



ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ

Н. Г. БЕЛЫЙ¹, В. Н. БУХЕНСКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ², Н. В. СЛОБОДЯН², Д. С. ШИЛО²

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

²НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, Киев, Пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Предложена методика расчета относительной чувствительности контроля рентгеновских экранов и ПЗС-камер при работе с импульсными рентгеновскими аппаратами. Для визуализации изображений, формируемых импульсным рентгеновским излучением, используется режим регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камере. Предложенная методика основана на расчете зависимостей яркостного и порогового контрастов изображений канавок и проволок от глубины канавки и диаметра проволоки соответственно для канавочных и проволочных эталонов чувствительности с учетом пространственной фильтрации изображений в системе. Относительная чувствительность контроля рентгеновской системы определяется в точке пересечения зависимостей яркостного и порогового контрастов изображений канавок и проволок от глубины канавки и диаметра проволоки. Для определения энергетического спектра плотности потока квантов излучения импульсной рентгеновской трубки используются линейные аппроксимации временных зависимостей анодного напряжения и анодного тока на протяжении импульса рентгеновского излучения. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований цифровой рентгеновской системы на основе рентгеновского монокристаллического экрана CsI(Tl) и ПЗС-камеры, работающей в режиме регулируемой длительности накопления изображений на матрице, с импульсным рентгеновским аппаратом на основе рентгеновской трубки ИМА2-150Д. Выполнено сравнение рассчитанных и экспериментальных значений относительной чувствительности контроля рентгеновской системы. Библиогр. 14 назв., табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: рентгеновская система, относительная чувствительность контроля, импульсный рентгеновский аппарат, рентгеновский монокристаллический экран, ПЗС-матрица

Рентгеновские системы (РТВС) эффективно применяются для неразрушающего контроля (НК) качества материалов и изделий в промышленности. Такие системы имеют преимущества как перед пленочной, так и беспленочной цифровой рентгенографией на основе фосфорных запоминающих пластин в отношении производительности и стоимости контроля. В отличие от рентгенографии РТВС позволяют также контролировать объекты в статике и в динамике. Наиболее перспективными являются РТВС с рентгеновскими экранами и ПЗС-камерами, имеющие ряд преимуществ перед другими РТВС: возможность смены рентгеновского экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры РТВС; простота конструкции; низкая стоимость; высокие рентгенотехнические характеристики. Такие РТВС эффективно применяются для НК объектов стационарными рентгеновскими аппаратами, обеспечивая относительную чувствительность контроля 1,5...2,0 % в широком диапазоне толщины стали. Дальнейшее улучшение относительной чувствительности контроля РТВС и расширения диапазона контролируемых толщин объектов возможно за счет перевода ПЗС-камер в режим регулируемой длительности накопления изображений [1, 2].

Однако использование режима регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камере позволяет также использовать для просвечивания малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты [3] с устранением низкочастотных мерцаний изображений и создавать мобильные РТВС для контроля объектов в полевых условиях и труднодоступных местах. В связи с этим актуальными являются теоретические и экспериментальные исследования РТВС, работающих в режиме регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камере, с импульсными рентгеновскими аппаратами.

Исследования РТВС проводили с помощью импульсного рентгеновского аппарата Мира-2Д [4] на основе рентгеновской трубки ИМА2-150Д. В составе РТВС — высокочувствительная ПЗС-камера и рентгеновский монокристаллический экран CsI(Tl). В ПЗС-камере используется высокочувствительная ПЗС-матрица EXview HAD ICX-429ALL фирмы SONY [5] с микролинзовым массивом. Размер диагонали матрицы ICX-429ALL — 8 мм (формат 1/2"), количество светочувствительных элементов 752×582, размеры светочувствительного элемента матрицы по горизонтали и по вертикали равны соответственно $L_{py} = 8,6$ и $L_{pz} = 8,3$ мкм. Камера оборудована линзовым объек-



тивом Computar с относительным отверстием 1:1 с переменным фокусным расстоянием. ПЗС-камера имеет возможность работы в режиме регулируемой длительности накопления изображений на матрице (количество кадров накопления до 2048). В состав РТВС входит портативный компьютер, который используется для управления РТВС, а также для записи и обработки рентгенотелевизионных изображений. Исследования проводили при просвечивании стальных образцов различной толщины, относительная чувствительность контроля рассчитывалась и измерялась по канавочным и проволочным эталонам чувствительности [6].

Относительная чувствительность контроля РТВС определяет наименьший в направлении просвечивания относительный размер дефекта исследуемого объекта, выявляемый данной системой. При использовании канавочного эталона относительная чувствительность определяется по формуле $K_k = h_{\min}/(H_{kz} + h_{\text{can}}) \cdot 100\%$, где h_{\min} — глубина наименьшей выявленной канавки; H_{kz} — толщина контролируемого объекта; h_{can} — толщина канавочного эталона. Для случая использования проволочного эталона относительная чувствительность определяется по формуле: $K_d = (d/H_{kz}) \cdot 100\%$, где d — диаметр наименьшей выявленной проволоки.

Для теоретических исследований использовали методику расчета относительной чувствительности РТВС на основе ПЗС-камер и рентгеновских экранов [1, 2], методику моделирования теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта на входе РТВС [7], а также методику моделирования импульсных рентгеновских аппаратов [8–10].

Как показано в работе [1], дефект определенного размера в направлении просвечивания может быть с некоторой вероятностью обнаружен, если его яркостный контраст k_B больше или равен пороговому контрасту $k_{\text{пор}}$. Поэтому для определения минимального размера дефекта, который может быть обнаружен системой, необходимо построить зависимости яркостного и порогового контрастов от размера дефекта и найти их точку пересечения.

Для определения k_B и $k_{\text{пор}}$ применили следующие формулы:

$$k_B = K_S M(\nu), \quad (1)$$

$$k_{\text{пор}} = \sqrt{\frac{\Psi_{\text{пор}}^2}{(T_i/T_{EX})(\Omega/A_{CCD})}} M^2(\nu) K_N^2 + k_v^2. \quad (2)$$

Здесь $M(\nu)$ — пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) рентгеноэлектрического преобразователя; ν — пространственная частота, которая соответствует поперечным размерам дефекта; $\Psi_{\text{пор}}$ — пороговое отношение сигнал/шум; T_i — время интегрирования зрительным анализатором;

T_{EX} — длительность кадра накопления; Ω — площадь дефекта, приведенная к поверхности ПЗС-матрицы; A_{CCD} — площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы; k_v — пороговый контраст зрительного анализатора; K_S — зарядовый контраст изображения, определяемый как отношение количества накопленных в элементарной ячейке ПЗС-матрицы электронов, которые соответствуют разностному сигналу от дефекта в просвечиваемом объекте $Q_S(H_1, \Delta H_1)/q$ (т. е. полезного сигнала) и сигнала от бездефектного участка объекта $Q_\Phi(H_1)/q$ (фонового сигнала):

$$K_S = \frac{Q_S/q}{Q_\Phi/q}, \quad (3)$$

где K_N — относительная средняя флуктуация в расчете на площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы за время накопления, определяемая как

$$K_N = \frac{1}{\sqrt{Q_\Phi/q}}. \quad (4)$$

Выражения для $Q_S(H_1, \Delta H_1)/q$ и $Q_\Phi(H_1)/q$ определяются следующим образом:

$$\frac{Q_S(H_1, \Delta H_1)}{q} = K_{\text{opt}} N_k T_{EX} A_{CCD} \frac{C_{ef} \lambda_1}{hc} \frac{\int_{\lambda_2}^{+\infty} \varphi_{nS}(\lambda) F(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{nS}(\lambda) d\lambda} \times$$

$$\int_0^{E_{\text{max}}} \tilde{N}(E_{\text{max}}, E) \exp[-\mu_1(E)H_1][1 - \exp(-\mu_1(E)\Delta H_1)] \times$$

$$\times [1 - \exp(-\mu_S(E)H_S)] EdE, \quad (5)$$

$$Q_\Phi(H_1)/q = K_{\text{opt}} N_k T_{EX} A_{CCD} \frac{C_{ef} B(E_{\text{max}})}{hc} \frac{\int_{\lambda_2}^{+\infty} \varphi_{nS}(\lambda) F(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{nS}(\lambda) d\lambda} \times$$

$$\int_0^{E_{\text{max}}} \tilde{N}(E_{\text{max}}, E) \exp(-\mu_1(E)H_1)[1 - \exp(-\mu_S(E)H_S)] EdE, \quad (6)$$

где $\tilde{N}(E_{\text{max}}, E)$ — энергетический спектр плотности потока рентгеновских квантов для импульсного рентгеновского аппарата; H_1 — толщина просвечиваемого образца, см; ΔH_1 — глубина (высота) локального дефекта, см; E — энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ; E_{max} — максимальная энергия квантов, кэВ (численно равная напряжению на аноде рентгеновской трубки U_A , кВ);



H_S — толщина рентгеновского экрана, см; $\mu_1(E)$ — линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения материала контролируемого образца, см⁻¹; $\mu_S(E)$ — линейный коэффициент истинного поглощения материала монокристаллического экрана, см⁻¹; $B(E_{\max})$ — фактор накопления, который зависит от ускоряющего напряжения рентгеновской трубки, материала объекта и его толщины; K_{opt} — коэффициент передачи оптической системы; N_k — количество кадров накопления; T_{EX} — длительность кадра накопления, с; C_{ef} — конверсионная эффективность рентгеновского монокристаллического сцинтилляционного экрана; λ — длина волны оптического излучения, см; $F(\lambda)$ — зависимость квантовой эффективности ПЗС-матрицы от длины волны оптического излучения; $\varphi_{nS}(\lambda)$ — нормированная спектральная характеристика излучения монокристаллического экрана; λ_1 и λ_2 — ограничивают диапазон длин волн, в котором произведение характеристик $\varphi_{nS}(\lambda)$ и $F(\lambda)$ не равно нулю; h — постоянная Планка; c — скорость света.

Для определения энергетического спектра плотности потока рентгеновских квантов импульсного рентгеновского аппарата $\tilde{N}(E_{\max}, E)$ использовали модель импульсных рентгеновских аппаратов [8–10].

Модель учитывает как фактор импульсного функционирования таких аппаратов (переменное напряжение на аноде и переменный анодный ток на протяжении длительности импульса τ), так и особенности их конструкции (импульсные трубки с трансмиссионными и рефлекторными анодами). Для расчетов использовали упрощенную форму временных зависимостей напряжения и тока, которая отображает соответствующие реальные зависимости, характерные для трубок с взрывной эмиссией, а именно: на временном отрезке от 0 до τ_1 ускоряющее напряжение постоянное, а ток линейно возрастает, а от τ_1 до τ_2 — напряжение и ток линейно спадают до нулевого значения. В соответствии с моделью распределение квантов излучения импульсного РА по энергиям в среднем за период следования импульсов τ $\tilde{N}(E_{\max}, E)$ определяется с помощью уравнений:

$$\tilde{N}(E_{\max}, E) = [D_1(E_{\max}, E) + D_2(E_{\max}, E)]/\tau, \quad (7)$$

где

$$D_1(E_{\max}, E) = \int_0^{\tau_1} N_E(E_{\max}, E) I_{\max}(E_{\max}) \frac{t}{\tau_1} dt, \quad (8)$$

$$D_2(E_{\max}, E) = \int_0^{\tau_2 - \tau_1} N_E\left(E_{\max} \frac{t}{\tau_2 - \tau_1}, E\right) I_{\max}(E_{\max}) \frac{t}{\tau_2 - \tau_1} dt, \quad (9)$$

$$I_{\max}(E_{\max}) = 1,12 \cdot 10^6 (C/d_{AK})^{1/2} E_{\max}^{3/4}, \quad (10)$$

$$N_E(E_{\max}, E) = \frac{k_1 Z(E_{\max} - E)}{r_s^2 E} \times \exp[-\mu_m(E)y(E, E_{\max}) - \mu_0(E)H_0], \quad (11)$$

где для трубок с трансмиссионным анодом

$$y(E, E_{\max}) = \Delta - \frac{E_{\max}^2 - E^2}{\rho_m C_{TB}(E_{\max})}; \quad (12)$$

E_{\max} — максимальная энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ; E — энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ; t — время, с; τ_2 — длительность импульсов; τ — период их следования; I_{\max} — амплитуда импульса тока, А; C — емкость конденсатора, который разряжается на импульсную рентгеновскую трубку, Ф; d_{AK} — расстояние между анодом и катодом трубки, см; $k_1 = 1,1 \cdot 10^{12}$ квант/А · с · кэВ; Z — атомный номер материала анода; r_s — расстояние от рентгеновской трубки, см; H_0 — толщина выходного окна рентгеновской трубки, см; $\mu_m(E)$, $\mu_0(E)$ — линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения соответственно материала анода и окна рентгеновской трубки, см⁻¹; ρ_m — плотность материала анода, г/см³; $C_{TB}(E_{\max})$ — константа Томсона–Видингтона; D — толщина трансмиссионного анода, см.

Уравнением (10) выражено соотношение амплитуд импульсов тока и анодного напряжения (соответствует значению (E_{\max})), характерное для трубок со взрывной эмиссией. Уравнение (11) определяет $N_E(E_{\max}, E)$ — мгновенное распределение квантов излучения импульсного рентгеновского аппарата по энергиям на единицу тока. Уравнение (12) учитывает геометрический фактор: длину пути $y(E, E_{\max})$, который проходят в толще анода кванты с разной энергией от места их зарождения до выхода, определяет самопоглощение тормозного рентгеновского излучения материала анода.

Расчет проводили для импульсной рентгеновской трубки ИМА2-150Д с трансмиссионным вольфрамовым анодом толщиной 0,02 мм. Распределение квантов излучения импульсного рентгеновского аппарата было усреднено за период следования импульсов, который для аппарата МИРА-2Д составляет 0,1 с [4]. Расстояние от анода рентгеновской трубки до рентгеновского экрана как при расчетах, так и при экспериментальных исследованиях, составляло $r_s = 35$ см.

Для используемой оптической системы коэффициент передачи $K_{\text{opt}} \approx 0,075$; $A_{CCD} = L_{py} \times L_{pz} = 0,71 \cdot 10^{-10}$ м²; конверсионная эффективность рентгеновского монокристаллического экрана CsI(Tl) $C_{ef} = 0,06$ [11]. Нормированная спектральная зависимость излучения экрана CsI(Tl) $\varphi_{nS}(\lambda)$ приводится в [11]. Справочные данные по энер-

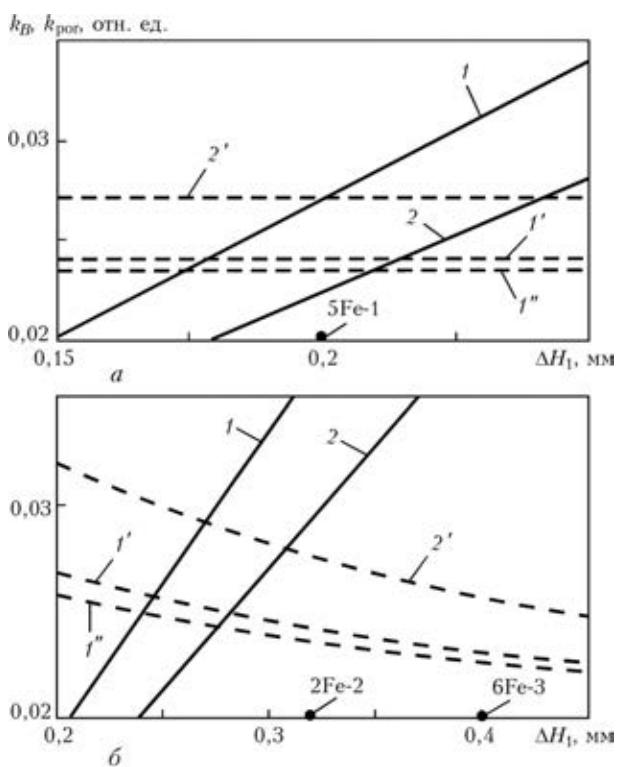
гетической зависимости массовых коэффициентов ослабления для вольфрама (материала анода рентгеновской трубки), бериллия (материала выходного окна рентгеновской трубки), железа (материала контролируемых объектов) и массовых коэффициентов истинного поглощения для цезия и йода (элементов, из которых состоит материал рентгеновского монокристаллического экрана) взяты из работы [12]. При этом массовый коэффициент истинного поглощения CsI(Tl) рассчитывался по формуле для сложных соединений путем сложения произведений массовых долей каждого элемента соединения и его массового коэффициента истинного поглощения. Линейные коэффициенты ослабления и истинного поглощения $\mu_m(E)$, $\mu_0(E)$, $\mu_1(E)$ и $\mu_s(E)$ получали умножением массовых коэффициентов на плотность соответствующих материалов. Фактор накопления $B(E_{max})$, который учитывается при вычислении фонового сигнала, в соответствии с данными работы [7] определялся по формуле $B(H_1, E_{max}) = 1 + 0,013(E_{max}H_1)^{0,8}$. Толщина объекта для случая использования проволочных эталонов равна толщине контролируемого образца: $H_1 = H_{kz}$, а размер дефекта — диаметру эталонной проволоки: $\Delta H_1 = d$. Для случая использования канавочного эталона толщина объекта равна сумме толщин контролируемого образца и эталона: $H_1 = H_{kz} + h_e$, а размер дефекта — глубине канавки, значение которой берется с противоположным знаком: $\Delta H_1 = -h_k$.

Площадь дефекта, приведенная к поверхности ПЗС-матрицы $\Omega = d^2/\delta^2$, где d — диаметр проволочного эталона. Длительность одного кадра накопления $T_{EX} = 40$ мс. Время интегрирования зрительным анализатором $T_i = 0,1$ с, пороговый контраст $k_v = 2\%$, пороговое отношение сигнал/шум $\psi_{por} = 3$ [13, 14].

На рисунке представлены полученные с помощью описанной модели графики зависимостей контраста выходного сигнала матрицы и порогового контраста от размера дефекта для ускоряющего напряжения 150 кВ. При этом на шкале толщин отмечены размеры, соответствующие эталонам ГОСТ 7512–82 [6].

Из графиков видно, что контраст выходного сигнала ПЗС-матрицы k_B линейно возрастает с

увеличением размера дефекта (глубины канавки и диаметра проволоки). Угол наклона k_B тем меньше, чем больше толщина контролируемого образца и чем выше ускоряющее напряжение импульсного рентгеновского аппарата. Значение порогового контраста k_{por} тем выше, чем меньше общее количество квантов, которое создает изображение, поэтому увеличение количества кадров накопления ведет к уменьшению k_{por} . Для канавочных эталонов, у которых поперечные размеры канавок (ширина b) одинаковые, соответствующие зависимости порогового контраста имеют вид линий, параллельных оси абсцисс. Для проволочных эталонов, у которых толщина проволоки равняется ее поперечному размеру (диаметру d), форма зависимостей более сложная и пороговый конт-



Зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-матрицы k_B (сплошные линии) и порогового контраста k_{por} (штриховые) от размера дефекта ΔH_1 — соответственно для канавочного эталона Fe-1 (а) и проволочных эталонов Fe-2, Fe-3 (б) при различном количестве кадров накопления: кривая 1 — k_B при $H_{kz} = 10$ мм; 2 — k_B при $H_{kz} = 14$ мм. Кривые, номер которых отмечен штрихом, обозначают k_{por} , соответствующий k_B с таким же номером: 1' — $N_k = 375$; 1'' — $N_k = 450$; 2' — $N_k = 450$

Экспериментальные и рассчитанные значения относительной чувствительности контроля РТВС (ускоряющее напряжение рентгеновской трубки $U_A = 150$ кВ)

H_{kz} , мм	N_k	Канавочный эталон			Проволочный эталон		
		Номер канавки и тип эталона	K_k , % эксп.	K_k , % расч.	Номер проволоки и тип эталона	K_d , % эксп.	K_d , % расч.
10	375	4Fe-1	2,5	1,7	6Fe-3	4	3,2
10	450	4Fe-1(5 Fe-1)	2,5(1,7)	1,7	6Fe-3	4	3,2
14	450	4Fe-1	1,8	1,8	6Fe-3	2,9	2,3



раст уменьшается с увеличением диаметра проволоки. Отмеченные свойства характеристик k_B и $k_{\text{рог}}$ согласуются с известными принципами формирования рентгеновского изображения [7].

Значение относительной чувствительности рассчитывается по наименьшей глубине канавки канавочного эталона или наименьшему диаметру проволоочного эталона, для которых выполняется критерий (I) (т. е. ближайшее со стороны больших размеров значение глубины или диаметра эталона относительно точки пересечения соответствующих кривых на рисунке).

В таблице приведены значения относительной чувствительности контроля РТВС по канавочным эталонам K_k и проволоочным эталонам K_d , которые были получены экспериментально. Рядом с экспериментальными приведены значения чувствительности, рассчитанные путем моделирования и полученные из приведенных графиков.

В таблице указаны толщина контролируемого стального объекта H_{kz} и количество кадров накопления ПЗС-камеры N_k , а также номера наименьшей по глубине канавки и наименьшей по диаметру проволоки, выявляемые системой, с обозначением типов соответствующих эталонов (Fe-1 или Fe-3).

Сравнение рассчитанных и экспериментальных значений чувствительности свидетельствует об удовлетворительном согласовании значений, полученных с помощью предложенной модели, с экспериментальными. Из приведенных графиков видно, что увеличение количества кадров накопления позволяет повысить чувствительность системы. Кроме того, предложенная модель является универсальной и может быть использована при расчетах относительной чувствительности систем с импульсными аппаратами других моделей, имеющих другие параметры и характеристики.

Выводы

Использование режима регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камерах позволяет устранить низкочастотные мерцания изображений при использовании для просвечивания малогабаритных импульсных рентгеновских аппаратов и создавать мобильные рентгенотелевизионные системы для контроля объектов в полевых условиях и труднодоступных местах.

В предложенной математической модели учтены все основные этапы преобразования сигналов в рентгенотелевизионных системах и она позволяет рассчитывать относительную чувствительность РТВС на основе импульсных рентгеновских аппаратов при использовании режима регулируемой длительности накопления.

Рассчитанные с помощью модели значения чувствительности хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными.

Рентгенотелевизионные системы на основе ПЗС-камер, работающих в режиме регулируемой длительности накопления изображений, и импульсных рентгеновских аппаратов с рентгеновской трубкой ИМА2-150Д, обеспечивают чувствительность контроля стальных объектов толщиной до 14 мм 1,8 % по канавочным и 2,9 % по проволоочным эталонам.

Увеличение количества кадров накопления в ПЗС-камерах импульсных РТВС позволяет достичь чувствительности контроля, не уступающей чувствительности РТВС на основе рентгеновских аппаратов непрерывного действия.

1. *Относительная чувствительность рентгенотелевизионных систем на основе высокочувствительных ПЗС-камер и рентгеновских монокристаллических экранов* / Н. Г. Белый, С. В. Денбновецкий, А. В. Лецишин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 2. — С. 34–40.
2. *Высокочувствительные рентгенотелевизионные системы на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер с накоплением изображений* / В. А. Троицкий, Н. Г. Белый, В. Н. Бухенский и др. // Там же. — 2009. — № 3. — С. 41–46.
3. *Вавилов С. П., Горбунов В. И.* Импульсное рентгеновское излучение в дефектоскопии. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 80 с.
4. *Комяк Н. И., Пеликс Е. А.* Портативные импульсные рентгеновские аппараты серии МИРА // Электронная техника. Серия 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. — 1979. — Вып. 4. — С. 9–11.
5. *Diagonal 8 mm (Type 1/2) CCD Image Sensor for CCIR V/W Video Cameras ICX429ALL.* //www.sony.net.
6. *ГОСТ 7512–82.* Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 30 с.
7. *Михайлов С. Р.* Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля // Электроника и связь. — 2002. — № 16. — С. 59–70.
8. *Слободян Н. В.* Особенности моделирования характеристик излучения импульсных рентгеновских аппаратов // Там же. — 2004. — № 21. — С. 80–82.
9. *Слободян Н. В.* Моделювання та порівняння характеристик випромінювання імпульсних рентгенівських апаратів різних типів // Там же. — 2006. — Тематич. випуск «Проблеми електроніки». — Ч. 2. — С. 33–36.
10. *Denbnovetsky S. V., Slobodyan N. V.* Simulation of radiation characteristics of pulse X-ray devices for non-destructive testing the semiconductor materials // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. — 2006. — 9, № 1. — P. 68–72.
11. *Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 488 с.
12. *Сторм Э., Израэль Х.* Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001...100 МэВ и элементов с 1 по 100). Справочник / Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1973. — 256 с.
13. *Гурвич А. М.* Физические основы радиационного контроля и диагностики. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 168 с.
14. *Роуз А.* Зрение человека и электронное зрение / Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 216 с.

A procedure is proposed for calculation of relative testing sensitivity of X-ray TV systems based on X-ray shields and CCD-cameras at operation with pulsed X-ray units. The mode of adjustable duration of image accumulation in CCD-camera



is used for visualization of images formed by pulsed X-ray radiation. Proposed procedure is based on calculation of dependencies of brightness and threshold contrasts of images of grooves and wires on groove depth and wire diameter for grooved and wire sensitivity standards, respectively; allowing for spatial filtration of images in the system. Relative testing sensitivity of X-ray TV system is determined in the points of intersection of dependencies of brightness and threshold contrasts of groove and wire images on groove depth and wire diameter. Linear approximations of time dependencies of anode voltage and anode current during X-ray radiation pulse are used to determine the energy spectrum of quantum flux density of pulsed X-ray tube radiation. The paper gives the results of theoretical and experimental studies of X-ray TV system based on X-ray CsI(Tl) single-crystal screen and CCD camera operating in the mode of adjusted duration of image accumulation on the matrix, with pulsed X-ray unit based on IMA2-150D X-ray tube. Comparison of calculated and experimental values of relative sensitivity of testing by X-ray TV system is performed.

Keywords: X-Ray TV system, relative testing sensitivity, pulsed X-ray system, X-Ray single-crystal screen, CCD-matrix

Поступила в редакцию
30.11.2012

ЦІЛЬОВА КОМПЛЕКСНА ПРОГРАМА НАН УКРАЇНИ «ПРОБЛЕМИ РЕСУРСУ І БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ, СПОРУД ТА МАШИН»

*Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр.
Науковий керівник — академік Б. Є. Патон*

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2010–2012 рр., до реалізації якої було залучено 26 інститутів НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів. Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

Розділ 1. Розробка методологічних основ оцінки технічного стану та обґрунтування безпечного терміну експлуатації конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки на території України.

Розділ 2. Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації.

Розділ 3. Розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації.

Раздел 4. Разработка эффективных методов оценки и продления ресурса объектов атомной энергетики.

Розділ 5. Підвищення надійності та подовження ресурсу енергетичного обладнання і систем.

Розділ 6. Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості.

Розділ 7. Підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій.

Розділ 8. Розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки з метою продовження терміну їх експлуатації.

Розділ 9. Підготовка нормативних документів і науково-технічних посібників з питань оцінки ресурсу об'єктів тривалої експлуатації.

Проблеми ресурсу
і безпеки експлуатації
конструкцій, споруд
та машин

