

## Методика рутинного контроля цифровых рентгенодиагностических аппаратов

### Аннотация

Представлена методика рутинного контроля цифровых рентгенодиагностических аппаратов, позволяющая проводить оценку работоспособности рентгеновской части и цифрового приемника силами медицинского персонала до начала приема пациентов. Заключение об исправности (неисправности) того или иного узла делается по результатам косвенной оценки величины анодного напряжения, количества электричества, а также коэффициента передачи и уровня внутренних шумов рентгеновского приемника. Время, необходимое на проведение тестирования, как правило, не превышает 5 мин.

### Введение

Рутинный контроль, наряду с инсталляционными и периодическими испытаниями, является важным звеном в процедуре обеспечения контроля качества рентгеновского оборудования. Основная задача рутинных испытаний заключается в том, чтобы в процессе простой проверки при использовании максимально простого тестового оборудования в кратчайшие сроки получить однозначный ответ о техническом состоянии аппарата до начала приема пациентов. Данные испытания, как правило, осуществляются силами медицинского персонала (рентгенолаборантом) с определенной периодичностью (идеальный вариант – ежедневно). В случае, если по результатам контроля делается вывод о неработоспособности какого-либо узла аппарата, все исследования на этом аппарате прекращаются до тех пор, пока не будут проведены сервисные работы по устранению выявленных неисправностей.

Поскольку при проведении испытаний цифровых рентгенодиагностических аппаратов могут быть применены экспериментально-расчетные методы [1], [2], процедура рутинного контроля для данного типа рентгеновского оборудования может быть максимально автоматизирована.

В настоящее время в ЛПУ Российской Федерации рутинный контроль практически не проводится. Отсутствуют простые аппаратно-программные средства, которые позволили бы нетехническому специалисту (рентгенолаборанту) осуществлять данные проверки. Предусмотренные в большинстве современных серийно выпускаемых аппаратов системы автотестирования отдельных узлов, к сожалению, не гарантируют стабильность выходных параметров устройства в целом (например, не отслеживается изменение интенсивности рентгеновского потока из-за износа рентгеновской трубки).

Таким образом, разработка и апробация методики рутинного контроля цифровых рентгенодиагностических аппаратов представляют актуальность.

### Материалы и методы

Предложенный метод рутинного контроля предполагает оценку работоспособности двух основных узлов цифрового рентгеновского аппарата, а именно рентгеновского питающего устройства с излучателем (далее – рентгеновская часть) и цифрового приемника рентгеновского изображения (далее – приемник). Для рентгеновской части необходимо контролировать значения анодного напряжения и количества электричества, для приемника – коэффициент передачи и уровень внутренних шумов. Данные параметры оцениваются косвенно посредством анализа цифрового изображения тест-объекта, зарегистрированного при часто используемых параметрах съемки (например, при анодном напряжении 70 кВ, количестве электричества 100 мАс, фокусном расстоянии порядка 1 м для аппаратов общего назначения и 28 кВ и 20 мАс для маммографов).

В качестве тест-объекта предлагается использовать конструкцию, представляющую собой пластину (толщиной 1 мм) из нержавеющей стали (для аппаратов общего назначения) или алюминия (для маммографов) с идеально отшлифованным прямоугольным краем, зафиксированную на алюминиевой

подложке толщиной 20 мм (для аппаратов общего назначения) или 2 мм (для маммографов) таким образом, чтобы угол между линией вдоль отшлифованного края пластины и осевой линией подложки составлял порядка  $2^\circ$  (рис. 1).

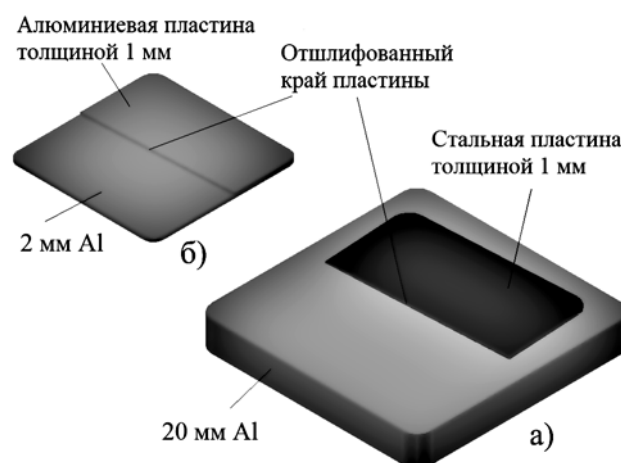


Рис. 1. Тест-объекты для проведения рутинного контроля аппаратов общего назначения (а) и маммографов (б)

Рассмотрим модель тракта приема и преобразования рентгеновского изображения, учитывающую зависимость переходной характеристики от пространственных частот и наличие в системе внутренних шумов. Подробное описание данной модели представлено в [1]. Для нее частотно зависимый уровень сигнала и спектральная плотность мощности шума на выходе тракта преобразования имеют соответственно следующий вид:

$$S_{\text{вых}}(u, v) = q \cdot \xi \cdot G \cdot MTF(u, v); \quad (1)$$

$$N_{\text{вых}}^2(u, v) = q \cdot \xi \cdot G^2 \cdot MTF^2(u, v) + N_{\text{сис}}^2(u, v), \quad (2)$$

где  $q$  – плотность потока рентгеновских квантов на входе приемника;  $\xi$  – коэффициент поглощения квантов в приемнике;  $G$  – коэффициент передачи;  $MTF(u, v)$  – функция передачи модуляции;  $N_{\text{сис}}^2(u, v)$  – спектральная плотность мощности внутренних шумов системы;  $u$  и  $v$  – пространственные частоты.

Исходя из выражения (1), средние значения яркостей, рассчитанные для двух различных подобластей зарегистрированного изображения тест-объекта (отличающихся по ослаблению), могут быть представлены следующим образом:

$$S_{\text{AL}} = q_{\text{AL}} \cdot \xi \cdot G; \quad (3)$$

$$S_{\text{S}} = q_{\text{S}} \cdot \xi \cdot G. \quad (4)$$

Нижние индексы переменных в выражениях (3) и (4) определяют элементы конструкции тест-объекта, за которыми оцениваются величины  $S$  и  $q$ : за подложкой или за областью тест-объекта, включающей в себя и подложку, и пластину с отшлифованным краем.

Принимаем, что коэффициент передачи  $G$  не зависит от плотности входного потока квантов  $q$ , т. е. зависимость  $S$  от  $q$  является линейной (данное условие выполняется для большинства приемников). Для ряда систем (например, для приемников на базе фотостимулируемых люминофоров) характерна логарифмическая зависимость  $S$  от  $q$  [1]. В этом случае для корректного применения предложенного алгоритма предварительно необходимо провести процедуру линеаризации, например с использованием метода, описанного в [3]. Как показано в [4], при неизменных фокусном расстоянии, материале анода и составе поглотителя на пути рентгеновского пучка  $q$  линейно зависит от установленных на рентгеновском аппарате количестве электричества (мАс) и нелинейно – от величины анодного напряжения ( $U_a$ ). Таким образом, отношение  $S_{AL} / S_{\Sigma}$  при прочих неизменных условиях представляет собой лишь функцию  $U_a$ .

Выражение (2) в области нулевых пространственных частот приобретает следующий вид:  $N_{\text{вых}}^2(0) = q \cdot \xi \cdot G^2 + N_{\text{сис}}^2(0)$ . Первое слагаемое правой части этого выражения представляет собой максимально возможное значение спектральной плотности квантового шума на выходе приемника (с ростом пространственных частот спектральные составляющие квантового шума будут только уменьшаться за счет «резания» их  $MTF$ ). При работе приемника в середине его динамического диапазона (в этом случае величина квантового шума, как правило, значительно превосходит уровень внутренних шумов) можно считать, что  $N_{\text{вых}}^2(0) = q \cdot \xi \cdot G^2$ . Из представленных выражений следует

$$G = N_{\text{вых}}^2(0) / S_{AL} \quad (5)$$

Здесь  $N_{\text{вых}}^2(0)_{AL}$  и  $S_{AL}$  оцениваются в подобласти, выбранной в пределах изображения подложки.

Поскольку при расчете  $N_{\text{вых}}^2(u, v)$  с использованием алгоритма, представленного в [5], полученное значение спектра на нулевой пространственной частоте близко к нулю, значение  $N_{\text{вых}}^2(0)$  получают с использованием метода экстраполяции.

Отношение  $S_{AL}^2 / N_{\text{вых}}^2(0)_{AL} = q_{AL} \cdot \xi$  при неизменном значении  $\xi$  определяется только величиной  $q_{AL}$ . Таким образом, отношение  $S_{AL}^2 / N_{\text{вых}}^2(0)_{AL}$ , нормированное на величину количества электричества, при прочих неизменных параметрах, будет зависеть лишь от  $U_a$ .

Из выражения (2) можно получить оценку  $N_{\text{сис}}^2(u, v)$ , приняв во внимание условие работы приемника в середине динамического диапазона:  $N_{\text{сис}}^2(u, v) = N_{\text{вых}}^2(u, v) - N_{\text{вых}}^2(0) \cdot MTF^2(u, v)$ . Осуществляя интегрирование правой части данной зависимости во всем диапазоне пространственных частот (в нашем случае при работе с дискретными сигналами интегрирование заменяется суммированием), получим оценку дисперсии внутренних шумов системы  $\sigma_{\text{сис}}^2$ . В рамках данного алгоритма не ставится задача получения абсолютного значения  $\sigma_{\text{сис}}$ ; здесь важно лишь отслеживать смещение среднеквадратичной оценки внутренних шумов системы относительно некоторого базового (эталонного) значения. В связи с этим ограничимся оценкой уровня внутреннего шума, полученной в результате расчета вдоль одной пространственной частоты (например,  $u$ ) по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{сис}} = \sqrt{\sum_{i=0}^n [N_{\text{вых } i \text{ AL}}^2 - N_{\text{вых } 0 \text{ AL}}^2 \cdot MTF_i^2(u)]}, \quad (6)$$

где  $n$  – количество отсчетов (без учета отсчета на нулевой пространственной частоте).

В данном выражении отсчеты одномерного спектра мощности шума  $N_{\text{вых } i \text{ AL}}^2$  получаются из двумерного спектра путем усреднения значений двумерного спектра, соответствующих одним и тем же значениям пространственных частот  $u$  и  $v$ .

Необходимым условием работоспособности представленного алгоритма является наличие калибровочных данных, полученных при использовании тестируемого оборудования. На предварительно настроенном аппарате регистрируют набор цифровых изображений тест-объекта (установленного в центральной части плоскости приемника) при различных значениях  $U_a$  и неизменном значении количества электричества (на-

пример, 100 мАс для аппаратов общего назначения и 20 мАс для маммографов). В качестве опорного значения  $U_a$  для аппаратов общего назначения задают 70 кВ, для маммографов – 28 кВ. Значения устанавливаемых  $U_a$  выбирают в диапазоне  $\pm 15\%$  от опорного с шагом 2 кВ для аппаратов общего назначения и 1 кВ для маммографов (всего около 10 изображений). С использованием зарегистрированных описанным образом изображений тест-объекта оценивают следующие параметры и характеристики: отношение  $S_{AL} / S_{\Sigma}$  (как функцию  $U_a$ );  $N_{\text{вых}}^2(u, v)_{AL}$ ; нормированное на величину количества электричества отношение  $S_{AL}^2 / N_{\text{вых}}^2(0)_{AL}$  (как функцию  $U_a$ ). Для изображения, полученного при опорном значении  $U_a$ , дополнительно оценивается величина  $G$  (как отношение  $N_{\text{вых}}^2(0)_{AL} / S_{AL}$ ),  $MTF$  вдоль пространственной частоты  $u$  или  $v$  (определяется положением тест-объекта в плоскости приемника) и  $\sigma_{\text{сис}}$  (оценка уровня внутреннего шума вдоль той же пространственной частоты, что и  $MTF$ ). Полученные калибровочные данные сохраняются в памяти рабочей станции аппарата и в дальнейшем при проведении рутинных испытаний используются в качестве эталонных.

## Результаты

Процедура рутинного контроля цифрового рентгеновского оборудования при использовании описанного алгоритма сводится к следующему. Рентгенолаборант осуществляет экспозицию тест-объекта, воспроизводя процедуру калибровки в части расположения тест-объекта, обеспечения геометрии съемки, а также качества и интенсивности рентгеновского пучка (задаются те же, что и при калибровке, значения опорного анодного напряжения и количества электричества).

На основании зарегистрированного изображения рассчитывается отношение  $(S_{AL} / S_{\Sigma})_{\text{расч}}$ , и при использовании полученной при калибровке зависимости  $S_{AL} / S_{\Sigma}$  от анодного напряжения оценивается  $U_a$ . На рис. 2 представлена калибровочная зависимость для аппарата общего назначения с CR-системой «Kodak DirectView Classic» (для маммографического аппарата вид зависимости является аналогичным).

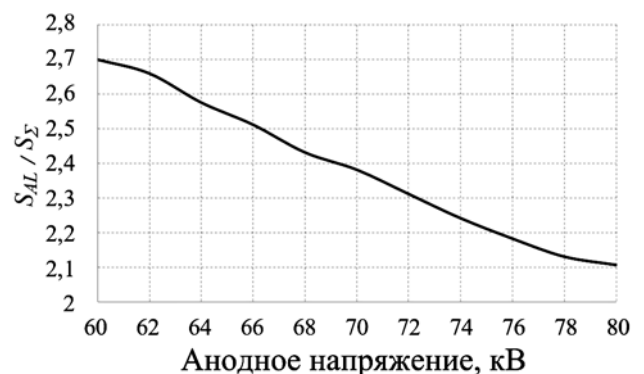


Рис. 2. Зависимость отношения  $S_{AL} / S_{\Sigma}$  от анодного напряжения, полученная для аппарата общего назначения с CR-системой «Kodak DirectView Classic»

Погрешность оценки  $U_a$  с использованием предложенного метода составляет порядка 5%. Если оценка анодного напряжения отличается от опорного значения не более чем на допустимый (предварительно заданный) уровень отклонения (например 10%), то переходят к оценке количества электричества. В противном случае принимается решение о неисправности рентгеновской части, после чего переходят к оценке параметров приемника.

Для оценки количества электричества используют рассчитанное по зарегистрированному изображению отношение  $(S_{AL}^2 / N_{\text{вых}}^2(0)_{AL})_{\text{расч}}$ ; полученное на предыдущем шаге алгоритма значение  $U_a$ , а также зависимость нормированного на величину количества электричества отношения  $(S_{AL}^2 / N_{\text{вых}}^2(0)_{AL})_{\text{норм}}$  от  $U_a$ . На рис. 3 представлена зависимость отношения  $S_{AL}^2 / N_{\text{вых}}^2(0)_{AL}$  от количества электричества при неизменном значении анодного напряжения (28 кВ), получен-

ная для маммографа «Amulet» компании «FUJIFILM Medical Systems» (для аппаратов общего назначения вид зависимости аналогичен).

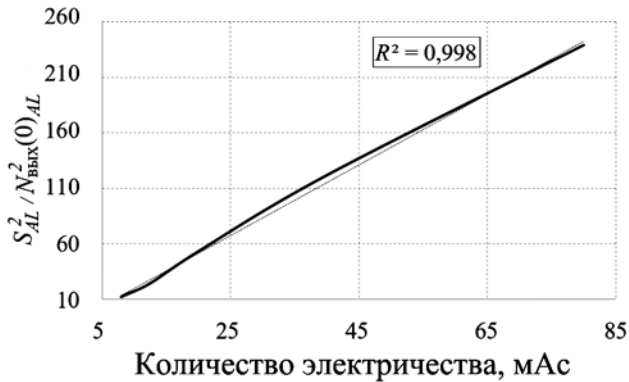


Рис. 3. Зависимость отношения  $S_{AL}^2 / N_{ВЫХ}^2(0)_{AL}$  от количества электричества при неизменном значении анодного напряжения (28 кВ), полученная для маммографа «Amulet» компании «FUJIFILM Medical Systems»

Как уже было показано аналитически, эта зависимость носит линейный характер (квадрат коэффициента корреляции между экспериментальными данными и линейной аналитической функцией превышает 0,99). Данный факт упрощает процедуру оценки количества электричества и исключает необходимость регистрации набора изображений при различных значениях количества электричества во время калибровки. Значение количества электричества оценивается как результат деления отношения  $(S_{AL}^2 / N_{ВЫХ}^2(0)_{AL})_{РАССЧ}$  и полученного с использованием калибровочной кривой значения  $(S_{AL}^2 / N_{ВЫХ}^2(0)_{AL})_{НОРМ}$ . Погрешность оценки количества электричества с использованием данного метода составляет порядка 15 %. Далее рассчитанное значение количества электричества сравнивается с опорным значением с учетом заданного уровня допустимого отклонения (например 25 %). По результатам сравнения делается вывод о работоспособности (неработоспособности) рентгеновской части.

Коэффициент передачи приемника  $G$  оценивается напрямую как частное от деления  $N_{ВЫХ}^2(0)_{AL}$  на  $S_{AL}$ . Погрешность определения  $G$  в этом случае не превышает 10 %. После сравнения полученного значения с эталонным (с учетом допустимого отклонения, например 20 %) принимается решение об исправности (неисправности) приемника. В случае исправности приемника переходят к оценке уровня внутренних шумов.

Уровень внутренних шумов оценивается в соответствии с выражением (6), при использовании рассчитанной на выходе приемника характеристики  $N_{ВЫХ}^2(0)_{AL}$  и эталонной  $MTF$ . Погрешность определения  $\sigma_{сис}$  в данном случае не превышает 10 %. В процессе исследований было экспериментально установлено наличие зависимости  $\sigma_{сис}$  от  $q$  (т. е. при расчете внутреннего шума в соответствии с предложенной моделью необходимо делать поправку на влияние квантовых шумов). Изменение  $q$  на 30 % приводит примерно к 10%-ному изменению  $\sigma_{сис}$ . Поэтому при задании допустимого отклонения оценки  $\sigma_{сис}$  от эталонной необходимо учитывать данный факт. При заданном пороговом отклонении, равном, например, 30 %, по результатам оценки  $\sigma_{сис}$  и сравнения ее с эталонной принимается решение о работоспособности (неработоспособности) приемника.

В случае, если программное обеспечение, реализующее предложенный метод, интегрировано с системой управления аппаратом, процесс выдачи результата полностью автоматизирован: через короткий промежуток времени на экране монитора появляются результаты рутинного контроля (состояния рентгеновской части и приемника характеризуются соответствующими цветами: зеленый – говорит о работоспособности, красный – о неисправности). Дополнительно о неисправном состоянии оборудования сообщает звуковой сигнал. В случае, если интеграция программы и системы управления отсутствует, зарегистрированное по результатам экспози-

ции изображение обрабатывается на одном из рабочих мест, на котором установлена программа (рис. 4). В этом случае результаты рутинной проверки (регламента) могут также быть сохранены в соответствующей базе данных для последующего анализа (статистической обработки).

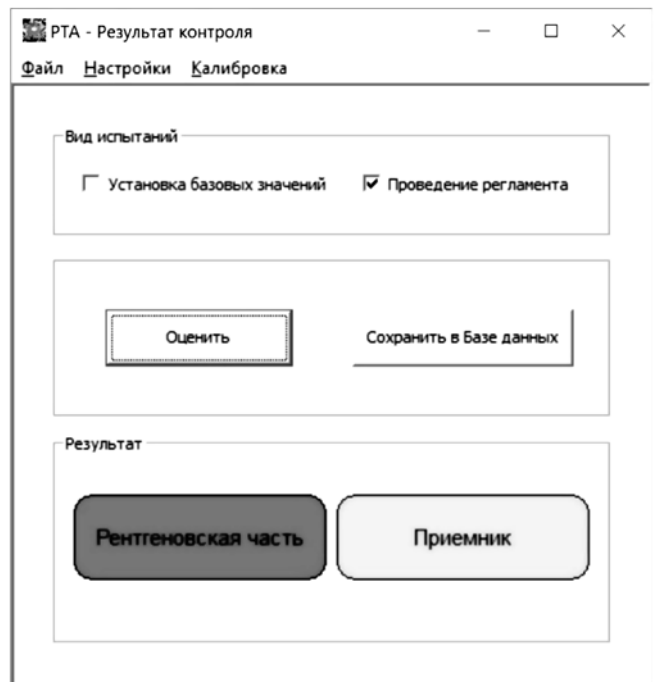


Рис. 4. Окно программы с сообщением о неисправной рентгеновской части аппарата

## Заключение

Представленная методика рутинного контроля цифровых рентгенодиагностических аппаратов подтвердила свою эффективность в процессе испытаний в условиях клиники. Время, необходимое на проведение тестирования при использовании разработанных аппаратно-программных средств, как правило, не превышает 5 мин.

### Список литературы:

1. Зеликман М.И. Цифровые системы в медицинской рентгенодиагностике. – М.: ОАО «Издательство «Медицина», 2007. 208 с.
2. Мазуров А.И. Оценка параметров приемника по равномерно засвеченному рентгеновскими лучами рабочему полю // Медицинская техника. 2007. № 5. С. 13-15.
3. Зеликман М.И., Кабанов С.П., Кручинин С.А., Лобов Д.П. Контроль квантовой эффективности цифровых рентгеновских приемников на базе фотостимулируемых люминофоров // Медицинская техника. 2008. № 5. С. 25-29.
4. Основы рентгенодиагностической техники / Под ред. Н.Н. Блинова. Уч. пособие. – М.: Медицина, 2002. 392 с.
5. ГОСТ ИЕС 62220-1–2011 Изделия медицинские электрические. Характеристики цифровых приемников рентгеновского изображения. Часть 1. Определение квантовой эффективности регистрации.

Сергей Александрович Кручинин,  
канд. техн. наук, руководитель,  
испытательная лаборатория,  
ООО «КБ РентгенТест»,  
г. Москва,  
e-mail: skruchinin@rentgentest.ru