



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2008–29  
ЛДС

А.П. Воробьев, С.Н. Головня, В.Ф. Головкин, С.А. Горохов,  
П.П. Коробчук, В.Х. Маляев, Ю.П. Цюпа  
*(ГНЦ Институт физики высоких энергий, Протвино Московской обл.)*  
Г.И. Айзенштат, О.Б. Корецкая, О.П. Толбанов, А.В. Тяжев  
*(Сибирский физико-технический институт, Томск)*

**СИСТЕМА ПРЯМОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО КОМПЬЮТЕРНОГО  
ТОМОГРАФА**

*Направлено в ПТЭ*

Протвино 2008

**Аннотация**

Воробьев А.П., Головня С.Н., Головкин В.Ф. и др. Система прямой регистрации для рентгеновского компьютерного томографа: Препринт ИФВЭ 2008–29. – Протвино, 2008. – 13 с., 17 рис., библиогр.: 4.

Описана система регистрации для рентгеновского компьютерного томографа, разработанная с использованием полупроводниковых детекторов на арсениде галлия в ГНЦ ИФВЭ, Протвино. Приведены технические характеристики системы и результаты ее испытаний.

**Abstract**

Vorobiev A.P, Golovnya S.N., Golovkin V.F. et al. The x-Ray Imaging System for Computer Tomography: IHEP Preprint 2008 –29. – Protvino, 2008. – p. 13, fig. 17, refs. 4.

The x-ray imaging system for computer tomography with gallium arsenide (GaAs) semiconductor detectors, developed in IHEP, is described. The technical characteristics of the system have been presented and tests results discussed.

## Введение

Для современных компьютерных томографов (РКТ) системы регистрации рентгеновского излучения создаются в основном с использованием скинцилляционных конверторов и полупроводниковых (п/п) фотодиодов. Эти комбинированные детекторы позволили разработать многосрезовые детектирующие системы и тем самым заметно понизить дозы облучения, получаемые пациентами в ходе медицинских обследований, при одновременном увеличении детализации получаемого изображения. Однако дальнейшее использование таких систем из-за их конструктивных особенностей и невысокой эффективности регистрации рентгеновского излучения (<20% в диапазоне рабочих энергий РКТ) уже не позволяет ни уменьшать далее дозы облучения ни повышать пространственное разрешение детектирующих систем. Хотя обе эти задачи все еще остаются актуальными для изготовителей рентгеновских компьютерных томографов.

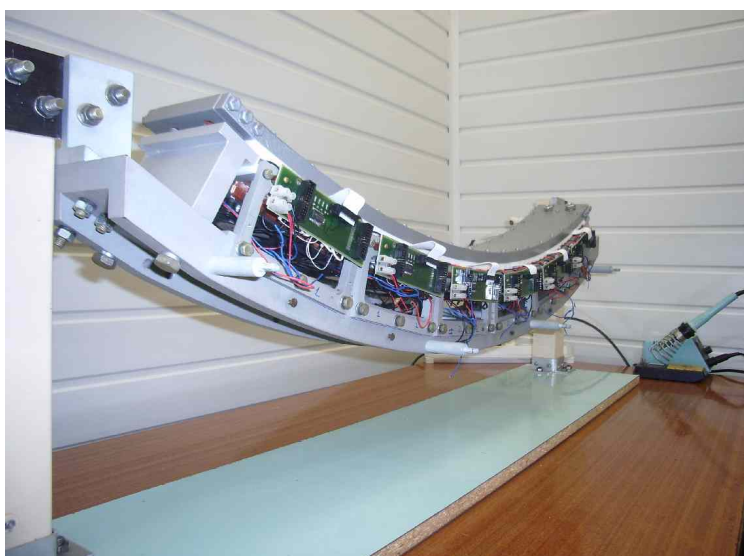
Перечисленные выше задачи могут быть решены с использованием п/п детекторов на арсениде галлия (GaAs). Основной особенностью детекторов на арсениде галлия является то, что эти детекторы осуществляют прямое преобразование рентгеновского излучения в электрический сигнал и обладают при этом высокой эффективностью регистрации рентгеновского излучения, близкой к 100% для диапазона энергий РКТ. В разработанной системе были использованы стриповые GaAs детекторы, изготовленные на материале резистивного типа [1].

В работе представлена детектирующая система, разработанная в ГНЦ ИФВЭ, для рентгеновского компьютерного томографа РКТ-01, серийно выпускаемого ФГУП РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Забабахина (г. Снежинск) [2], описана конструкция системы и результаты ее испытаний.

### 1. Конструкция системы

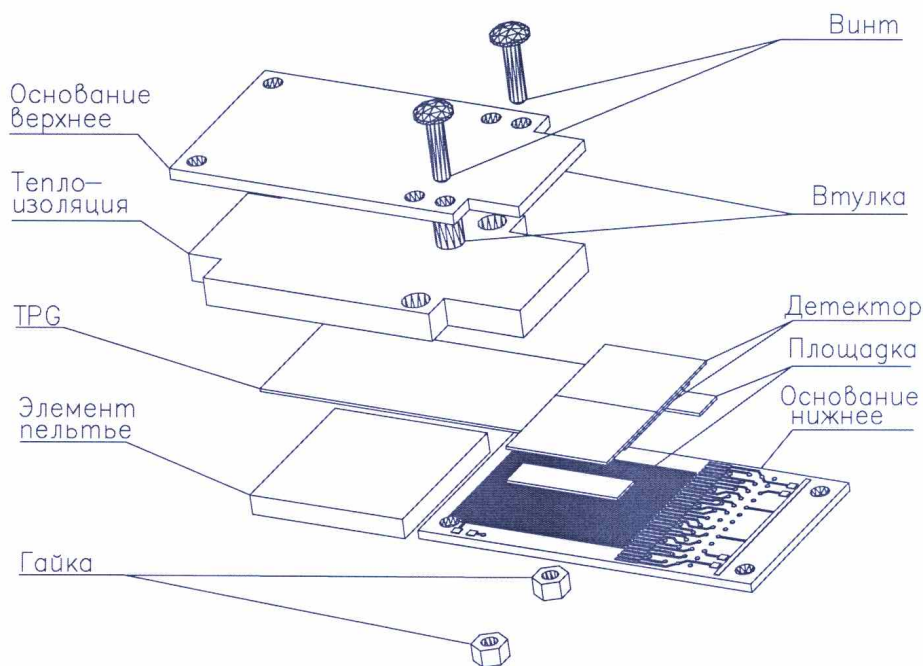
В состав детектирующей системы (**рис. 1**) входят: несущая механическая конструкция, блоки детектирования с размещенными в них детектирующими модулями, электронная система сбора данных, система поканальной подстройки базового уровня и усиления, система температурной стабилизации арсенид-галлиевых детекторов, промышленный компьютер и программное обеспечение для управления, контроля рабочих параметров и чтения информации.

Несущая механическая конструкция детектирующей системы представляет собой дугообразную металлическую платформу с узлами ее крепления на концах. Сверху платформа с размещенными на ней блоками детектирования закрывается металлической крышкой. Конструктивно на платформе объединены 6 блоков, каждый из которых имеет по четыре детектирующих модуля (в 6-м блоке содержится только три детектирующих модуля).



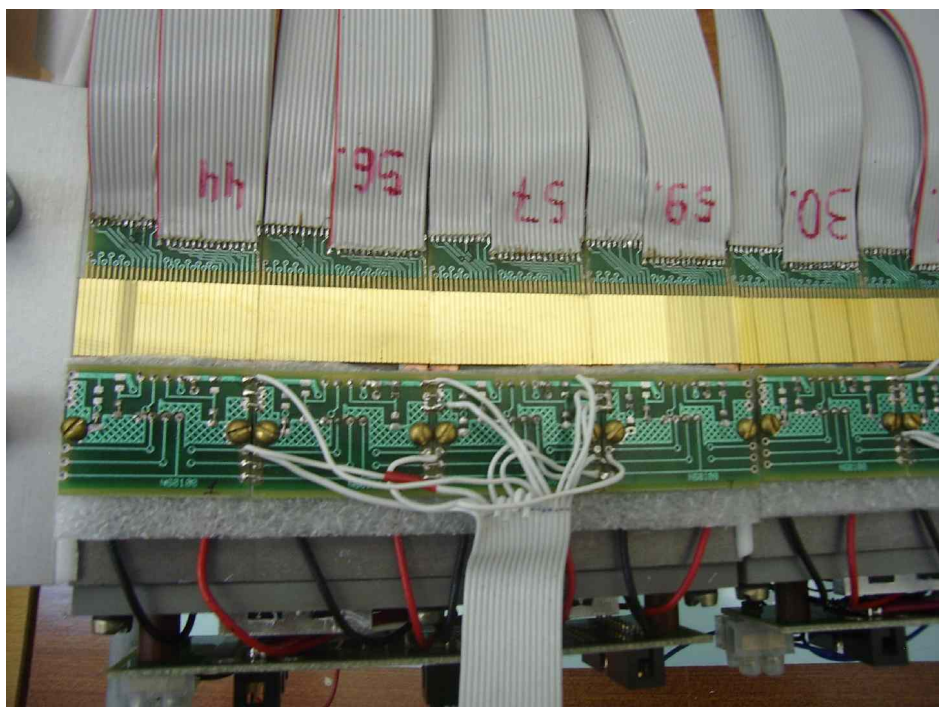
**Рис. 1.** Фотография системы на стенде (вид сбоку, без блоков питания).

Блок детектирования, содержащий 128 каналов регистрации, обслуживается одной подсистемой системы сбора данных, также имеющей модульную структуру. Объем, в котором размещены блоки детектирования, термоизолируется от внешней среды, герметизируется и заполняется сухим аргоном через клапаны в крышке. Под каждым блоком детектирования размещается индивидуальная система охлаждения.



**Рис. 2.** Детектирующий модуль, показанный поэлементно.

Каждый детектирующий модуль (**рис. 2**) имеет 32 канала регистрации рентгеновского излучения из арсенид-галлиевых детекторов. Конструкция модуля в значительной степени выбиралась по возможностям обеспечения температурного режима работы чувствительного элемента GaAs детектора при минимизации энергетических затрат. Температурный режим работы детектора задается системой термостабилизации на основе элемента Пельтье через теплопроводящий мост из пиролитического графита (TPG), покрытый электроизолирующей плёнкой из парилена. Чувствительные элементы детектора (стрипы) посредством ультразвуковой разварки соединяются с текстолитовой платой нижнего основания модуля. Общее количество чувствительных элементов (стрипов) в системе 736, длина стрипов 16 мм, питч 1,1 мм. Толщина чувствительной области – 1 мм. Фотография части детекторной сборки из GaAs детекторов представлена на **рис. 3** (вид сверху).



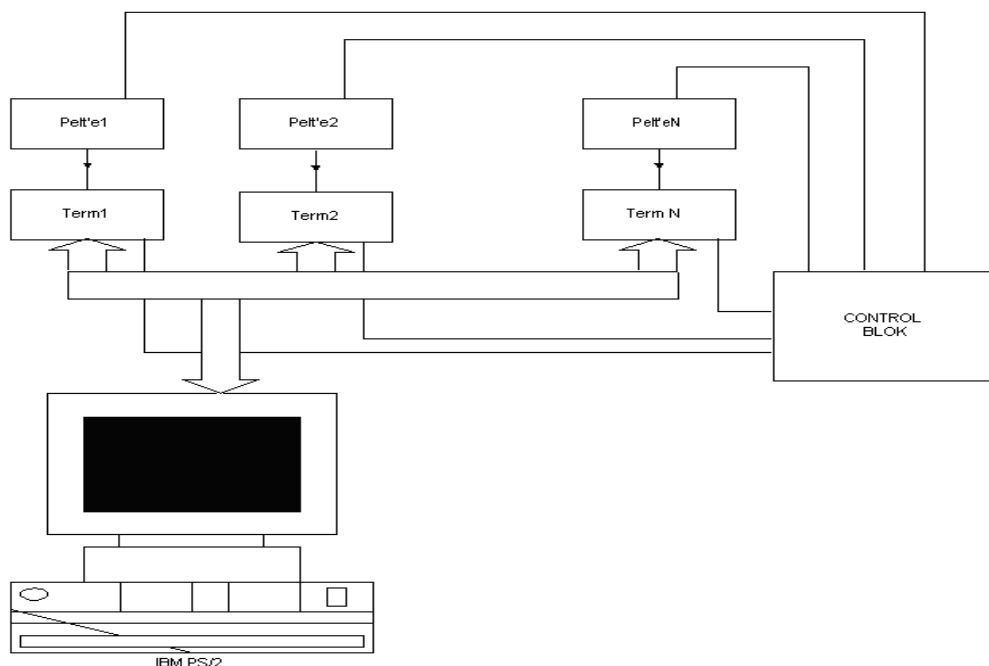
**Рис. 3.** Фотография части GaAs детекторной сборки (вид сверху).

## 2. Температурная стабилизация системы GaAs детекторов

Полупроводниковые детекторы на арсениде галлия имеют сильную температурную зависимость «темновых» токов от температуры. Уменьшение температуры детекторов на 20<sup>0</sup>С приводит к снижению величины «темновых» токов в 10 раз [3], поэтому температурная стабилизация детектирующей системы абсолютно необходима.

Упрощенная блок-схема системы температурной стабилизации GaAs детекторов детектирующей системы приведена на **рис. 4**.

Система термостабилизации GaAs детекторов имеет в своем составе помимо элементов Пельтье CP1.0-71-05L (24 шт.) микросхему электронного программируемого термостата DS1621 (24 шт.), электрические вентиляторы с радиатором TTC-CU11TB (12 шт.) и систему управляемого питания с источниками SP-320-7,5 (2 шт.). Микросхема DS1621 представляет собой управляемый цифровой термометр и термостат с 9-битным разрешением (точность задания температуры – 1,0<sup>0</sup>С, точность измерения – 0,5<sup>0</sup>С) и является драйвером для силовых MOSFET транзисторов, управляющих током в цепи элементов Пельтье.



**Рис. 4.** Блок-схема температурной стабилизации GaAs детекторов.

Для стабилизации температуры в микросхему по двухпроводному последовательному протоколу заносятся значения минимальной и максимально допустимой температуры. В случае превышения максимально допустимой температуры на выходе любой из микросхем DS1621 активизируется сигнал, который подключает элемент Пельтье к источнику питания для снижения температуры связанных с ним детекторов. Каналы измерения/контроля объединены в три группы по 8 штук в каждой (управление осуществляется по последовательной шине I<sup>2</sup>C микроконтроллером ATMeга8) и являются пассивными устройствами. Предусмотрена возможность измерения температуры каждого из детектирующих модулей посредством опроса термостатов. Микроконтроллер связан с промышленным компьютером РСМ-8575 по последовательному порту RS-232. Точность поддержания рабочей температуры детекторов системой термостабилизации представлена на **рис. 5**.

Конструктивно система состоит из 24 микроплат с термодатчиками DS1621 и элементами Пельтье, входящими в состав детектирующих модулей. Каждый из датчиков измеряет и контролирует температуру 32 каналов детектирующего модуля. Конструкция измерительной электроники состоит из 6 независимых измерительных блоков по 4 микроплаты в каждом. Сигналы об изменении температуры с каждого из 6 отдельных блоков передаются на расположенную рядом плату управления, через которую производятся запись данных о поддерживаемой температуре и управление транзисторными ключами для переключения элементов Пельтье через оптическую развязку на основе микросхем HCPL2631. Сигналы управления и питания всех 6 плат объединяются через ленточный кабель и передаются на интерфейсную плату. Интерфейсная плата обеспечивает связь компьютера с термодатчиками.

Для обеспечения точности поддержания температуры  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  была разработана схема широтно-импульсной модуляции (ШИМ) стабилизации тока элементов Пельтье. Схема ШИМ стабилизации позволяет изменять средний ток через элементы Пельтье в диапазоне от 0 до 100% от максимального. На основании проведенных измерений зависимости рабочих параметров детектирующей системы от температуры рабочая температура детектирующей системы была выбрана  $+15^{\circ}\text{C}$ .

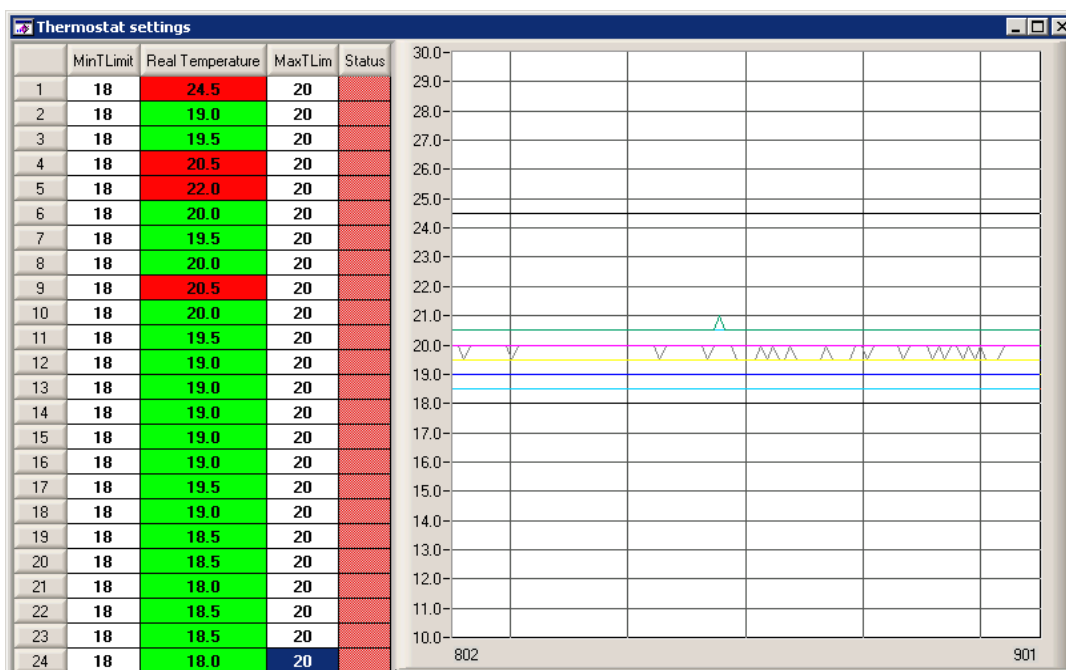


Рис. 5. Поддержание и измерение температуры детектирующей системы. Линии на графике представляют текущую температуру в контрольных точках детектирующей системы.

### 3. Система поканальной подстройки базового уровня и усиления

Для корректировки неоднородностей в каналах считывания информации (разброс в темновых токах детекторов, рабочих параметрах примененных интеграторов и т.д.) и более полного использования динамического диапазона была разработана и реализована система, позволяющая независимо изменять усиление и величину базового уровня в каждом из каналов. Для этого в каждый канал были включены два переменных подстроечных сопротивления, управляемых дистанционно от компьютера. Результаты испытаний систем подстройки базового уровня и усиления представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Зависимость амплитуды отклика системы от значения подстроечного резистора при напряжении смещения 200В

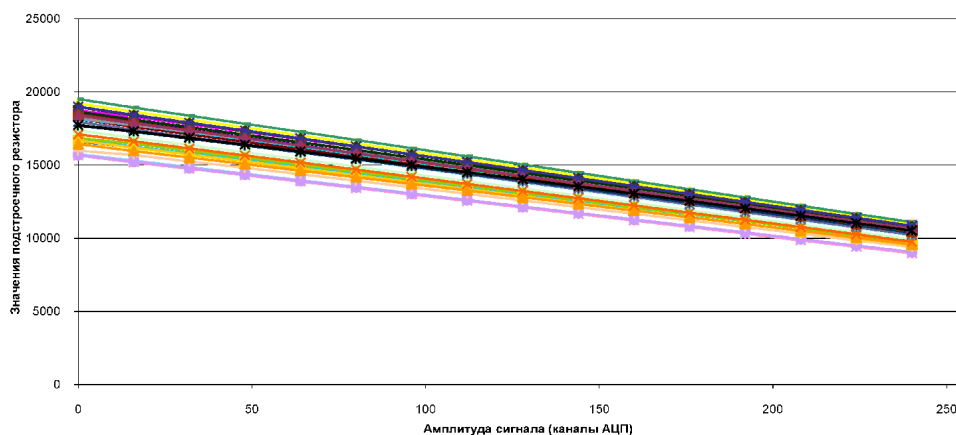
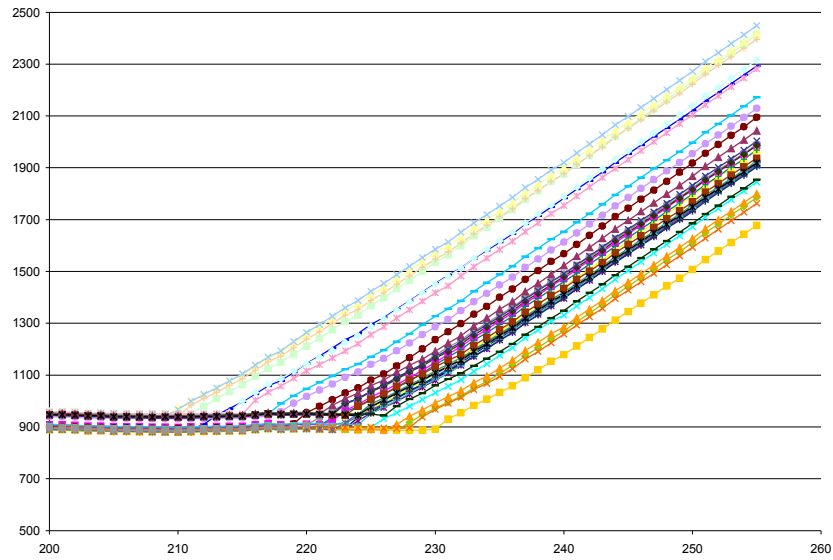


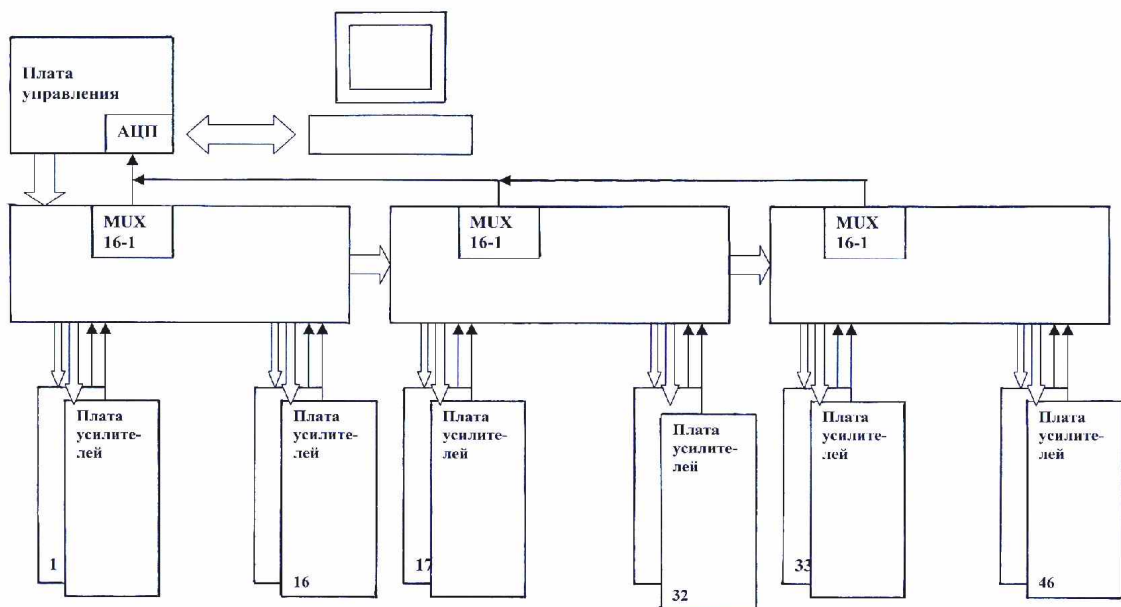
Рис. 6. Зависимость амплитуды сигнала от значения цифрового подстроечного резистора в цепи.



**Рис. 7.** Зависимость амплитуды сигнала от значения цифрового подстроечного резистора в цепи базовой линии.

#### 4. Электронная система съема информации и ввод ее в компьютер

Система сбора данных РКТ, блок-схема которой представлена на **рис. 8**, состоит из 3 идентичных блоков.



**Рис. 8.** Блок-схема электроники системы сбора данных.

Каждый блок включает в себя 8 GaAs детекторов по 32 канала в каждом, всего 256 каналов (в последнем блоке 224 канала). К каждому из блоков подключаются 16 плат усилителей. В



блоке установлены буферные микросхемы ALS245 для разветвления сигналов управления (по одной на каждые четыре платы), стабилизаторы напряжения питания микросхем усилителей, мультиплексор 16-1. Каждая плата усилителя имеет 8 специализированных интеграторов ACF2101, мультиплексор 16-1, цифровые резисторы для подстройки пьедесталов (компенсации темновых токов детектора) и регулировки усиления.

За синхронную работу всех блоков отвечает общая схема синхронизации, выполненная на ПЛИС Altera. Эта программируемая микросхема используется для выдачи синхронных управляющих последовательностей (протокола управления) для интеграторов ACF2101, мультиплексоров на платах усилителей, мультиплексоров на объединительных платах и АЦП. ПЛИС Altera подает также строб для вычитывания значений амплитуд на карту ввода-вывода фирмы National Instruments NI PCI-DIO32HS в момент готовности данных к передаче в промышленный компьютер и обеспечивает обмен данными с ним.

После запуска системы (от внешнего запускающего импульса TTL или CMOS стандарта с длительностью не менее 100 нс) в течение примерно 8,8 мс происходит интегрирование входных токов в микросхемах ACF2101. Далее начинается последовательное чтение и оцифровка накопленных амплитуд. Аналоговые выходы с 8 микросхем ACF2101 через мультиплексор 16-1 (на плате усилителей) и мультиплексор 16-1 на объединительной плате поступают на АЦП, где происходит оцифровка сигнала с частотой 1 МГц, оцифрованные данные сразу вычитываются в промышленный компьютер через карту NI PCI-DIO32HS. Для оцифровки и вычитывания в РС данных единичного измерения требуется около 0,8 мс. Таким образом, полный цикл работы системы в одной позиции сканируемого среза составляет 9,6 мс. В конце цикла система синхронизации вырабатывает сигнал RESET, по которому происходит очистка интегрирующих емкостей, и ждет прихода следующего запускающего импульса.

В промышленном компьютере, выполненном на основе платы РСМ-8575 производства фирмы Advantech, происходит накопление и предварительная обработка данных. После сканирования одного среза данные через локальную сеть передаются на главный компьютер для восстановления и окончательной обработки. Промышленный компьютер также управляет выполнением измерений и осуществляет управление температурой детектирующей системы, управление системой поканальной подстройки базового уровня и усиления и выполняет тестирование всей системы при включении.

Для оцифровки данных используется АЦП AD7621. AD7621 – это монолитное быстродействующее 16-разрядное АЦП с максимальной частотой дискретизации до 2 МГц, с интегрированным на кристалле устройством выборки-хранения и источником опорного напряжения. Выдача результата возможна по параллельному или последовательному интерфейсу.

## 5. Шумовые характеристики детектирующей системы

На **рис. 9** показано распределение шумовых сигналов системы поканально при выключенной системе термостабилизации. Видно, что среднее значение шумов измерительного тракта при напряжении на детекторе 50 В находится в районе 3–4 каналов АЦП. При этом оказалось, что при отключенном измерительном тракте собственные шумы АЦП составляют примерно  $1,2 \div 1,3$  отсчета. Принимая во внимание, что один отсчет АЦП равен 30 мкВ, получаем амплитуду шумового сигнала равной 100–120 мкВ при подключенном детекторе и 30–40 мкВ – при отключенном детекторе, что является достаточно хорошим показателем.

Измерение сделано при комнатной температуре  $22 - 23^{\circ}\text{C}$ , установленной естественным образом.

При включении системы температурной стабилизации детекторов при  $23^{\circ}\text{C}$  уровень шумов поднимается в среднем до 10–12 каналов АЦП (**рис. 10**).

Шумы детектирующей системы при температурной стабилизации  $15^{\circ}\text{C}$  приведены на **рис. 11**.

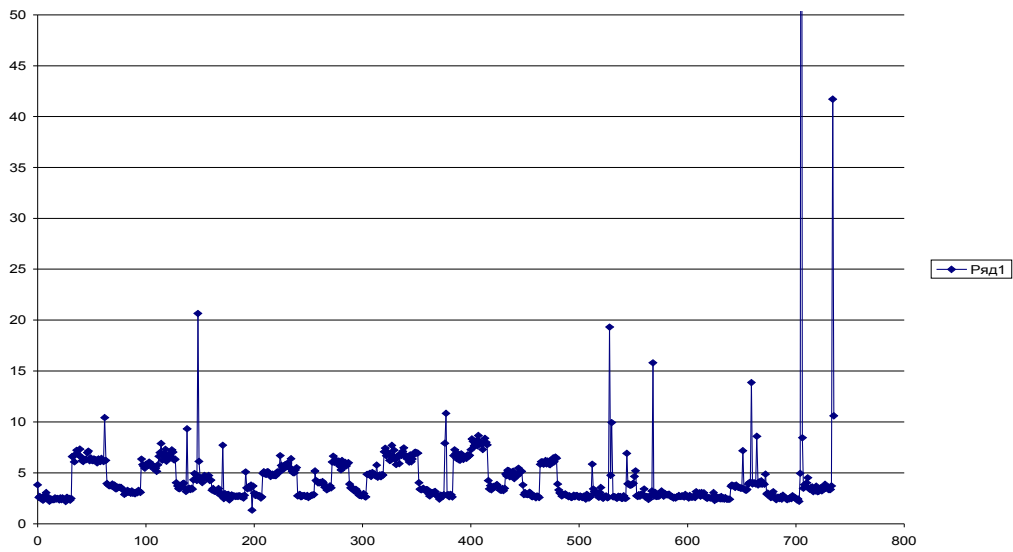


Рис. 9. Шумы детектирующей системы при выключенной системе температурной стабилизации.

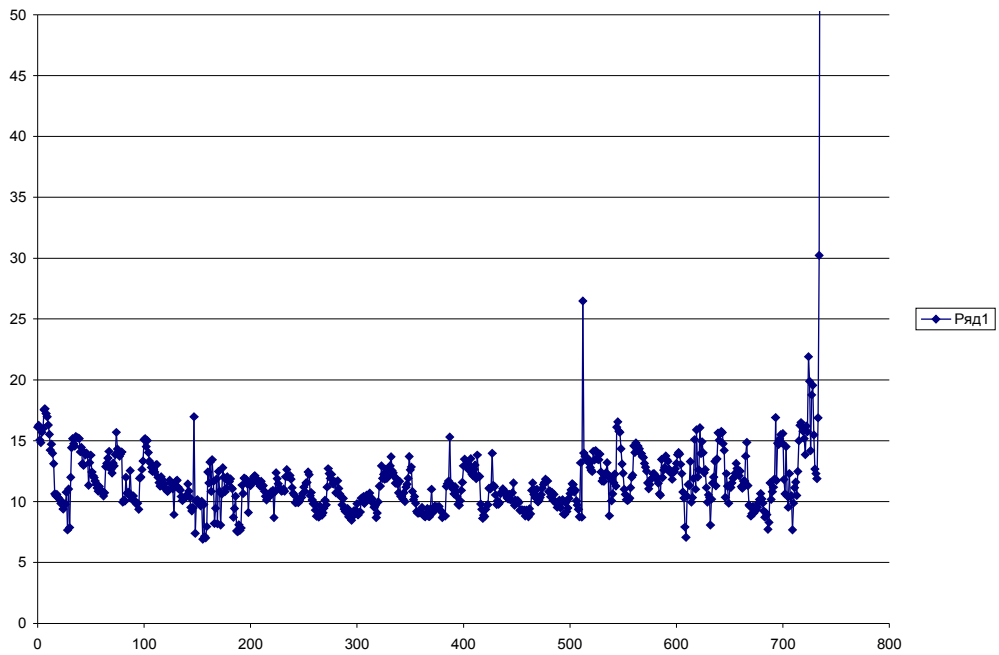
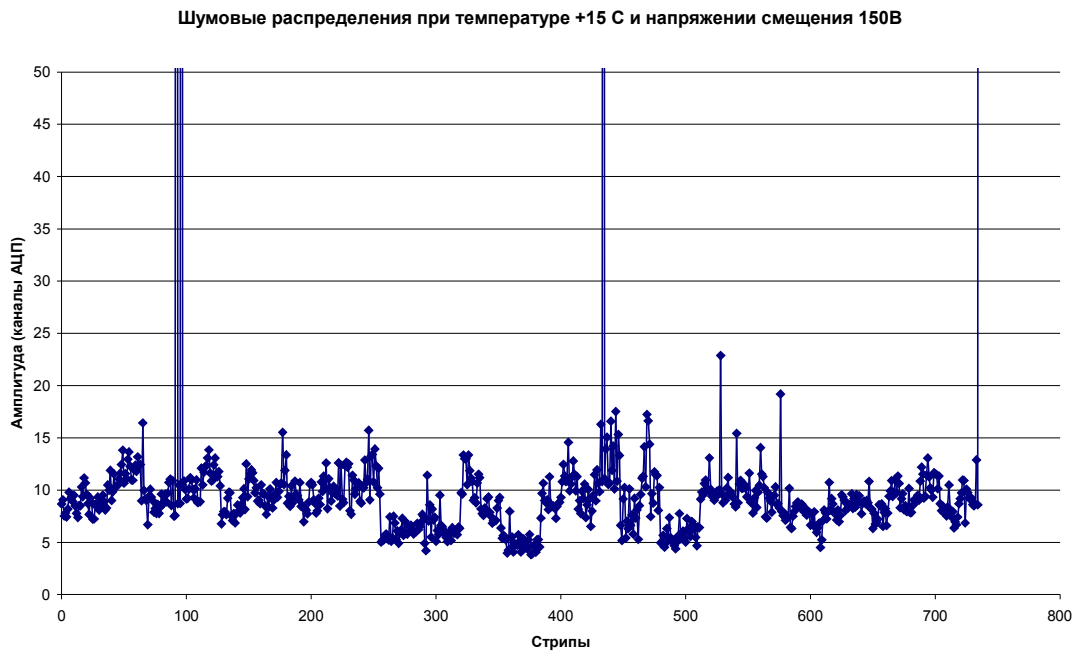
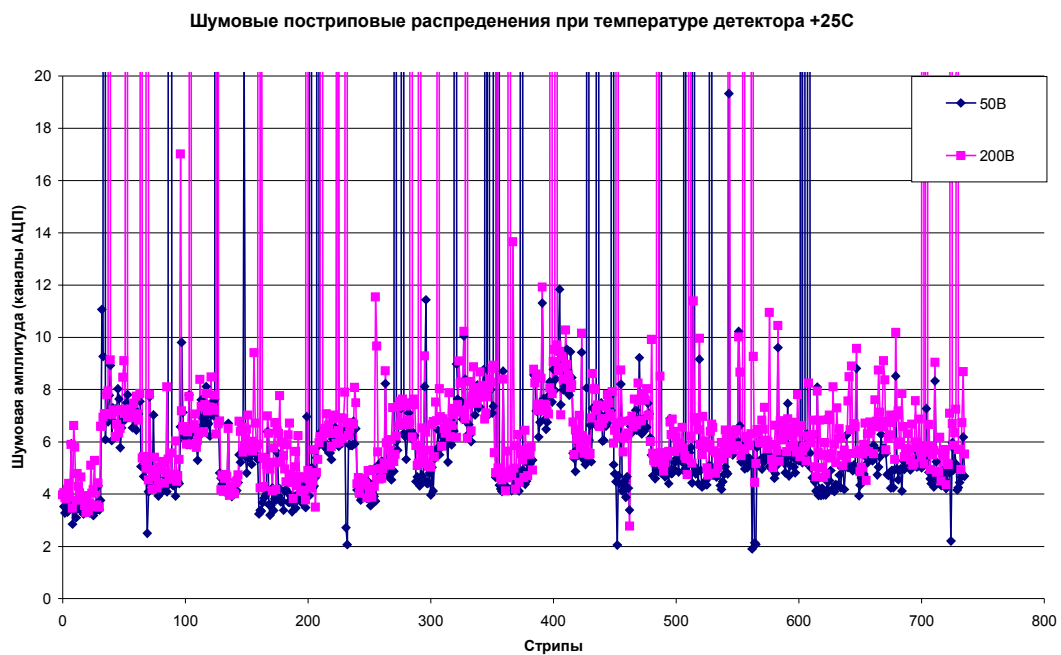


Рис. 10. Шумы детектирующей системы при температурной стабилизации 23<sup>0</sup>С.

Наблюдается относительно слабая зависимость шумов от поданного на детекторы напряжения. При увеличении напряжения с 50 В до 200 В шумы увеличиваются на 1–2 канала АЦП. Результаты измерений шумовых распределений представлены на **рис. 12**.

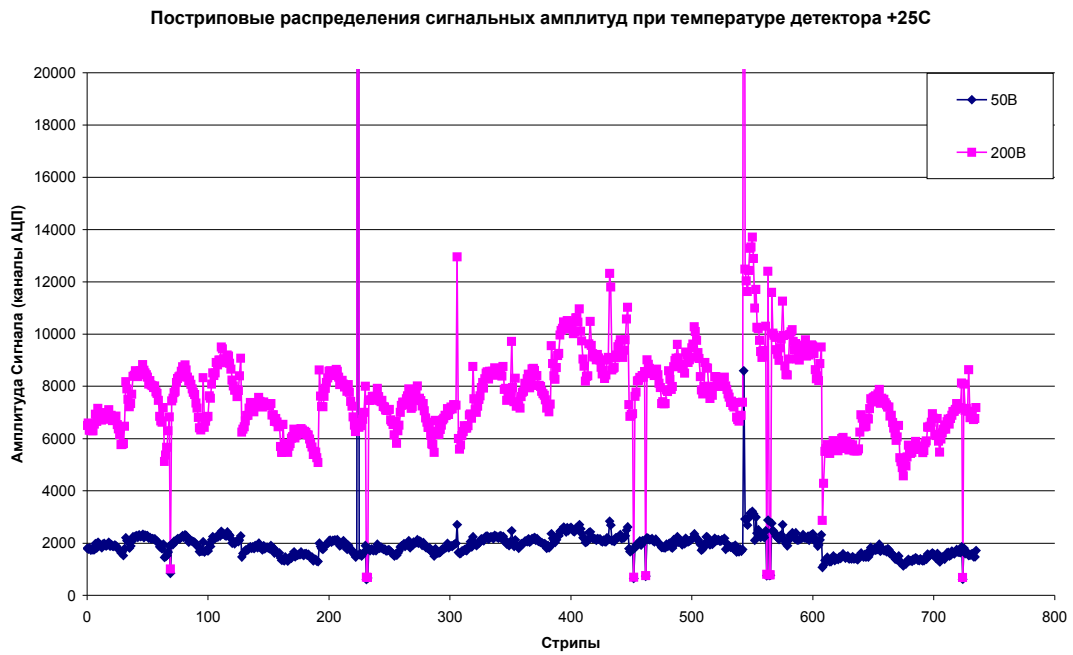


**Рис. 11.** Шумы детектирующей системы при температурной стабилизации 15°C.

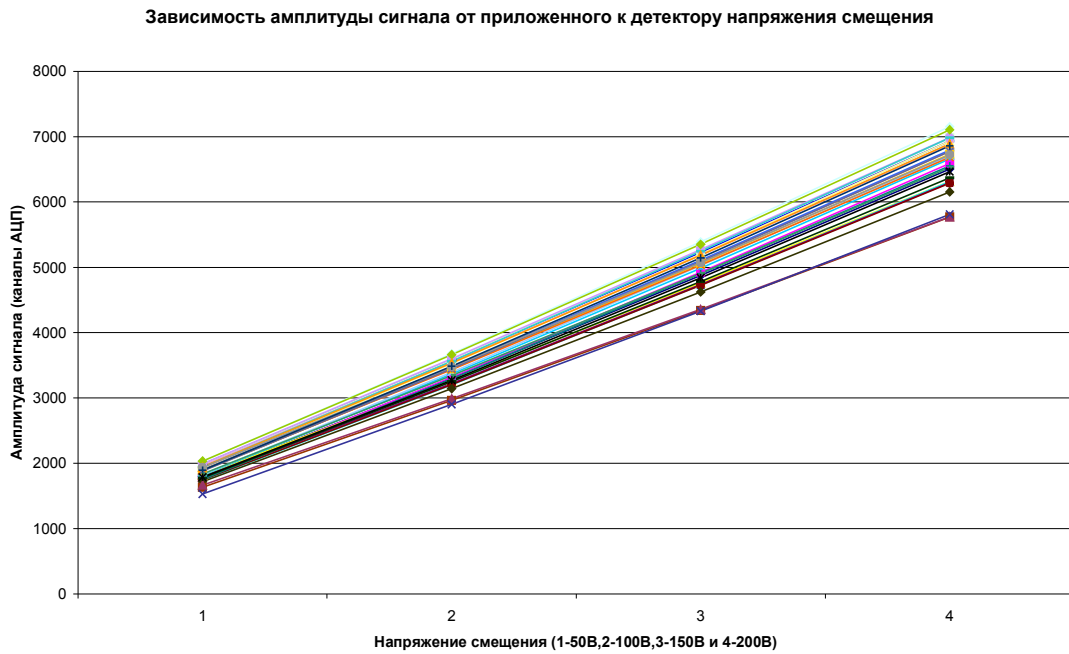


**Рис. 12.** Шумовые распределения при напряжении смещения 50 и 200В.

Притом, что амплитуда сигнала с ростом напряжения смещения увеличивается значительно, линейно нарастая с увеличением напряжения смещения. Результаты измерения зависимости амплитуды сигнала от приложенного у детектору напряжения смещения представлены на **рис. 13** и **14**.



**Рис. 13.** Амплитуды сигнала при приложенном к детектору напряжении смещения 50 и 200 В.

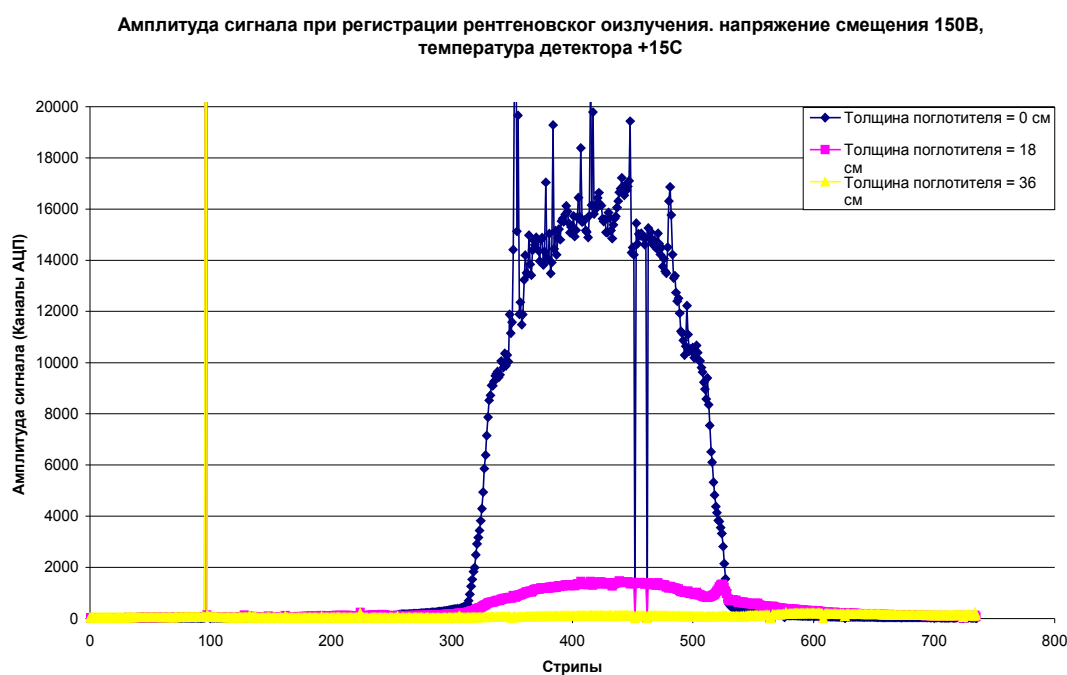


**Рис. 14.** Зависимость амплитуды сигнала от приложенного к детектору напряжения смещения для первых 32 стрипов.

Детектирующая система продемонстрировала четкий линейный отклик на рост приложенного напряжения смещения. Незначительный разброс тангенса угла наклона зависимости для различных стрипов имеет корреляцию с разницей в вольт-амперной зависимости этих стрипов.

## 6. Регистрация рентгеновского излучения

Для проверки эффективности регистрации рентгеновского излучения был проведен ряд измерений амплитуды сигнала при различной толщине водного поглотителя. Для этого между источником рентгеновского излучения (рентгеновской трубкой РАПАН – анодное напряжение 70 КВ, ток 1 мА) и детектором устанавливались полиэтиленовые ёмкости с водой. Ширина ёмкости равнялась 18 см, что дает примерно десятикратное поглощение интенсивности рентгеновского излучения. Для случая напряжения смещения 150 В, температура детектора +15 градусов распределение амплитуд представлено на **рис. 15**.



**Рис. 15.** Амплитудные распределения при регистрации рентгеновского излучения.

На **рис. 16** и **17** представлена часть (для 32 стрипов) амплитудного распределения отклика системы на облучение рентгеновским излучением, выбранная в области максимальной засветки детектирующей системы. Видно, что при построении в логарифмическом масштабе сохраняются равные интервалы между амплитудами отклика от прохождения излучения через водный фильтр, что характеризует нормальную работу системы.

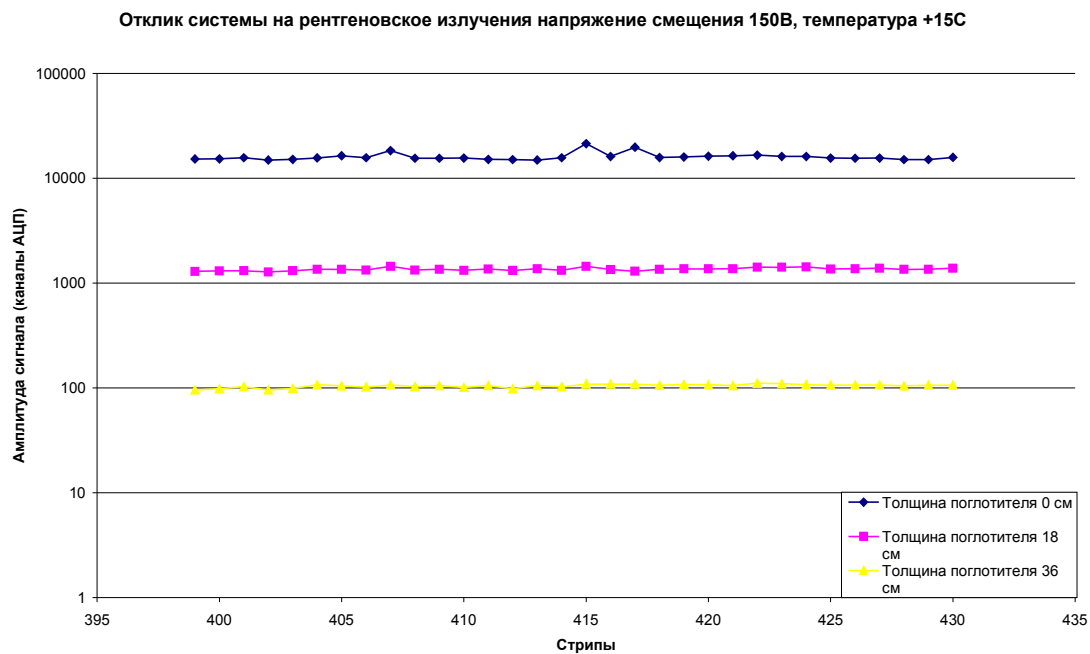


Рис. 16. Отклик системы на облучение.

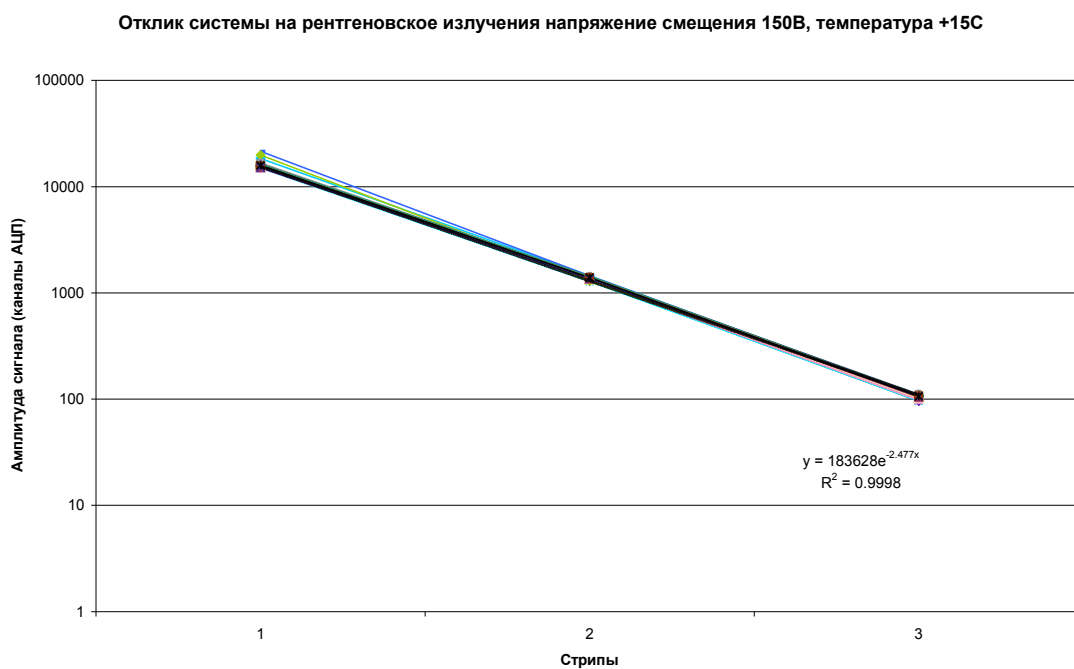


Рис. 17. Часть амплитудного отклика на облучение.

## **Заключение**

Разработанная в ГНЦ ИФВЭ система регистрации рентгеновского излучения соответствует требованиям, предъявляемым к детектирующим системам для медицинских целей и может быть использована в качестве чувствительного элемента в цифровом компьютерном томографе сканирующего типа.

## **Список литературы**

- [1] A.V. Tyazhev et al. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. v.509 (2003) p. 34-39.
- [2] [www.vniitf.ru](http://www.vniitf.ru)
- [3] S.N. Golovnia, S.A. Gorokhov, Y.P. Tsyupa, A.P. Vorobiev, O.B. Koretskaya, L.S. Okaevich, O.P. Tolbanov. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. (2002.) v.A494, p. 223-228.

*Рукопись поступила 29 декабря 2008 г.*

А.П. Воробьев, С.Н. Головня, В.Ф. Гололвкин и др.  
Система прямой регистрации для рентгеновского компьютерного томографа.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В.Ежела.

---

Подписано к печати	30.12.2008.	Формат 60 × 84/8.	Офсетная печать.
Печ.л. 1, 67.	Уч.– изд.л. 1,5.	Тираж 90.	Заказ .
			Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142284, Протвино Московской обл.



Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2008–29, ИФВЭ, 2008

---