

К ВОПРОСУ О КОНТРОЛЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В работе рассматривается система неинвазивного контроля параметров рентгеновских излучателей. В качестве измерительного преобразователя предложено использовать дискретный линейный детектор на основе арсенида галлия. Показано, что по характеру затухания излучения в веществе детектора можно находить значения эффективной энергии пучка, граничной энергии в спектре излучения и восстанавливать спектральный состав излучения по входу детектора.

Ключевые слова: тормозное излучение, эффективная энергия, абсорбционная кривая.

Спектральное распределение квантов по энергии задает так называемое качество тормозного рентгеновского излучения, определяющее его проникающую способность и влияющее на радиационный контраст визуализируемых тканей. При этом характер спектрального распределения обуславливается величиной и формой приложенного анодного напряжения и абсорбционными свойствами фильтрующих сред. Необходимым условием получения максимального количества информации во время рентгенологических исследований при минимальной дозе облучения пациентов является контроль выходных параметров рентгеновских излучателей при их эксплуатации.

Наиболее корректным методом оценки параметров рентгеновского пучка является спектрометрический метод восстановления формы спектрального распределения квантов по энергии. Данный метод не чувствителен к величине собственной суммарной фильтрации излучения и позволяет получать наиболее полную информацию о пучке излучения. Однако этот метод применим только в лабораторных условиях [1].

Целью работы являлась практическая реализация рентгеновской спектральной информации-измерительной системы, экспериментальное исследование ее характеристик и разработка методов обработки экспериментальных данных, обеспечивающих в совокупности возможность оценки параметров рентгеновского пучка.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать методику формирования абсорбционной кривой; выработать методы определения эффективной и граничной энергии в

спектре тормозного излучения; разработать методику восстановления спектров пропускания по кривой абсорбции.

В работе [2] предложено восстанавливать абсорбционную кривую по сигналам с линейной матрицы полупроводниковых микродетекторов, работающих в режиме счета фотонов. Благодаря размещению линейки вдоль рентгеновского пучка изменение качества излучения, воздействующего на каждый микродетектор, осуществляется путем последовательной фильтрации тормозного излучения в самой линейке детекторов (рис. 1).

В качестве детектора мы использовали позиционно чувствительную линейку на основе арсенида галлия, работающую в режиме накопления сигнала на электрической емкости. Детектор был интегрирован в состав экспериментальной установки, представленной на рисунке 2.

Основными элементами экспериментальной установки являются: частотное питающее устройство; излучатель; коллиматор; полупроводниковый детектор с комплектом периферии. Качество излучения на входе детектора задавалось эквивалентной фильтрацией 0,5 мм Al рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом, дополнительным алюминиевым фильтром толщиной 2 мм на выходе излучателя и

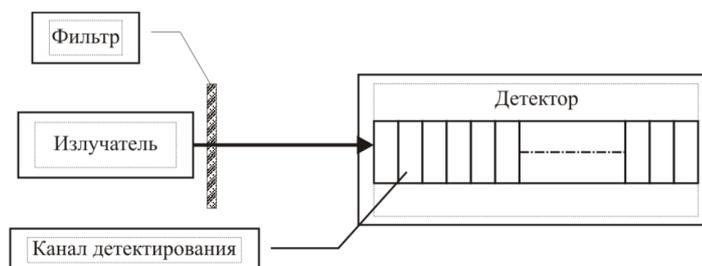


Рисунок 1. Схема формирования абсорбционной кривой [2]

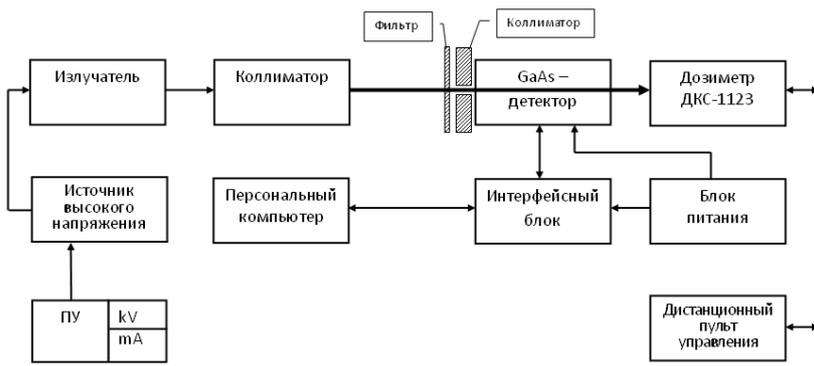


Рисунок 2. Структурная схема экспериментальной установки

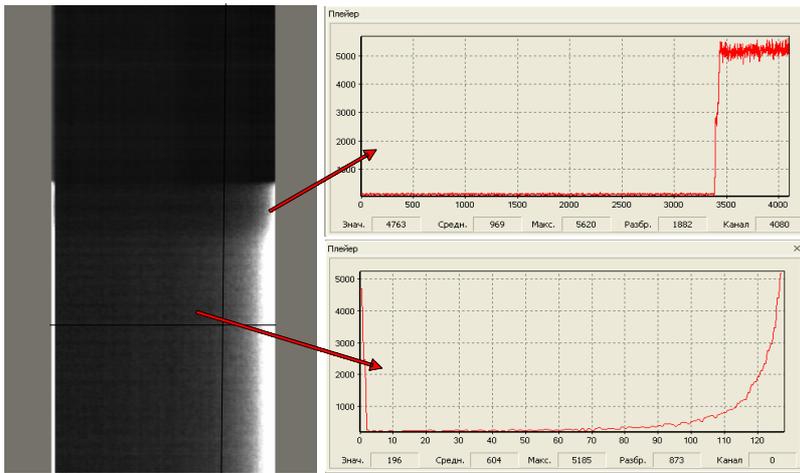


Рисунок 3. Фрагмент зарегистрированного изображения (слева) и распределения яркостного сигнала по вертикальному (временной ход интенсивности пучка) и горизонтальному (абсорбционная кривая) сечениям (справа). Построение выполнено в программе XRaуPrepare v0.4

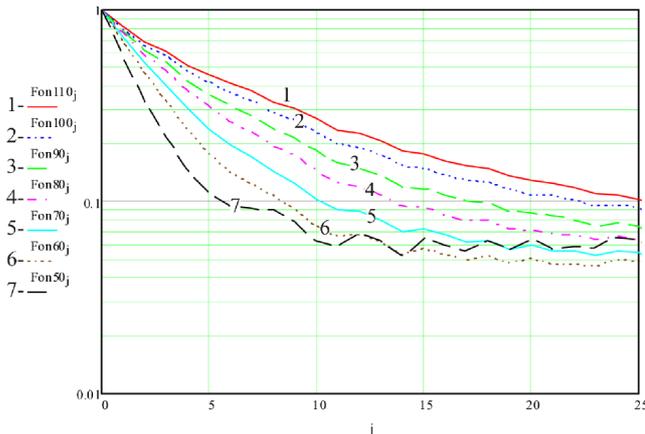


Рисунок 4. Семейство абсорбционных кривых, соответствующих напряжениям на аноде рентгеновской трубки 50, 60, 70, 80, 90, 100 и 110 кВ. По оси абсцисс отложен номер канала детектирования, по оси ординат – десятичный логарифм приведенного к максимуму значения яркостного сигнала

коллиматором с эквивалентной фильтрацией 1 мм Al. Эквивалентная фильтрация воздуха (фокусное расстояние 1300 мм) и входного окна детектора (14 мкм, Al) не учитывались.

Экспериментальное исследование выполнялось в рентгеновской лаборатории, оборудованной современным рентгенодиагностическим комплексом. Контроль рентгеновского пучка во время измерений осуществлялся дозиметром ДКС-АТ 1123 по мощности дозы на выходе детектора.

Для выявления влияния дополнительной фильтрации на кривую абсорбции последовательно регистрировались рентгеновские изображения в прямом пучке и за дополнительными фильтрами, при напряжениях на трубке от 50 до 110 кВ с шагом 10 кВ. В результате выполненных измерений было получено около 1000 рентгеновских снимков.

Фрагмент зарегистрированного изображения представлен на рисунке 3. По полученному изображению можно

оценить временной ход интенсивности пучка и характер затухания излучения по глубине линейки детекторов.

Построение абсорбционной кривой по экспериментальным данным выполнялось в среде MathCAD. Каждая точка кривой рассчитывалась как минимум по пятистам отсчетам. Статистический разброс экспериментальных данных не превышал 4%. На рисунке 4 отображено семейство абсорбционных кривых, полученных в диапазоне анодных напряжений.

На абсорбционной кривой можно выделить линейный участок, соответствующий малым изменениям эффективного массового коэффициента ослабления пучка. Для линейного участка рассчитывалась скорость затухания излучения. Характер

изменения скорости затухания от анодного напряжения демонстрируется рисунком 5.

Нетрудно видеть, что при увеличении анодного напряжения скорость затухания снижается, что обусловлено увеличением проникающей способности излучения. От скорости затухания легко перейти к эффективной энергии пучка, учитывая, что скорость затухания, определенная как угловой коэффициент касательной к кривой абсорбции, представляет собой эффективный массовый коэффициент ослабления [3]. Переход к эффективной энергии пучка (рисунок 6) показал, что расчетные значения располагаются вблизи прямой, заданной уравнением:

$$E_{эфф} = 0,3U + 28,9 \quad (1),$$

где U – анодное напряжение, кВ.

По экспериментально найденным значениям эффективной энергии смешанного рентгеновского пучка с помощью уравнения (1) легко перейти к граничной энергии E_{max} в спектре излучения, учитывая, что $E_{max} = eU$, где e – заряд электрона.

Для оценки влияния суммарной фильтрации на результаты измерений строились абсорбционные кривые, соответствующие различной толщине дополнительных фильтров из алюминия. Результаты измерения (рисунок 7) показали, что изменения толщины дополнительного фильтра в 10 раз приводит к изменению эффективной энергии пучка на 1,5% при 110 кВ и на 5% при 50 кВ.

Таким образом, можно говорить об относительно слабом влиянии величины суммарной фильтрации на результаты измерения эф-

фективной энергии в диапазоне анодных напряжений.

Последнее можно объяснить значительным различием эффективных атомных номеров фильтра и детектора. На рисунке 8 показано влияние абсорбционных свойств фильтра и детектора на спектральное распределение излу-

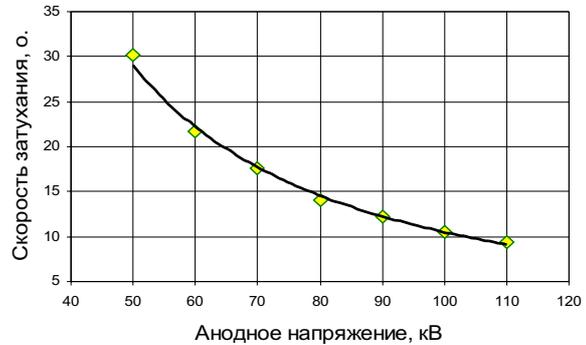


Рисунок 5. Изменение скорости затухания рентгеновского пучка в пределах первых пяти каналов детектирования в зависимости от приложенного анодного напряжения

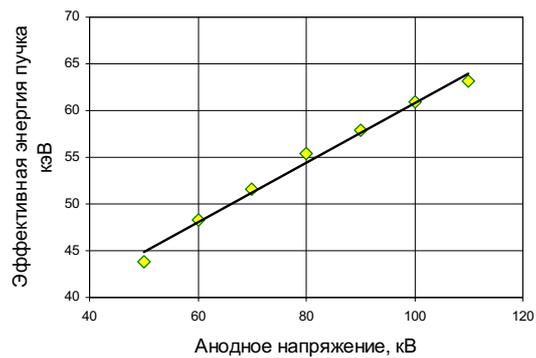


Рисунок 6. Зависимость эффективной энергии пучка от приложенного анодного напряжения

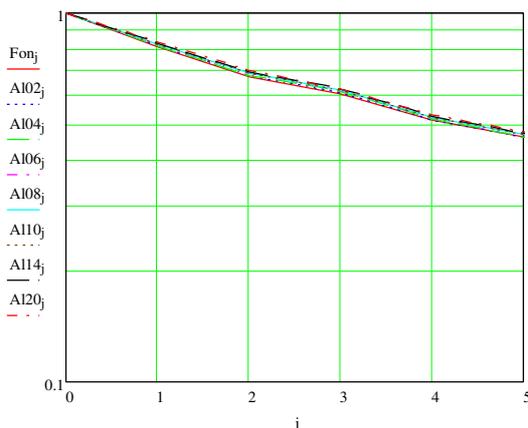


Рисунок 7. Семейство абсорбционных кривых, соответствующих напряжениям на аноде рентгеновской трубки 110 (слева) и 50 кВ (справа) при величине дополнительной фильтрации 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,4 и 2,0 мм алюминия (собственная фильтрация 3,5 мм алюминия). По оси абсцисс отложен номер канала детектирования, по оси ординат – десятичный логарифм приведенного к максимуму значения яркостного сигнала

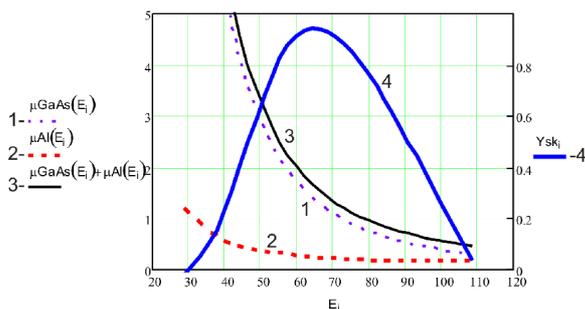


Рисунок 8. Сопоставление абсорбционных свойств фильтра и детектора (1-GaAs, 2-Al, 3-GaAs+Al). По оси абсцисс отложена энергия квантов (кэВ), по оси ординат слева – массовый коэффициент ослабления (см²/г); справа (4) – приведенное к максимуму спектральное распределение по числу квантов, соответствующее анодному напряжению 110 кВ, при суммарной фильтрации 3,5 мм алюминия и 1 мм арсенида галлия (расчет)

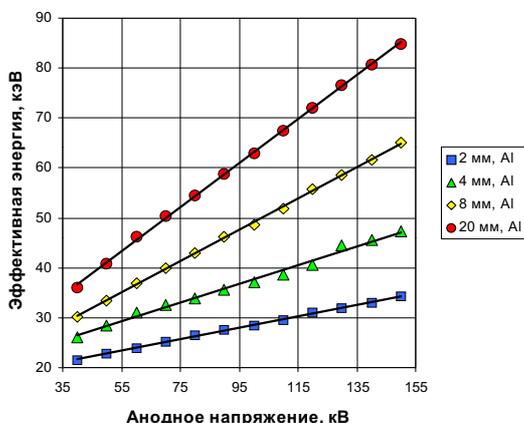


Рисунок 9. Характер изменения энергии пучка при увеличении анодного напряжения для спектров пропускания, рассчитанных при различных анодных напряжениях в интервале от 50 до 110 кВ с шагом 10 кВ (суммарная фильтрация 3,5 мм Al)

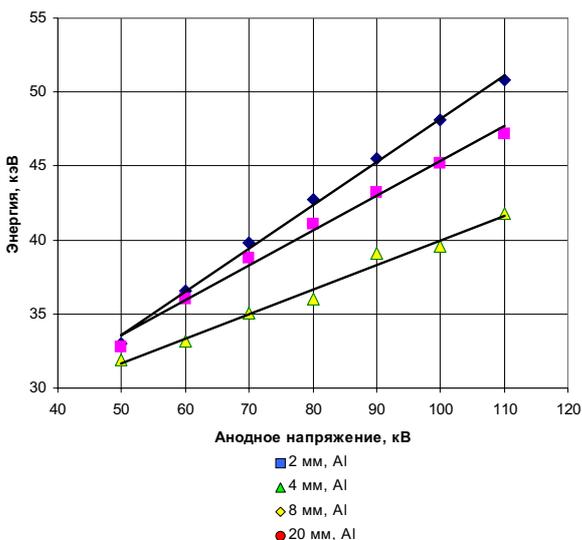


Рисунок 10. Зависимость эффективной энергии смешанного рентгеновского пучка от приложенного анодного напряжения при различной фильтрации [5]

чения на выходе первых пяти каналов детектирования.

Видно, что для квантов, формирующих спектр пропускания, массовый коэффициент ослабления алюминия практически не меняется, а следовательно, форма спектрального распределения будет определяться характером изменения массового коэффициента ослабления арсенида галлия в диапазоне энергии.

Линейный характер изменения эффективной энергии от анодного напряжения позволяет предположить, что в нашем случае она должна соответствовать какому-либо статистическому параметру, характеризующему форму спектрального распределения.

Согласно методике, предложенной в работе [4], рассчитывались спектральные распределения на выходе первых пяти каналов детектирования, соответствующие суммарной фильтрации 3,5 мм алюминия в диапазоне анодных напряжений. Для полученных распределений находились: наиболее вероятное $E_{вер.}$, среднее $E_{ср.}$ и медианное $E_{мед.}$ значения энергии пучка. Полученные результаты отражает рисунок 9.

Можно видеть, что введенные характеристики пучка линейно меняются с изменением анодного напряжения. Причем медленнее всего меняется наиболее вероятная энергия.

На рисунке 10 представлены зависимости эффективной энергии пучка от анодного напряжения, построенные по справочным данным. Согласно рисунку изменение эффективной энергии также носит линейный характер.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что значения эффективной энергии рентгеновского пучка согласуются со значениями наиболее вероятной энергии, соответствующей максимуму в спектрах пропускания тормозного излучения.

Поскольку справочные данные по эффективной энергии для условий нашего эксперимента отсутствуют, были сопоставлены расчетные значения наиболее вероятной энергии и эффективной энергии пучка, найденные по абсорбционной кривой. Как оказалось, отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 4%, что служит косвенным доказательством справедливости предложенной методики измерения эффективной энергии.

Проблема восстановления спектра излучения по абсорбционной кривой относится к клас-

су обратных некорректно поставленных задач. Один из возможных вариантов ее решения предложен в работе [2], где предлагается ввести дискретное представление спектра, заданное вектором значений энергий $E(E_1, E_2, \dots, E_m)$. Тогда число квантов на входе детектора можно представить в виде суммы квантов для каждой выделенной энергии: $N_0 = N_0^{E_1} + N_0^{E_2} + \dots + N_0^{E_m}$. С учетом закона ослабления $N_m^{E_i} = N_{m-1}^{E_i} \cdot \exp(-\mu^{E_i} \rho t)$ задача восстановления спектра сводится к решению однородной системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$\begin{cases} N_0^{E_1} P^{E_1} [I_1 - Q^{E_1}] + N_0^{E_2} P^{E_2} [I_1 - Q^{E_2}] + \dots + \\ + N_0^{E_m} P^{E_m} [I_1 - Q^{E_m}] = 0 \\ N_0^{E_1} P^{E_1} [I_2 - (Q^{E_1})^2] + N_0^{E_2} P^{E_2} [I_2 - (Q^{E_2})^2] + \dots + \\ + N_0^{E_m} P^{E_m} [I_2 - (Q^{E_m})^2] = 0 \\ \vdots \\ N_0^{E_1} P^{E_1} [I_m - (Q^{E_1})^m] + N_0^{E_2} P^{E_2} [I_m - (Q^{E_2})^m] + \dots + \\ + N_0^{E_m} P^{E_m} [I_m - (Q^{E_m})^m] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где I_m – значения приведенного сигнала в детекторе; $P^{E_i} = 1 - \exp(-\mu^{E_i} \rho t)$, $Q^{E_i} = \exp(-\mu^{E_i} \rho t)$ – соответственно вероятности поглощения и пропускания квантов с энергией E_i в веществе микродетектора толщиной t и плотностью ρ .

Система уравнений 2 является плохо обусловленной, и ее численное решение является воз-

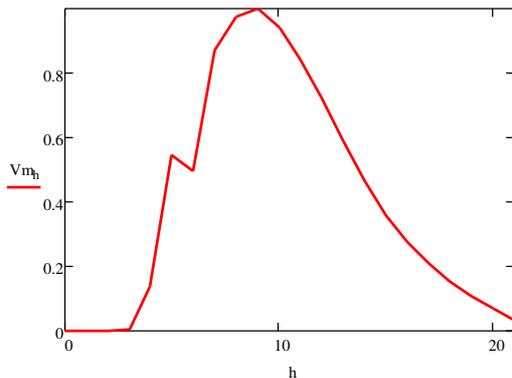


Рисунок 11. Спектр тормозного излучения, восстановленный по абсорбционной кривой путем поиска корней уравнения (2) – методом «Квази-Ньютона». По оси абсцисс отложен номер энергетического интервала расчетной сетки ($h \cdot \Delta E = E$, кэВ), по оси ординат – приведенное к максимуму значение числа квантов

мущенным в силу введенной дискретизации и неточности в измерении приведенных сигналов. Для получения невозмущенного решения мы использовали априорную информацию об исходном распределении и искали решение в виде:

$$V_{V_m}(E_m) = k \cdot \left[\frac{E_{\max}}{E_m} - 1 \right] \cdot \exp(-\mu_{Al}(E_m) \cdot \rho_{Al} \cdot t_{Al}),$$

где E_{\max} – граничная энергия, определенная по значению эффективной энергии, $\mu_{Al}(E_m)$ – массовый коэффициент ослабления излучения, ρ_{Al} – плотность алюминия, t_{Al} – толщина эквивалентного фильтра. Результат решения уравнения (2) методом «Квази-Ньютона» штатными средствами системы MathCAD демонстрируется рисунком 11, где приведено решение для случая: анодное напряжение – 110кВ, суммарная эквивалентная фильтрация 3,5 мм алюминия, шаг дискретизации по энергии $\Delta E = 5$ кэВ.

Однако анализ решения показал, что малые изменения исходных данных приводят к неконтролируемой трансформации решения. Для построения устойчивого алгоритма необходимо использовать специальные методы регуляризации.

Таким образом, в ходе выполнения исследований была предложена методика формирования абсорбционной кривой; показано, что скорость затухания излучения в пределах линейного участка абсорбционной кривой определяет эффективный коэффициент ослабления излучения; выявлена линейная зависимость эффективной энергии пучка, определенной по абсорбционной кривой, от приложенного анодного напряжения; проанализировано влияние фильтрации излучения на величину эффективной энергии пучка; показано, что наиболее вероятная энергия квантов в спектрах пропускания тормозного излучения соответствует эффективной энергии пучка; предложена методика восстановления спектров пропускания по абсорбционной кривой, получены предварительные результаты, показавшие, что для получения невозмущенного решения можно использовать априорную информацию об исходном распределении.

22.10.2010 г.

Список использованной литературы:

1. Владимиров Л.В., Козлов А.А., Лыгин В.А., Рябкин А.Н. Радиационный метод определения напряжения генерирования рентгеновского излучения. Состояние и перспективы // Медицинская техника. – 2000. – №5. – С. 15-19.

2. Муслимов Д.А., Лелюхин А.С. Восстановление спектра излучения рентгеновской трубки по абсорбционной кривой // Материалы III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика-2010». Сб. материалов. Том 2. – М., 2010. – С. 97-99.
3. Муслимов Д.А., Лелюхин А.С. Определение эффективной энергии рентгеновского пучка по скорости затухания излучения в полупроводниковом детекторе // Материалы III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика-2010». Сб. материалов. Том 2. – М., 2010. – С. 100-103.
4. Муслимов Д.А., Лелюхин А.С. «Программа расчета приведенного спектра рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010613534 от 28.05.2010. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Россия.
5. Рентгенотехника: справочник: в 2-х кн. / под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.

Сведения об авторах:

Муслимов Дмитрий Алексеевич, аспирант кафедры проектирования и технологии радиоэлектронных средств Оренбургского государственного университета, 460000, Оренбург, Шарлыкское шоссе 5, ауд.14402, тел. (3532) 372556, e-mail: muslimov_dima@mail.ru

Лелюхин Александр Сергеевич, доцент кафедры проектирования и технологии радиоэлектронных средств Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент, тел. (3532) 372556, e-mail: fit2007@inbox.ru

UDC 615.471.03:616-073.75

Muslimov D.A., Lelyukhin A.S.

ON THE CONTROL OF OUTPUT PARAMETERS FOR X-RAY SOURCES

In this paper we consider a system of non-invasive monitoring of parameters for X-ray emitters. We propose using a discrete linear detector based on gallium arsenide as the transmitter. It is shown that by the nature of radiation attenuation in the detector substance it is possible finding the values of the effective energy of the beam, the boundary energy in the radiation spectrum, and restoring the spectral composition of radiation by the entrance of the detector.

Keywords: deceleration radiation, efficient energy absorption curve.

References:

1. Vladimirov L.V., Kozlov A.A., Lygin V.A. Ryabkin A.N. The radiation method of determining the voltage generating X-rays. Status and perspectives // Medical Technology. – 2000. – №5. – S. 15–19.
2. Muslimov D.A., Lelyuhin A.S. Restoration of the emission spectrum of X-ray tube to the absorption curve, Proceedings of the III Eurasian Congress on Medical Physics and Engineering, «Medical Physics-2010». Sat materials. Volume 2. – М., 2010. – P. 97–99.
3. Muslimov D.A., Lelyuhin A.S. Determination of the effective energy of X-ray beam at the rate of decay of radiation in semiconductor detector // Proceedings of the III Eurasian Congress on Medical Physics and Engineering, «Medical Physics-2010». Sat materials. Volume 2. – М., 2010. – P. 100–103.
4. Muslimov D.A., Lelyuhin A.S. »Program for calculating the spectra of X-ray tube with a tungsten anode. State registration certificate of the computer program №2010613534 from 28.05.2010. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. Russia.
5. Rentgenotekhnika: Directory: a 2 kN. Ed. V.V. Klyuev. – 2 ed., Revised. and add. – Moscow: Mashinostroenie, 1992. – 480 pp.