шов не моделировался из-за сложности математического описания распределения его толщины, поэтому на изображениях, полученных при моделировании сварной шов отсутствует. Од-

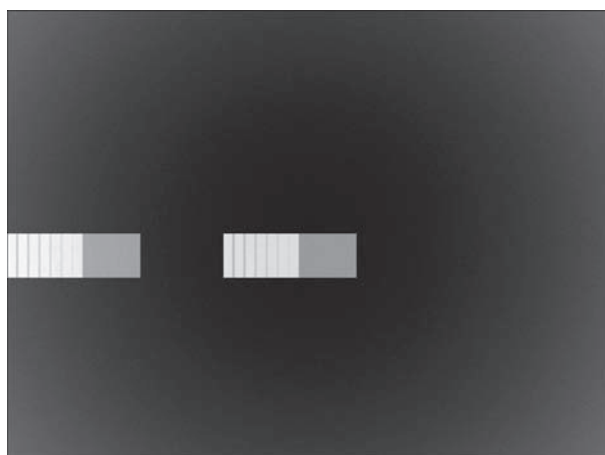


Рис. 4. Негативное изображение канавочных эталонов чувствительности, рассчитанное и сформированное с помощью предложенной модели (длительность накопления 10 с)

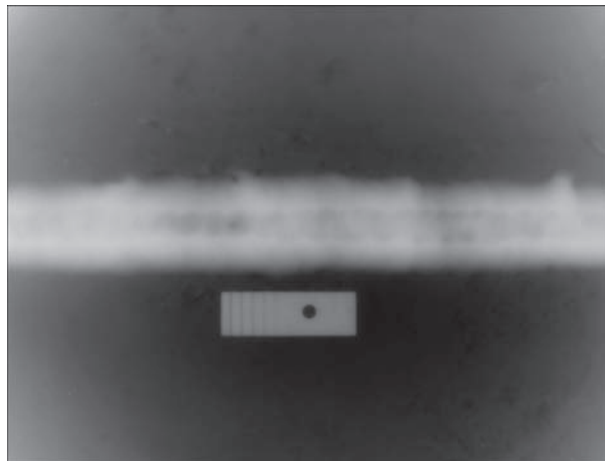


Рис. 5. Негативное изображение сварного шва и канавочного эталона чувствительности, полученное с помощью разработанной РТС (длительность накопления 400 с)

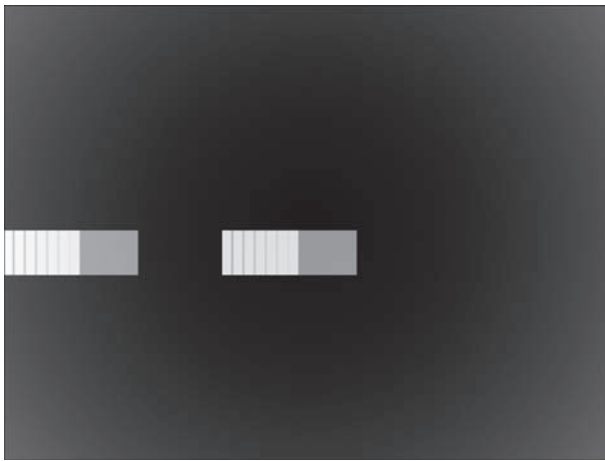


Рис. 6. Негативное изображение канавочных эталонов чувствительности, рассчитанное и сформированное с помощью предложенной модели (длительность накопления 400 с)

нако, если такое распределение будет известно, то его можно использовать для формирования изображения шва с помощью данной модели. Во время моделирования полученные изображения были искажены квантовым шумом и шумом, который обусловлен флуктуациями темнового тока. Остальные механизмы шумов не рассматривались т. к. их уровень был несущественным [9].

Обычно при малой длительности накопления изображение получается достаточно зашумленным, что в значительной степени обусловлено квантовым шумом. Увеличение длительности накопления позволяет увеличить отношение сигнал/шум за счет интегрирования шумов. В разработанной РТС использована высокочувствительная малошумящая камера, что позволило минимизировать собственные шумы системы. Даже при

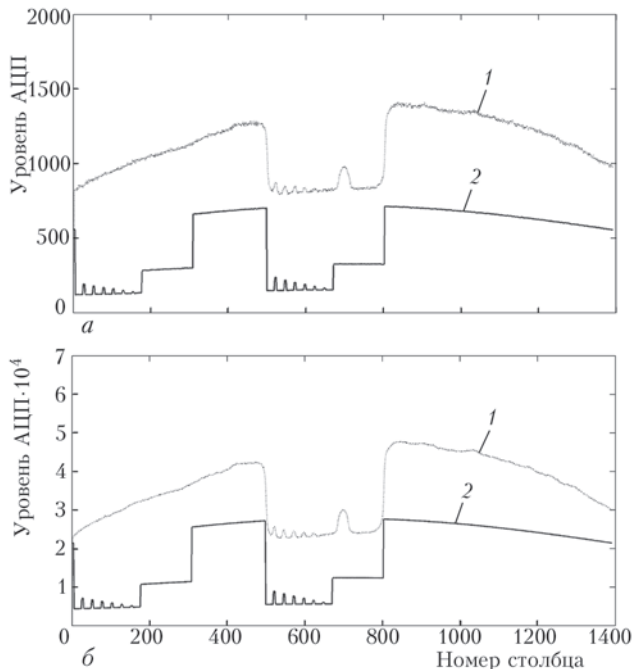


Рис. 7. Усредненные по полю эталона чувствительности строки реального (1) и рассчитанного (2) изображений (позитив): а – время накопления 10 с; б – время накопления 400 с

10 с накопления на реальном изображении видно четвертую канавку эталона чувствительности. Если же увеличивать t_i до 400 с, на изображении можно различить пятую канавку (рис. 5, 6).

На рис. 7 приведены усредненные по полю канавочного эталона чувствительности строки для реального и рассчитанного изображений. Дискретные данные для графического представления были интерполированы кусочными полиномами Эрмита в программном пакете Matlab. Поскольку при моделировании для уменьшения времени расчетов пространственная фильтрация в РТС не учитывалась, то профиль эталона чувствительности на строке рассчитанного изображения имеет четкие контуры, в отличие от закругленных контуров профиля реального эталона. При необходимости пространственную фильтрацию при расчетах можно учесть с помощью предложенной модели преобразования рентгеновского изображения в цифровое.

Вследствие неравномерности распределения рентгеновского излучения в реальных системах возникает искажение изображения, при котором уровень сигнала изменяется в зависимости от размещения объекта исследования под рентгеновской трубкой. Это объясняется неравномерностью распределения интенсивности рентгеновского излучения по полю. На рис. 7 это видно при сравнении строки реального изображения со строкой рассчитанного изображения (при моделировании такое распределение не учитывалось). Уровень фона правой половины строки выше уровня фона левой. Для удобства сравнения результатов на рис. 8 приведены данные в увеличенном масштабе.

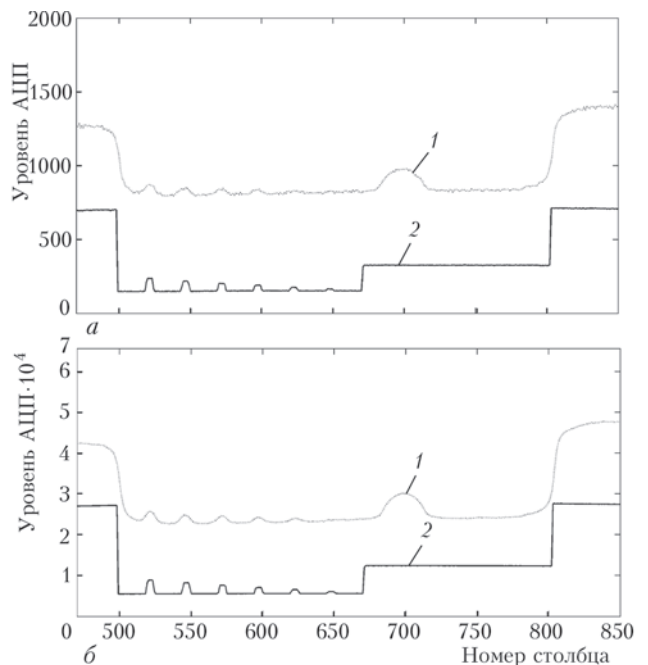


Рис. 8. Фрагменты усредненных по полю эталона чувствительности строк реального (1) и рассчитанного (2) изображений (позитив): а – время накопления 10 с; б – время накопления 400 с

Во время моделирования предполагалось, что уровень черного камеры РТС находится на нулевом уровне квантования АЦП. В реальной же системе уровень черного регулируется электронной схемой камеры и может меняться в зависимости от ее режима работы. Этим объясняется несоответствие уровней фона для строк реального и рассчитанного изображений.

Размеры эталона чувствительности и сигналы от его канавок на рассчитанных изображениях удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Это позволяет заключить, что при помощи предложенной модели [3] можно формировать изображения цифровой РТС, которые с достаточной точностью передают структуру объекта контроля.

Выводы

Предложенная математическая модель учитывает все основные этапы преобразования сигналов в РТС типа «сцинтилляционный экран – объектив – ПЗС-матрица» и позволяет моделировать изображения контролируемых объектов на выходе таких систем.

Полученные в результате моделирования изображения контролируемых объектов с эталонами чувствительности позволяют оценить чувствительность контроля разрабатываемой РТС без проведения эксперимента, что позволяет сэкономить время и средства при разработке таких систем.

Теоретические оценки чувствительности контроля РТС, полученные в результате моделирования, удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными.

Список литературы

1. Усачев Е. Ю., Валиков В. В., Точинский Е. Г. и др. (2014) Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений действующих трубопроводов. *Контроль. Диагностика*, **6**, 60–64.
2. 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.
3. Шило Д. С. (2015) Моделирование процессов формирования цифрового рентгеновского изображения. *Электроника и связь*, **6**, 34–41.
4. Шило Д. С., Михайлов С. Р., Писаренко Л. Д. (2016) Квантовая эффективность детектирования цифровых рентгенотелевизионных систем на основе сцинтилляционных экранов и ПЗС матриц. *Неразрушающий контроль и диагностика*, **4**, 25–38.
5. Михайлов С. Р. (2002) Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля. *Электроника и связь*, **16**, 59–70.
6. Craig Stark. (2009) Signal to Noise: Understanding it, Measuring it, and Improving it (Part 1). *Cloudy Nights*. <http://www.stark-labs.com/craig/resources/Articles-&-Reviews/SNR-Part-1.pdf>.
7. *Эталон чувствительности канавочный (Fe). № 11, 12, 13*. <http://pgpribor.com/product/etalon-chuvstvitelnosti-kanavochnyy-fe-11-12-13>.

8. (1984) ГОСТ 7512–82. *Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод*. Москва, Изд.-во стандартов.
9. Lowe B.G., Sareen R.A, *Semiconductor X-Ray Detectors*, 65 (CRC Press: 2013).

References

1. Usachev Ye. Yu., Valikov V. V., Tochinsky Ye. G. i dr. (2014) Kompleks tsifrovoy radiografii dlya revizii svarynykh soyedineniy deystvuyushchikh truboprovodov. *Kontrol. Diagnostika*, **6**, 60–64.
2. Troitskii V. A. et al. (2015) Modern systems of radiation non-destructive testing. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 23-35 [in Russian].
3. Shilo D. S. (2015) Modelirovaniye protsessov formirovaniya tsifrovogo rentgenovskogo izobrazheniya. *Elektronika i svyaz*, **6**, 34–41. [in Russian].
4. Shilo D. S., Mikhaylov S. R., Pisarenko L. D. (2016) Kvantovaya effektivnost detektirovaniya tsifrovyykh rentgenotelevizionnykh sistem na osnove stsintillyatsionnykh ekranov i PZS matrits. *Nerazrushayushchy kontrol i diagnostika*, **4**, 25–38. [in Russian].
5. Mikhaylov S. R. (2002) Modelirovaniye tenevogo rentgenovskogo izobrazheniya kontroliruyemogo obyekta v rentgenoskopicheskikh sistemakh nerazrushayushchego kontrolya. *Elektronika i svyaz*, **16**, 59–70. [in Russian].
6. Craig Stark. (2009) Signal to Noise: Understanding it, Measuring it, and Improving it: (Part 1). *Cloudy Nights*. <http://www.stark-labs.com/craig/resources/Articles-&-Reviews/SNR-Part-1.pdf>.
7. *Etalon chuvstvitelnosti kanavochny (Fe) № 11, 12, 13*. <http://pgpribor.com/product/etalon-chuvstvitelnosti-kanavochnyy-fe-11-12-13>. [in Russian].
8. (1984) GOST 7512–82. *Kontrol nerazrushayushchy. Soyedineniya svarynye. Radiografichesky metod*. Moskva, Izd.-vo standartov. [in Russian].
9. Lowe B.G., Sareen R.A, *Semiconductor X-Ray Detectors*, 65 (CRC Press: 2013). [in Russian].

В. О. ТРОИЦКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ², Д. С. ШИЛО²

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37. E-mail: fel@kpi.ua

МОДЕЛЮВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЦИФРОВОЇ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО ЕКРАНУ ТА ПЗС-МАТРИЦІ

Виконано порівняння рентгеновських зображень, що формуються цифровою рентгенотелевізійною системою непрямого перетворення типу «сцинтиляційний екран–об’єктив–ПЗС-матриця» з зображеннями, отриманими при моделюванні цієї системи. Універсальність математичної моделі, на якій базується розрахунок зображень, дозволяє на етапі проектування рентгенотелевізійної системи визначити оптимальні режими її роботи. Модель може бути адаптована під конкретну технічну задачу, що дає більш точну оцінку параметрів системи, що проектується. Так само модель можна адаптувати для розрахунку параметрів рентгенотелевізійних систем з детекторами прямого перетворення. Бібліогр. 9, рис. 8.

Ключові слова: неруйнівний контроль, цифрова радіографія, сцинтиляційний екран, рентгенотелевізійна система, рентгеновська трубка, ПЗС-матриця, канавковий еталон чутливості

V. A. TROITSKII¹, S. R. MIKHAYLOV², D. S. SHYLO²

¹ E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU 11 Kazimir Malevich str., Kyiv-150, E-mail: office@paton.kiev.ua

² NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Pobedy avenue, Kyiv-56, 03056. E-mail: fel@kpi.ua

Modelling of X-ray images of digital X-ray-TV system based on scintillation screen and CCD matrix. The X-ray images, formed by digital X-ray-TV system of indirect conversion of “scintillation screen-objective lens - matrix” type were compared with the images received in modelling of this system. Versatile of a mathematical model, that is a basis for images calculation, allows determining working modes at a stage of X-ray-TV

system designing. The model can be adapted for specific technical problem that provides more accurate evaluation of parameters of the system being designed. Also the model can be adapted for calculation of the parameters of X-ray TV-systems with direct conversion detectors. Ref. 9, Figures 8

Keywords: non-destructive testing, digital radiography, scintillation screen, X-ray system, X-ray tube, CCD matrix, grooving sensitivity pattern.

Поступила в редакцию
25.04.2017

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

Журналы
Труды конференций
Сборники
Книги

ЖУРНАЛЫ



Журнал «Автоматическая сварка», 12 выпусков в год, издается с 1948 г. Тематика: сварка, термическая резка, наплавка, пайка, нанесение защитных покрытий и другие родственные процессы.



Журнал «The Paton Welding Journal», 12 выпусков в год, издается с 2000 г. (полный перевод журнала «Автоматическая сварка» на английский язык).



Журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 4 выпуска в год, издается с 1989 г. Тематика: методы и разработки в области технической диагностики и неразрушающего контроля.



Журнал «Современная электрометаллургия», 4 выпуска в год, издается с 1985 г. Тематика: специальные процессы переплава – ЭШТ, ЭЛП, ПДТ, ВДТ, ВИП.

СБОРНИКИ



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. – 254 с. Выпуск четвертый.



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2014. – 270 с. Выпуск третий.



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2011. – 324 с. Выпуск второй.



НАПЛАВКА. ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ / Составители: И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев, Е.Ф. Переплетчиков, Ю.М. Кусков. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2015. – 402 с.



СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2014. – 168 с.



СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ / Составители: В.М. Илюшенко, Е.П. Лукьянченко. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2013. – 396 с.



МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ / Составители: И.К. Походня, А.С. Котельчук. – Киев: Академперіодика, 2012. – 526 с.



СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2011. – 132 с.

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИЙ



I–VIII Международные конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (2002–2016 гг.). (Восемь выпусков).



Труды Международной конференции «Сварочные материалы», 16–18 июня 2014, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 6–7, 2014. – 204 с.



I–VII Международные конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» (2003–2015 гг.). (Семь выпусков).



Труды Международной конференции «Наплавка. – Наука. Производство. Перспективы», 15–17 июня 2015, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5–6, 2015. – 160 с.



Труды Международной конференции «Современные технологии сварки», 13–15 июня 2016, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5–6, 2016. – 184 с.



Труды Международной конференции «Роботизация и автоматизация сварочных процессов», 12–14 июня 2017, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5–6, 2017. – 120 с.