

## ОЦЕНКА КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МАММОГРАФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СИМА И МАДИС

О. Н. БЕЗГИНОВА<sup>1</sup>, С. В. ЛИТВИНЕНКО<sup>2</sup>, О. И. РОМАНОВ<sup>2</sup>, Е. В. ХОМЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ООО «ЭЛКОМЕД», г. Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup>Фирма «РАДМИР» ДП АО НИИРИ, г. Харьков, УКРАИНА

\*email: khomenkoev@rambler.ru

**АННОТАЦИЯ** В данной работе описана уточненная методика оценки квантовой эффективности регистрации и функции передачи модуляции для детекторов рентгеновского излучения цифровых маммографических комплексов СИМА и МАДИС. Эти детекторы построены по схеме: рентгено-люминесцентный экран – объектив – фоточувствительная ПЗС-матрица. Рассмотрены физико-технические условия формирования наборов входных данных программы оценки параметров маммографических комплексов СИМА и МАДИС. Приведены полученные для детекторов излучения серийно выпускаемых образцов маммографических комплексов СИМА и МАДИС графики зависимости квантовой эффективности регистрации и функции передачи модуляции от пространственных частот.

**Ключевые слова:** цифровой маммографический комплекс, детектор рентгеновского излучения, квантовая эффективность регистрации, функция передачи модуляции, линейаризация, спектральная плотность шума.

## THE EVALUATION OF QUANTUM EFFICIENCY OF X-RAY DETECTORS FOR DIGITALMAMMOGRAPHY SYSTEMS SYMA AND MADIS

O. BEZGINOVA<sup>1</sup>, S. LYTUVYENENKO<sup>2</sup>, O. ROMANOV<sup>2</sup>, E. KHOMENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>«ELKOMED» LTD, Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup>Radmir Company Subsidiary of Scientific Research Institute of Radio Engineering Measurements JSC, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** *The aim of work:* To develop a methodology to assess the quantum detection efficiency, and modulation transfer function for the X-ray detector, built by the scheme RLE - optics - PDCC-matrix. *The methods:* In paper describes a revised technique for evaluation of the detective quantum efficiency and modulation transfer function for X-ray detectors of digital mammography systems SYMA and MADIS. The detectors are assembled according to the scheme: X-ray luminescent screen – lens – photosensitive CCD. The physical and technical conditions of generating input data sets for the evaluation program of parameters for mammography systems SYMA and MADIS and the principle of operation of the systems were considered. *The results:* The detailed description of input data obtained by receiving X-ray images via X-ray detectors was given. This quantity of information allows making calculations of investigated dependencies with sufficient accuracy. Stages of the program algorithm for calculating the values of the detective quantum efficiency and modulation transfer function of the detectors were described. The diagrams that show dependencies of the detective quantum efficiency and modulation transfer function on spatial frequencies which were received for X-ray detectors of commercially available samples of mammography systems SYMA and MADIS were given. The quality characteristics which were received satisfy the requirements of normative documents for the X-ray detectors. *The conclusions:* The method of estimating the quantum detection efficiency, and modulation transfer function for the X-ray detector, built by the scheme RLE - optics - PDCC matrix. Such detectors are used in the production of mammography complexes Madis and SIM is described. The quality characteristics of radiation detectors mammography complexes SYMA and MADIS performance meet the requirements of regulatory documents to the X-ray detectors.

**Keywords:** digital mammography complex, X-ray detector, detective quantum efficiency, modulation transfer function, linearization, noise spectral density.

### Введение

В лечебно-профилактических учреждениях Украины за последние годы заметно возрос парк высокотехнологичного цифрового оборудования. Это относится и к цифровым рентгеновским маммографическим комплексам СИМА и МАДИС производства фирмы «Радмир» ДП АО НИИРИ (г. Харьков). Вместе с повышением количества используемых цифровых комплексов повышаются требования к оценке качества функционирования комплексов при их выпуске и эксплуатации.

Особенно это касается оценки параметров и характеристик качества формирования изображения цифровыми детекторами рентгеновского излучения. Главной характеристикой, определяющей качество работы детекторов, является зависимость квантовой эффективности регистрации (DQE) от пространственных частот и дозы рентгеновского излучения в плоскости детектора [1]. В настоящее время DQE единственная характеристика цифровых детекторов, требования к контролю которой задаются соответствующим международным стандартом EN 62220-1-2:2007 [2]. Этот стандарт гармонизирован в

Украине как ДСТУ EN 62220–1–2:2015 [3] и введен в действие с 1 января 2016 года. Методы оценки DQE, описанные в стандарте, носят обобщенный характер и требуют уточнения при работе с каждым конкретным типом детектора.

### Постановка задачи

Рентгеновские маммографические цифровые комплексы СИМА и МАДИС предназначены для рентгенографии молочной железы и визуализации рентгеновских изображений на экране монитора ПК при выполнении скрининговых и диагностических обследований. Они имеют идентичные детекторы рентгеновского излучения, собранные по схеме: рентгено-люминесцентный экран (РЛЭ) – объектив – фоточувствительная ПЗС-матрица (ФПЗС).

Принцип действия маммографических комплексов СИМА и МАДИС основан на просвечивании молочной железы рентгеновским излучением и преобразовании теневого рентгеновского изображения в оптический диапазон длин волн с помощью рентгено-люминесцентного экрана. Далее это изображение через оптическую систему проецируется на фотопреобразователь, выполненный на фоточувствительном приборе с зарядовой связью. Потенциальный рельеф изображения считывается с ФПЗС с последующим аналого-цифровым преобразованием в цифровой код, который передается в память ПК. С помощью ПК обеспечивается визуализация изображений на экране монитора, их архивирование и управление работой комплекса в целом.

Комплекс СИМА напольного типа имеет расстояние фокус-приемник 650 мм, а комплекс МАДИС настольного типа имеет расстояние фокус-приемник 210 мм. Общий вид комплексов СИМА и МАДИС приведен на рис. 1 и 2, соответственно.

Отметим, что примененная в цифровых детекторах комплексов технология построения с использованием ПЗС-матриц имеет ряд преимуществ перед твердотельными рентгеночувствительными панелями, а именно: устойчивость к быстрому изменению температуры окружающей среды, ремонтпригодность, относительно низкую стоимость [4-7]. В то же время энергетические потери в детекторах на ПЗС-матрицах компенсируются за счет применения так называемого микрофокусного способа получения фазоконтрастных рентгеновских изображений [8]. Этот способ предполагает работу рентгеновской трубки с размерами фокального пятна, не превышающими 0,1 мм, что и реализовано в комплексе МАДИС.

Рентгеновские снимки, получаемые с помощью детекторов рентгеновского излучения комплексов МАДИС и СИМА, представляют собой монохромные изображения форматом 3072×4096 элементов. Каждый файл снимка содержит двумерный массив 2-байтных элементов, содержащих информацию о

яркости пикселей. Массив элементов имеет заголовок, в котором хранятся данные о пациенте, визите, условиях получения снимка и т.д.



Рис. 1 – Общий вид КРМЦ СИМА



Рис. 2 – Общий вид КРМЦ МАДИС

Согласно [2] квантовая эффективность регистрации как функция пространственных частот может быть определена с использованием следующего выражения:

$$DQE(u, v) = G^2 MTF^2(u, v) \frac{W_{in}(u, v)}{W_{out}(u, v)}, \quad (1)$$

где:  $G$  – коэффициент усиления (передачи) приемного тракта в области нулевых пространственных частот;  $MTF(u, v)$  – функция передачи модуляции;  $W_{in}(u, v)$  – спектральная плотность квантовых шумов на входе каналов приемника;  $W_{out}(u, v)$  – спектральная плотность квантовых шумов на выходе каналов приемника.

Таким образом, процесс вычисления DQE может быть сведен к оценке составляющих элементов в представленном выражении. Для определения элементов необходимо рассмотреть вычислительные процедуры в применении их к детекторам рентгеновского излучения комплексов СИМА и МАДИС.

### Основная часть

Входящие в формулу (1) элементы – спектр мощности шума на выходе  $W_{out}(u, v)$  и функцию передачи модуляции  $MFT(u, v)$  детектора следует рассчитывать по линейаризованным данным, найденным из исходных данных с помощью обратной функции преобразования. Они выражаются числом квантов рентгеновского злучения, приходящихся на единицу площади. Источником исходных данных являются цифровые массивы снимков, полученные в детекторе изображения. Коэффициент усиления приемного тракта  $G$  является частью функции преобразования и не нуждается в отдельном определении. Тогда рабочей формулой для определения квантовой эффективности регистрации  $DQE(u, v)$  является зависимость:

$$DQE(u, v) = MTF^2(u, v) \frac{W_{in}(u, v)}{W_{out}(u, v)}. \quad (2)$$

Функцию преобразования необходимо определять по зарегистрированным при разных значениях дозы в плоскости детектора снимкам «чистого поля», т. е. при условии отсутствия входной плоскости каких-либо объектов.

Функция передачи модуляции описывает разрешающую способность детекторов. Эту характеристику определяют при воздействии рентгеновского излучения на специальные тест-объекты. Наиболее часто в качестве тест-объектов применяют пластины из нержавеющей стали с узкой щелью или острым краем. По ним определяется функция отклика детектора (LSF), из которой вычисляется функция MTF посредством применения преобразования Фурье.

Спектральная плотность квантового шума на входе детектора распределена равномерно по всей совокупности пространственных частот и определяется по формуле:

$$W_{in}(u, v) = K_a \cdot SNR_{in}^2, \quad (3)$$

где:  $K_a$  – измеренная экспозиционная доза в плоскости детектора, мкР;  $SNR_{in}^2$  – квадрат отношения сигнал-шум в дозе,  $1/\text{мм}^2\text{мкР}$ .

Спектральная плотность шума на выходе детектора определяется как:

$$W_{out}(u_n, v_k) = \frac{\Delta x \Delta y}{M \cdot 256 \cdot 256} \sum_{m=1}^M \left| \sum_{i=1}^{256} \sum_{j=1}^{256} (I(x_i, y_j) - S(x_i, y_j)) \exp(-2\pi i(u_n x_i + v_k y_j)) \right|^2, \quad (4)$$

где:  $\Delta x, \Delta y$  – размер пикселя в горизонтальном и вертикальном направлении, соответственно;  $M$  – количество областей интереса;  $I(x_i, y_i)$  – линейаризованные данные яркости элементов матрицы изображения;  $S(x_i, y_i)$  – двумерный полином, применяемый опционно для коррекции неоднородности радиационного поля.

Исходными данными для расчета спектральной плотности выходных шумов служат снимки «чистого поля», сделанные для заданного уровня дозы в плоскости детектора. Плоскость детектора условно делится на квадратные области интереса. Согласно [2] каждая область интереса должна иметь формат  $256 \times 256$  пикселей. Области интереса должны перекрываться на 128 пикселей в горизонтальном и вертикальном направлениях (рис. 3). Первая область интереса должна находиться в верхнем левом углу изображения, вторая область интереса получается перемещением на 128 пикселей вправо в горизонтальном направлении и на половину перекрывает первую. Следующая область получается перемещением второй вновь на 128 пикселей. Это повторяется до конца первой горизонтальной «полосы». Начиная вновь с левой стороны изображения и одновременно смещаясь на 128 пикселей в вертикальном направлении, получают вторую горизонтальную «полосу». Смещение в вертикальном направлении создает следующие полосы, пока вся площадь не будет покрыта областями интереса.

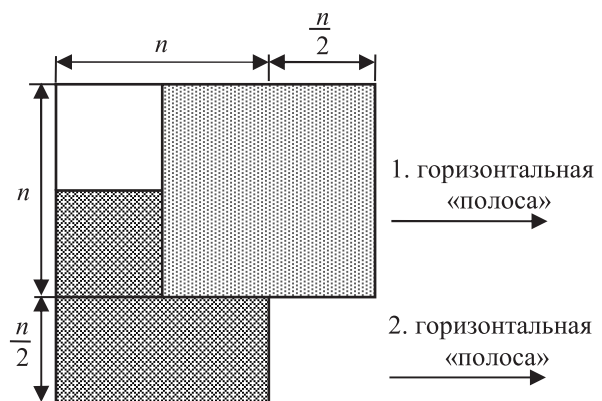


Рис. 3 – Расположение областей интереса

Исследования по определению величины квантовой эффективности регистрации проведены при трех уровнях экспозиционной дозы  $D_1, D_2, D_3$ . При этом  $D_1$  – нормальный уровень экспозиционной дозы (т.е. усредненный уровень, который используется при применении приемника в клинической практике). Уровень  $D_2 = D_1 \cdot 3,2$  и уровень  $D_3 = D_1 / 3,2$ . Для комплекса СИМА были выбраны следующие уровни экспозиционной дозы:  $D_1^C = 160$  мкР,  $D_2^C = 512$  мкР,  $D_3^C = 50$  мкР. Для комплекса МАДИС уровни экспозиционной дозы



составили:  $D_1^M = 200$  мкР,  $D_2^M = 640$  мкР,  $D_3^M = 62,5$  мкР.

Как правило, при испытании систем маммографии используют качество излучения RQA-M1 при наличии дополнительного фильтра (2 мм Al для маммографа СИМА и 0,5 мм Al для маммографа МАДИС).

Определение квантовой эффективности регистрации выполнялось с помощью специального программного обеспечения. Расчеты величины DQE маммографов МАДИС и СИМА проводились с использованием алгоритма определения DQE и MTF, основанного на методике, установленной в [2], и реализованного авторами в среде MATLAB. Разработанная программа оценки DQE и MTF позволяет визуализировать полученные результаты в виде таблиц и графиков и имеет набор функций, аналогичный описанному в [9].

В программу необходимо ввести следующие данные:

- массивы данных снимков чистого поля при различных уровнях дозы, распределенных равномерно в диапазоне от 0 до  $D_i \cdot 4$  мкР – для определения функции преобразования;

- массивы данных снимков чистого поля на заданном уровне дозы ( $D_1$ ,  $D_2$  или  $D_3$ ) – для определения спектральной плотности шума на выходе;

- массивы данных снимков тест-объекта – для расчета функции передачи модуляции;

- размеры и координаты областей интереса – для получения исходных данных.

В работе программы можно условно выделить три этапа. На первом этапе вычисляется функция преобразования (которая в дальнейшем применяется для получения линеаризованных данных) и спектральная плотность квантового шума на входе. Далее формируется массив элементов линеаризованных данных из снимков чистого поля, используемых в алгоритме. При проведении расчетов характеристик детектора маммографа МАДИС для коррекции неоднородности радиационного поля из линеаризованных данных вычитался двумерный полином второго порядка  $S(x_i, y_i)$ . Он определялся методом наименьших квадратов. Для маммографа СИМА необходимость применения двумерного полинома не возникала, поскольку радиационное поле маммографа СИМА обладает достаточной однородностью. При вычислении двумерного полинома по элементам изображения возникают краевые эффекты, которые приводят к некорректным результатам расчетов. Чтобы исключить влияние краевых эффектов, для вычисления двумерного полинома выбирают область, превышающую по размерам исследуемую область интереса. По линеаризованным данным выполняется расчет спектральной плотности шума на выходе детектора.

На втором этапе производится расчет MTF. Для анализа выбиралась прямоугольная область элементов

детектора с наличием края тест-объекта внутри. По ней определялась функция отклика детектора (LSF) и далее после выполнения преобразования Фурье получали MTF функцию. Дискретный характер размещения приемных фоточувствительных элементов детектора приводит к искажению результата и зависимости измеряемой MTF от взаимного положения детектора и тест-объекта. Если острый край тест-объекта проходит по середине элементов строк или столбцов детектора, то отклик LSF наиболее широкий и MTF на высоких частотах минимальна. Если граница тест-объекта проходит между элементами детектора, то отклик LSF узкий и MTF на высоких частотах максимальна. Усредненное значение MTF по всем возможным размещениям детектора и тест-объекта дает наиболее достоверную характеристику разрешения детектора [10]. Для получения такого усредненного значения тест-объект располагают под углом ( $3^\circ$ – $5^\circ$ ) его края относительно строк/столбцов матрицы приемных элементов детектора. При этом определяют теоретическую LSF по ансамблю элементов, расположенных в различных столбцах/строках элементов детектора и собранных в единый одномерный массив. Благодаря этому определяют величину откликов субэлементного сдвига края тест-объекта.

Методом наименьших квадратов определялся угол поворота края относительно рядов элементов детектора. Далее выполняется процедура суммирования амплитуд двумерной матрицы изображения вдоль линии края тест-объекта и преобразование в одномерный массив откликов. Т.к. поворот был выполнен на небольшой угол, оказалось возможным разбить полученный одномерный массив на более мелкие ячейки, составляющие доли элемента матрицы детектора (субэлементы). Каждый субэлемент нормируется на количество отсчетов двумерного массива, попавших в данный субэлемент. В результате этой процедуры получается профиль ESF, перпендикулярный линии края тест-объекта с размерами субэлементов примерно на порядок меньшими размерами элементов. К полученному профилю ESF применялось пятиточечное дифференцирование, в результате которого получается функция распределения линии LSF.

В случае неоднородного радиационного поля при расчете MTF проводится двумерная коррекция изображения тест-объекта посредством применения двумерного полинома  $S(x_i, y_i)$ . Корректированные данные определяются по формуле

$$I_{кор}(x_i, y_i) = I(x_i, y_i) / S(x_i, y_i) \cdot S_{cp}, \quad (5)$$

где  $S_{cp}$  – усредненное значение яркости пикселя линеаризованных данных в области интереса однородно экспонированного изображения.

На третьем этапе производится вычисление DQE по результатам расчетов, полученным на предыдущих этапах. Для оценки квантовой эффективности регистрации маммографов СИМА и

МАДИС были сформированы наборы снимков, количество которых является целесообразным для данного исследования и позволяет провести расчеты с достаточной точностью:

– 11 снимков «чистого поля» в диапазоне от 0 до  $D_1 \cdot 4$  для определения функции преобразования. При этом минимальный уровень экспозиционной дозы не превышал  $D_1/5$ . Экспозиционные дозы снимков распределены равномерно внутри диапазона  $0-D_1 \cdot 4$ ;

– по 4 снимка «чистого поля» на каждом уровне экспозиционной дозы ( $D_1, D_2, D_3$ ) для определения спектра мощности шума;

– 2 снимка тест-объекта (в вертикальном и горизонтальном положении) на каждом уровне экспозиционной дозы ( $D_1, D_2, D_3$ ) для определения MTF.

Функция преобразования маммографов МАДИС и СИМА линейна, поэтому необходимость определения полной функции преобразования не возникала. Для проверки линейности достаточно выбранного количества снимков. Исходные данные для определения спектра мощности шума были взяты из участка в центре облучаемой области размером  $1024 \times 1024$  пикселей.

На рис. 5 и 6 представлены результаты оценки MTF и DQE в зависимости от пространственного разрешения (пар линий/мм) для маммографов СИМА и МАДИС при нормальном уровне экспозиционной дозы (200 мкР).

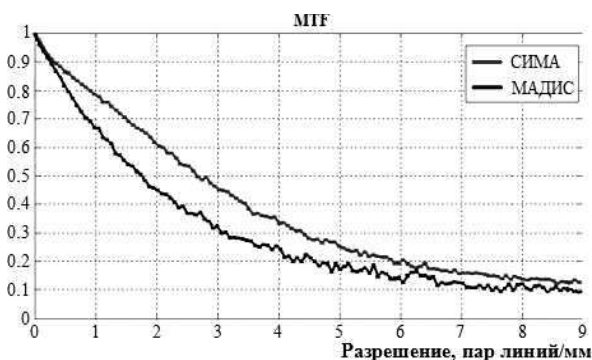


Рис. 5 – Полученные графики функции передачи модуляции для маммографов СИМА и МАДИС

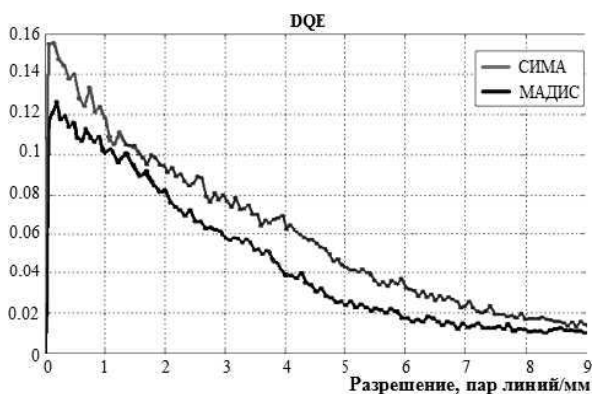


Рис. 6 – Полученные графики квантовой эффективности регистрации для маммографов СИМА и МАДИС

## Выводы

В данной статье описана уточненная методика оценки квантовой эффективности регистрации и функции передачи модуляции для детекторов рентгеновского излучения, построенных по схеме РЛЭ – оптика – ФПЗС-матрица. Такие детекторы применяют при производстве маммографических комплексов СИМА и МАДИС.

Приведены полученные для серийных образцов маммографических комплексов СИМА и МАДИС графики зависимости DQE и MTF детекторов рентгеновского излучения от пространственных частот.

Полученные характеристики качества детекторов излучения маммографических комплексов СИМА и МАДИС по эффективности удовлетворяют требованиям нормативных документов к детекторам рентгеновского излучения.

## Список литературы:

1. Основы рентгенодиагностической техники: Учебное пособие / ред. **Блинов, Н. Н.** – М.: Медицина. – 2002. – 392 с.
2. EN 62220-1-2:2007 Medical electrical equipment. Characteristics of digital X-ray imaging devices. Determination of the detective quantum efficiency. Detectors used in mammography.
3. ДСТУ EN 62220-1-2:2015 Вироби медичні електричні. Характеристики цифрових рентгенівських пристроїв відтворення зображення. Частина 1-2. Визначення квантової ефективності реєстрування. Детектори для мамографії.
4. **Борисов, А. А.** О двух технологиях построения цифровых приемников рентгеновских изображений / **А. А. Борисов, Ю. А. Вейн, А. И. Мазуров** [и др.] // *Медицинская техника.* – 2006. – № 5. – С. 7-10.
5. **Мазуров, А. И.** Параметры цифровых приемников и качество изображения // *Медицинская техника.* – 2009. – № 5. – С. 4-6.
6. **Вейн, Ю. А.** Сравнительный анализ технологий построения цифровых детекторов рентгеновских изображений / **Ю. А. Вейн, А. И. Мазуров** // *Медицинская техника.* – 2008. – № 5 (251). – С. 36-40.
7. **Воробьев, А. П.** Матричный арсенид-галлиевый детектор для рентгенографии / **А. П. Воробьев, С. Н. Головня, С. А. Горохов** [и др.] // *Медицинская техника.* – 2012. – № 5 (275). – С. 21-26.
8. **Блинов, Н. Н.** Микрофокусный способ получения фазоконтрастных рентгеновских изображений / **Н. Н. Блинов, А. Ю. Васильев, Н. С. Серова** [и др.] // *Медицинская техника.* – 2009. – № 4 (256). – С. 5-9.
9. **Кручинин, С. А.** Программное обеспечение для оценки квантовой эффективности регистрации цифровых приемников рентгеновского изображения / **С. А. Кручинин, М. И. Зеликман** // *Медицинская техника.* – 2014. – № 5. – С. 37-40.
10. **Гуржиев, А. С.** Экспериментальное сравнение трех методов измерения разрешающей способности цифровых радиографических систем / **А. С. Гуржиев, С. Н. Гуржиев., Е. М. Мирошников,** [и др.] // *Медицинская техника.* – 2011. – № 2. – С. 1-5.

**Bibliography: (transliterated)**

1. **Blinov, N. N.** Osnovy rentgenodiagnosticheskoy tehniki [Fundamentals of X-ray equipment]. Moscow, Medicina, 2005, 392 p.
2. EN 62220-1-2:2007 Medical electrical equipment. Characteristics of digital X-ray imaging devices. Determination of the detective quantum efficiency. Detectors used in mammography.
3. DSTU EN 62220-1-2:2015 Virobi medichni elektrichni. Harakteristiki cifrovih rentgeniv's'kih pristroiv' vidtvorennya zobrazhennja. Chastina 1-2. Vznachennja kvantovoї efektivnosti reestruvannja. Detektori dlja mamografii [Medical electrical equipment. Characteristics of digital X-ray imaging devices. Part 1-2. Definition recording quantum efficiency. Detectors for mammography].
4. **Borisov, A. A., Vejn, Ju. A., Mazurov, A. I.** O dvuh tehnologijah postroenija cifrovih priemnikov rentgenovskih izobrazhenij [About two technologies of construction of digital X-ray imaging detectors]. *Medical equipment*, 2006, 5, 7-10.
5. **Mazurov, A. I.** Parametry cifrovih priemnikov i kachestvo izobrazhenija [Parameters digital receivers and image quality]. *Medical equipment*, 2009, 5, 4-6.
6. **Vejn, Ju. A., Mazurov, A. I.** Sravnitel'nyj analiz tehnologij postroenija cifrovih detektorov rentgenovskih izobrazhenij [Comparative analysis of the technology of construction of digital X-ray imaging detectors]. *Medical equipment*, 2008, 5 (251), 36-40.
7. **Vorob'ev, A. P., Golovnja, S. N., Gorohov, S. A.** Matrichnyj arsenid-gallievij detektor dlja rentgenografii [Matrix gallium arsenide detector for X-ray]. *Medical equipment*, 2012, 5 (275), 21-26.
8. **Blinov, N. N., Vasil'ev, A. Ju., Serova, N. S.** Mikrofokusnyj sposob poluchenija fazokonstrastnyh rentgenovskih izobrazhenij [Microfocus X-ray phase-contrast method for producing images]. *Medical equipment*, 2009, 4 (256), 5-9.
9. **Kruchinin, S. A., Zelikman, M. I.** Programmnoe obespechenie dlja ocenki kvantovoj jeffektivnosti registracii cifrovih priemnikov rentgenovskogo izobrazhenija [Software for the evaluation of the quantum detection efficiency of digital X-ray image detectors]. *Medical equipment*, 2014, 5, 37-40.
10. **Gurzhev, A. S., Gurzhev, S. N., Miroshnikov, E. M.** Jeksperimental'noe sravnenie treh metodov izmerenija razreshajushhej sposobnosti cifrovih radiograficheskikh sistem. *Medical equipment*, 2011, 2, 1-5.

**Безгинова Ольга Николаевна** – инженер-программист ООО «ЭЛКОМЕД», г. Харьков, Украина; e-mail: elkomed@ukr.net

**Bezginova Olga Nikolayevna** – the engineer-programmer of “ELKOMED” Ltd, Kharkiv, Ukraine; e-mail: elkomed@ukr.net

**Литвиненко Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, директор фирмы «РАДМИР» ДП АО НИИРИ, г. Харьков, Украина; e-mail: radmir@niiri.kharkov.com

**Litvinenko Sergey Viktorovich** – Ph.D., director of the “RADMIR” Company, Kharkiv, Ukraine; e-mail: radmir@niiri.kharkov.com

**Романов Олег Иванович** – главный конструктор по направлению МТ фирмы "РАДМИР" ДП АО НИИРИ, Украина; e-mail: radmir@niiri.kharkov.com

**Romanov Oleg Ivanovich** – the chief designer of the direction of MT of the “RADMIR” Company, Kharkiv, Ukraine; e-mail: radmir@niiri.kharkov.com

**Хоменко Евгений Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор ООО «ЭЛКОМЕД», Украина; e-mail: elkomed@ukr.net

**Khomenko Evgeniy Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior researcher, director of “ELKOMED” Ltd, Kharkiv, Ukraine; e-mail: elkomed@ukr.net

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Безгинова, О. Н.** Оценка квантовой эффективности регистрации детекторов рентгеновского излучения цифровых маммографических комплексов СИМА и МАДИС / **О. Н. Безгинова, С. В. Литвиненко, О. И. Романов, Е. В. Хоменко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 23-28. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.04.

*Please cite this article as:*

**Bezginova, O., Litvinenko, S., Romanov, O., Khomenko, E.** Assessment of the quantum detection efficiency of X-ray detectors, digital mammography complexes MADIS and SIM. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 25 (1197), 23-28, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.04.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Безгінова, О. М.** Оцінка квантової ефективності реєстрації детекторів рентгенівського випромінювання цифрових маммографічних комплексів СИМА і МАДИС / **О. М. Безгінова, С. В. Литвиненко, О. І. Романов, Є. В. Хоменко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 23-28. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.04.

**АНОТАЦІЯ** У цій роботі описано уточнену методику оцінки квантової ефективності реєстрації та функції передачі модуляції для детекторів рентгенівського випромінювання цифрових маммографічних комплексів СИМА і МАДИС. Ці детектори побудовані за схемою: рентгено-люмінесцентний екран – об'єктив – фоточутлива ПЗС-матриця. Розглянуто фізико-технічні умови формування наборів вхідних даних програми оцінки параметрів маммографічних комплексів СИМА і МАДИС. Наведено отримані для детекторів випромінювання серійно виробляємих зразків маммографічних комплексів СИМА і МАДИС графіки залежності квантової ефективності реєстрації та функції передачі модуляції від просторових частот.

**Ключові слова:** цифровий маммографічний комплекс, детектор рентгенівського випромінювання, квантова ефективність реєстрації, функція передачі модуляції, лінеаризація, спектральна цільність шуму.

*Поступила (received) 25.05.2016*