С.А. Горохов, М.К. Полковников

Система управления и обработки данных для линейки GaAs-детекторов рентгеновского сканера

Аннотация

Описана на программном уровне система управления и обработки данных для рентгеновского сканера, ее основные подсистемы, ответственные за получение данных изображения. Представлены программные процедуры управления подсистемами сканера и алгоритмы обработки данных сканера для компенсации эффекта разброса темновых токов детекторов и выравнивания различной чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению.

В настоящей статье приводятся результаты разработки программной оболочки для управления линейкой микрополосковых арсенид-галлиевых (GaAs) детекторов и создаваемых в ГНЦ ИФВЭ рентгеновских сканеров на их основе [1]-[4]. Система управления сканерами [3], [4] включает в себя следующие элементы: подготовку линейки детекторов к работе, мониторинг состояния и контроля основных параметров в режиме ожидания, управление экспозицией и сбором данных с линейки детекторов, предварительную обработку и визуализацию данных. Полученные изображения затем записываются в файл в формате DICOM 3.0 или передаются на PACS-сервер.

Устройство сканера и программная оболочка

Разрабатываемые рентгеновские сканеры состоят из четырех подсистем: линейки GaAs-детекторов, механической системы для синхронного перемещения линейки и источника рентгеновского излучения, системы сбора данных и источника рентгеновского излучения. Программное управление этими системами включает в себя: предварительную подготовку линейки детекторов к экспозиции, проведение экспозиции, реконструкцию и последующую обработку изображения, сохранение изображения в виде графического файла или пересылку на PACS- (Picture Archiving and Communication System) сервер.

Основным элементом, ответственным за формирование изображения, является линейка GaAs-детекторов, которая конструктивно состоит из 16 модулей М1-М16 (*рис. 1*). В состав каждого модуля входят 128-канальный микрополосковый детектор и 128-канальная интегрирующая КМОП-микросхема с мультиплексором и цифровым управлением темновыми токами [5] для формирования выходных сигналов откликов детекторов на рентгеновское излучение. Данные с микросхем приходят на мультиплексоры МП1, МП2, МП3, МП4. ПЛИС «Altera» управляет оцифровкой, записью данных в ОЗУ (32 Мб статической памяти) и чтением данных из памяти.

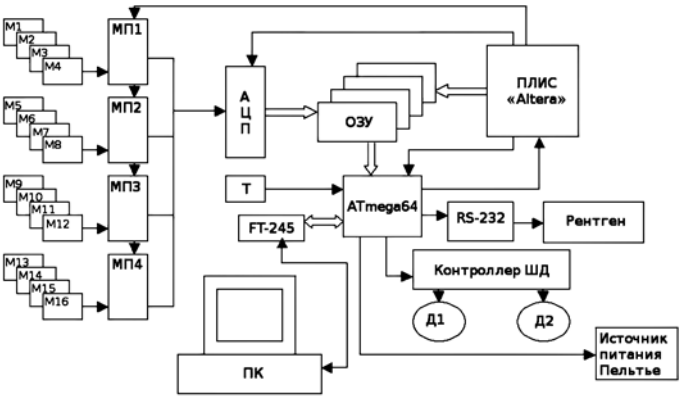

Рис. 1. Блок-схема рентгеновского сканера

Контроллер «ATmega64» по команде от PC вырабатывает сигналы управления для ПЛИС «Altera», управляет источником питания подсистемы термостабилизации детекторов, измеряет температуру внутри детектирующего блока, вычитывает данные из локальной памяти и передает их в ПК, реализует запись кодов управления многоканальными интеграторами в КМОП-микросхемы для компенсации темновых токов детекторов, управляет шаговыми двигателями, при помощи стандартного интерфейса RS-232, управляет источником рентгеновского излучения (на *рисунке* – Рентген).

На *рис. 2* представлена блок-схема программы и программных подсистем сканера. Управление сканером осуществляется через программный «Менеджер» – объект класса C++, где хранятся информация изображения, данные состояния сканера и источника рентгеновского излучения. Контроллер «ATmega64» используется для приема команд менеджера и передачи данных в программу управления. Все процедуры обработки данных выполняются не в микропрограмме контроллера, а в пользовательском приложении.

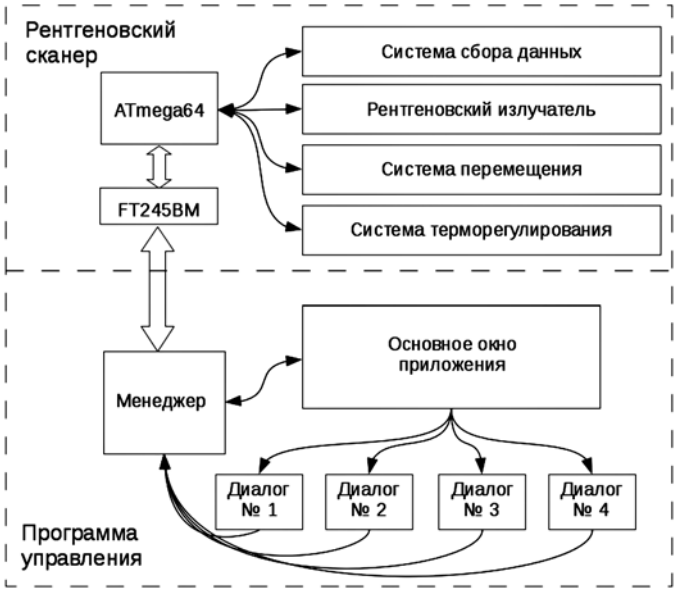

Рис. 2. Блок-схема программы и систем рентгеновского сканера

Программа управления написана на языке программирования C++ для операционной системы «GNU/Linux» и использует в своей структуре следующие пакеты и библиотеки:

- Glibmm и Gtkmm – C++ интерфейс библиотеки glib2 и GTK+ для графического интерфейса пользователя (GUI) [6];
- DCMTK – набор библиотек и утилит командной строки для реализации стандарта DICOM 3.0 [7];
- ImageMagick – набор библиотек и утилит командной строки для обработки цифровых изображений [8];
- ccmath, gsl – библиотеки математических функций и алгоритмов [9], [10];
- PostgreSQL и PQXX – SQL-база данных для хранения информации о пациентах и изображениях[11], [12];
- Conquest – сервер медицинских изображений для хранения отснятых файлов на локальной машине (персональном компьютере) [13].

Команды управления сканером и линейкой детекторов

Команды, посылаемые в устройство сканера с персонального компьютера (ПК), подразделяются на следующие группы: команды линейки детекторов, команды системы сбора дан-

ных, команды системы термостабилизации, команды источника рентгеновского излучения, команды системы перемещения линейки детекторов и источника рентгеновского излучения.

Команды для передачи из ПК в устройство сканера преобразуются в последовательность байтов (буфер). Буфер состоит из заголовка фиксированной длины в 8 байт, где указывается тип команды, и данных максимальной длины в 64 байта. Микропрограмма контроллера «ATmega64» по внешнему прерыванию от контроллера FT-245BM считывает буфер команды и в зависимости от типа заголовка пишет данные команды в одну из подсистем сканера. При этом процедура обработки команды реализована в виде конечного автомата.

Программные процессы и нити управления сканером

При запуске программы для управления сканером задействованы две нити (thread), которые переключаются при поступлении команд для работы со сканером (*рис. 3*). Нить, работающая при простое сканера (фоновый режим), обеспечивает контроль температурного режима линейки детекторов и состояние источника рентгеновского излучения. При активном режиме (сканирование, калибровка, выравнивание пьедесталов или изменение параметров сканирования) фоновая нить приостанавливается через условную переменную с мьютексом (condition variable with mutex) и возобновляется после выполнения операций со сканером.

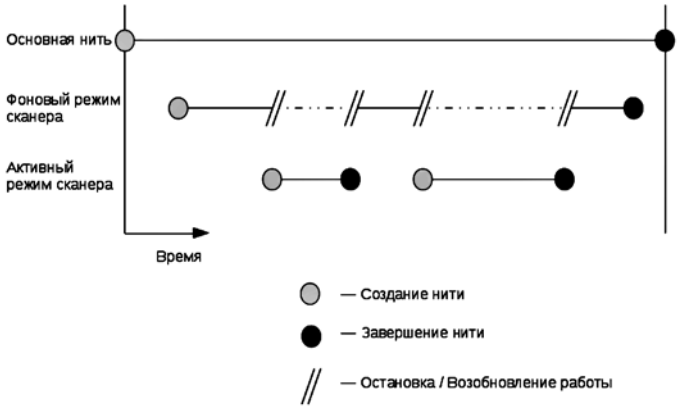

Рис. 3. Временная диаграмма нитей программы для работы со сканером:

фоновый режим:
- контроль параметров излучателя и температурного режима линейки детекторов;

активный режим:
- сканирование (экспозиция и сбор данных);
- компенсация темновых токов детекторов;
- выравнивание чувствительности детекторов (калибровка)

Нить фонового режима – это бесконечный цикл, который с частотой в 1 с производит измерение температуры детекторов и на основе текущего значения температуры программный ПИД-регулятор [14] изменяет значение для записи в цифровой потенциометр, управляющий током элементов Пельтье (элементов охлаждения). Пределы удержания температуры устанавливаются в границах (+5,0 ± 0,3) °С. Охлаждение до такой температуры необходимо для уменьшения темновых токов и разброса амплитуд сигналов с разных детекторов. На *рис. 4* представлена логическая блок-схема фонового режима работы сканера.

Запуск активного режима сканера происходит, когда оператор активирует, например, кнопку «Сделать снимок» или производит одну из процедур подготовки сканера к работе. Процедуры подготовки к работе необходимы для задания правильной работы линейки детекторов и включают в себя компенсацию темновых токов детекторов, необходимую для установки амплитуд сигналов детекторов на определенную начальную позицию без рентгеновского излучения, и выравнивание чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению для удаления артефактов при последующей обработке данных детекторов. На *рис. 5* представлена логическая блок-схема активного режима работы сканера.

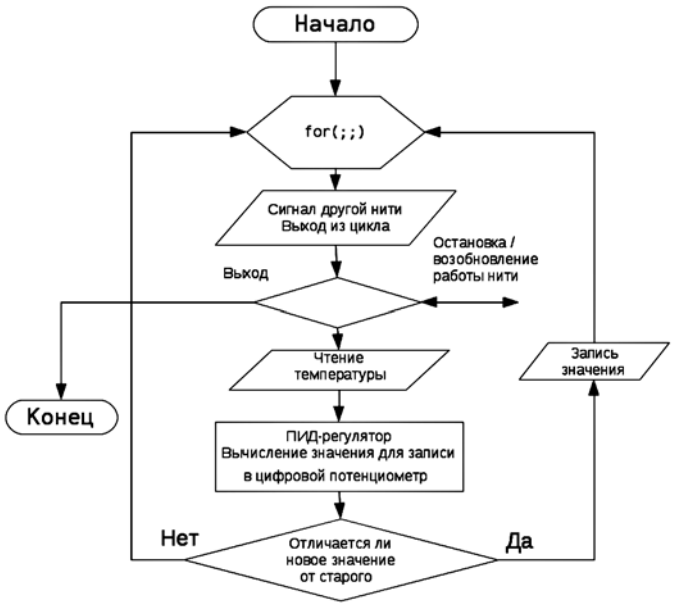

Рис. 4. Логическая блок-схема фонового режима работы сканера

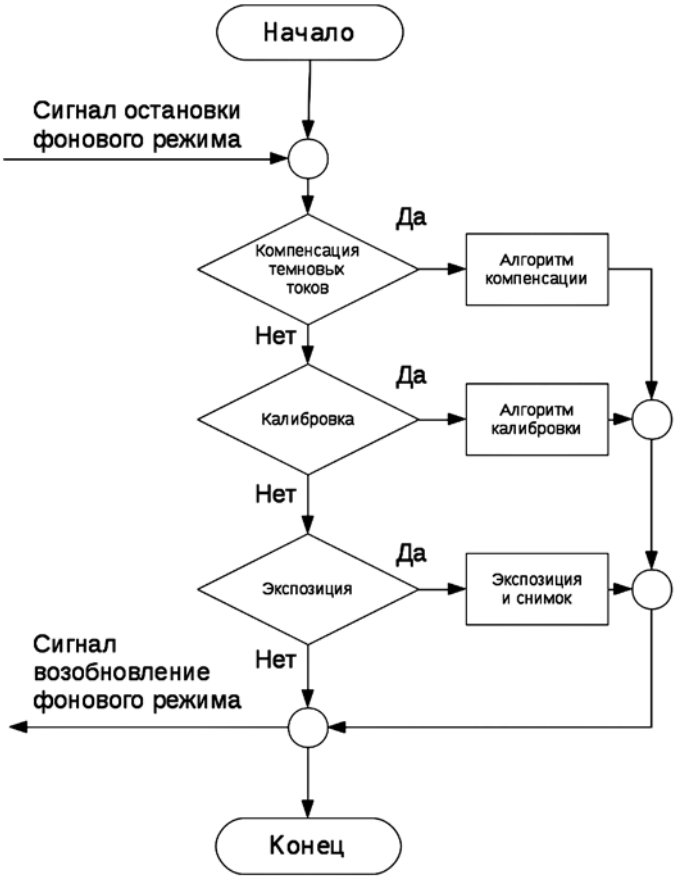

Рис. 5. Логическая блок-схема активного режима работы сканера

В случае успешного завершения экспозиции менеджер запускает считывание данных изображения со сканера. Данные при сканировании записываются в статическую память, причем для хранения одного пиксела используется 2 байта. ПЛИС «Altera», ответственная за запись данных АЦП в память, также пишет дополнительно два бита синхронизации: нулевой бит – признак первого модуля, первый бит – признак первого де-

тектора в первом модуле; таким образом передается начало строки изображения (*рис. 6*).

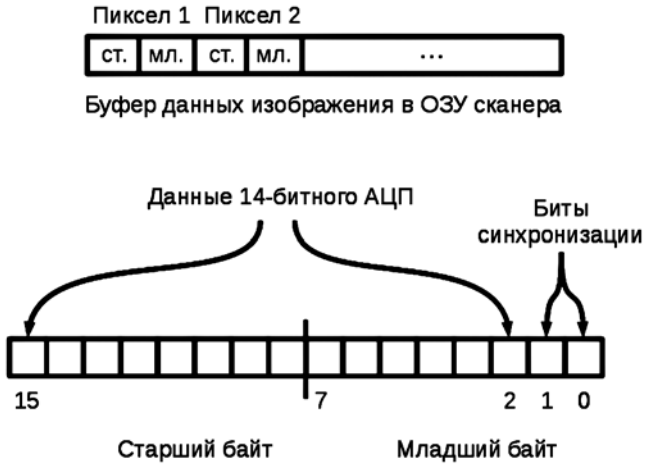

Рис. 6. Формат хранения данных изображения в ОЗУ сканера

По завершении сканирования и после считывания данных с линейки детекторов стартует нить обработки данных, производящая предварительную обработку данных, калибровку и постобработку изображения.

Описание алгоритма компенсации темновых токов

Перед началом экспозиции полупроводниковые детекторы проходят процедуру компенсации темновых токов для выравнивания разброса значений, наблюдаемых в связке детектор-КМОП-микросхема. Для этого в микросхеме для каждого детектора предусмотрены 8-разрядный регистр и схема компенсации, куда записываются в цифровом виде значения от 0 до 255. Таким образом можно менять выходной сигнал с детектора во всем диапазоне амплитуд.

Математически представим функцию отсчетов АЦП для одной сборки (КМОП-микросхема – линейка детекторов) как $f(i, j)$, где $i \in [0, 255]$ – диапазон значений цифрового кода, $j \in [1, 128]$ – координата соответствующего детектора в линейке. Пусть задано значение «B» в отсчетах АЦП, к которому необходимо привести амплитуду темновых токов детекторов (опорный темновой ток), тогда значение, записываемое в детектор с координатой k, будет определяться как

$$\arg\min_i \left[f(i, k) - B \right]$$

или

$$\arg\min_i \left\{ \sqrt{\left[f(i, k) - B \right]^2} \right\}.$$

Выполнив подобный расчет для всех детекторов, получаем набор значений для компенсации темновых токов и приведения их к одной величине.

Описание алгоритма выравнивания чувствительности

При подаче рентгеновского излучения на линейку GaAs-детекторов сигнал, считываемый с детекторов, не является одинаковым в силу как различной чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению, так и технологического разброса параметров электронного тракта внутри КМОП-микросхемы для разных детекторов. Изображение, реконструируемое на основе исходных данных, получается состоящим из полос разной яркости.

Для исправления этого эффекта выполняется выравнивание чувствительности всех детекторов к одной величине. Основой алгоритма выравнивания является передаточная функция интенсивности излучения в отсчетах АЦП $C = F(I, d)$, где I – интенсивность рентгеновского излучения на поверхности объекта; d – толщина просвечиваемого объекта; C – интенсивность излучения, зафиксированная в детекторе (отсчеты АЦП).

Для коллимированного моноэнергетического излучения зависимость определяется формулой $I = I_0 e^{-\mu \cdot x}$, где I_0 – интенсивность излучения без объекта; μ – коэффициент линейного ослабления излучения; x – толщина просвечиваемого объекта. Для излучения рентгеновской трубки, состоящего из тормозного и характеристического спектров, была использована полиномиальная зависимость вида

$$I = \sum_{i=0}^{i=4} K_i \cdot x^i,$$

где коэффициенты K полинома определяются на основе решения системы линейных алгебраических уравнений для разных интенсивностей и толщин объекта. В качестве набора интенсивностей может использоваться как калибровочный объект типа «ступеньки», так и модулирование рентгеновского излучения. Пример работы алгоритма представлен на *рис. 7*.

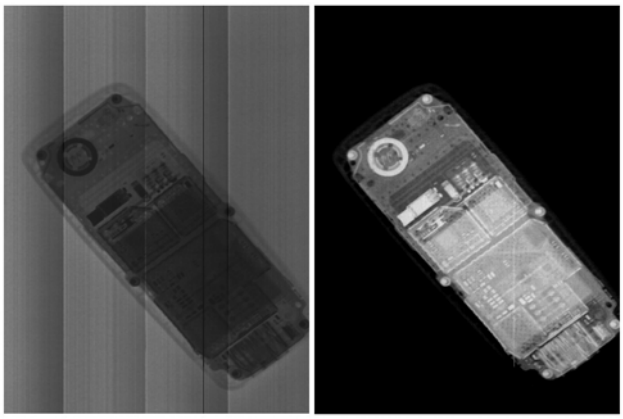

Рис. 7. Пример работы алгоритма выравнивания чувствительности детекторов. Изображение мобильного телефона (слева – до работы алгоритма; справа – после работы алгоритма)

Удаление данных неисправных детекторов

Процедура отбраковки детекторов производится до этапа выравнивания чувствительности и необходима для ликвидации артефактов изображения из-за неисправных детекторов. Алгоритм определения таких детекторов состоит из двух этапов:

- первый этап – определение детекторов с отклонением амплитуды темновых токов относительно выбранной опорной величины более чем на 10 %;
- второй этап – определение детекторов с недостаточной или запредельно высокой чувствительностью к рентгеновскому излучению.

Детектор признается негодным, если зависимость отсчетов АЦП от интенсивности не является монотонной функцией во всем диапазоне изменения интенсивности источника рентгеновского излучения. Данные, получаемые с соответствующих неработающих детекторов, заменяются на интерполированные данные соседних детекторов.

Визуализация данных

После выполнения всех процедур обработки изображения в программу управления передаются: исходные данные изображения до калибровки, данные калибровки, данные изображения после калибровки и данные после обработки. Исходные данные сохраняются для последующей правки возможных артефактов и перекалибровки. Данные после калибровки используются в случае дополнительной постобработки. На *рис. 8* представлены пример передаваемых данных и интерфейс основного окна системы управления сканером.

Заключение

В результате разработки системы управления линейкой микрополосковых арсенид-галлиевых (GaAs) детекторов и создаваемых в ГНЦ ИФВЭ на их основе рентгеновских скане-

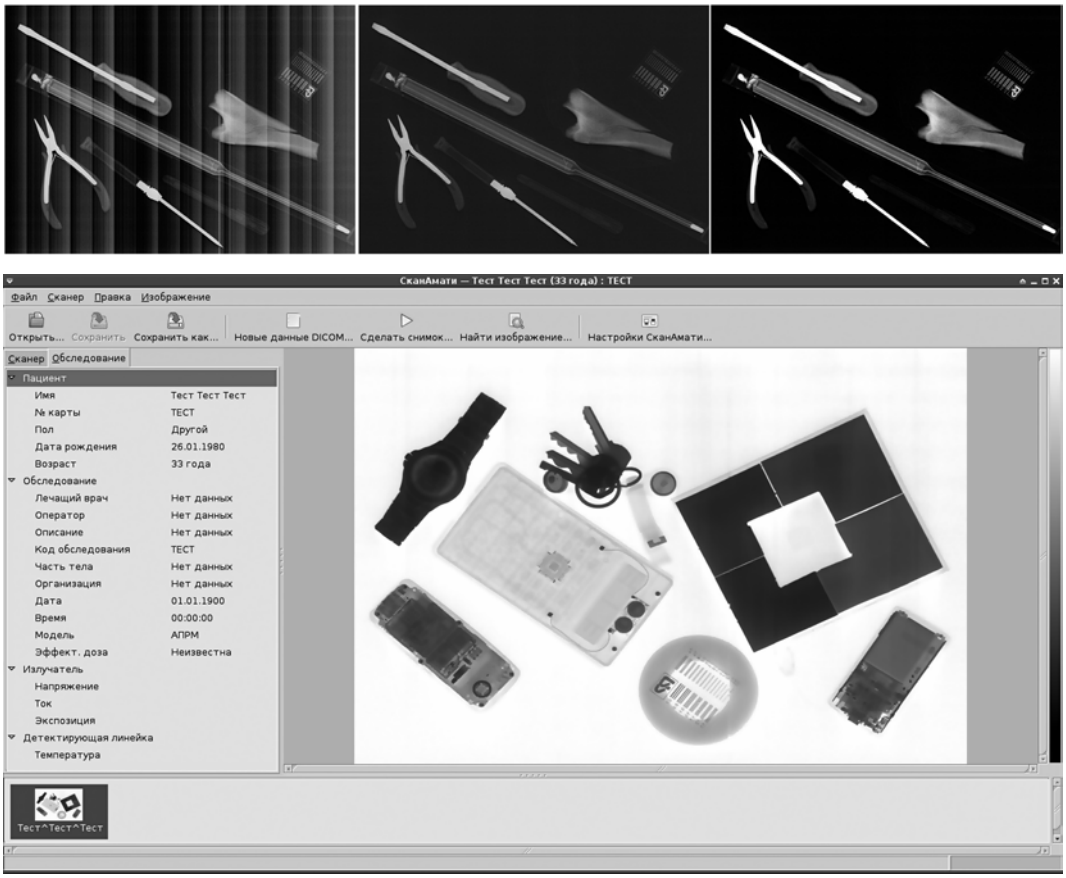

Рис. 8. Вверху – пример передаваемых данных; слева–направо: исходные данные, данные после калибровки, данные после постобработки; внизу – основное окно системы управления сканером

ров были решены на программном уровне проблемы термостабилизации линейки GaAs-детекторов и их первичной настройки на рабочий режим, разработаны процедуры программной компенсации темновых токов детекторов и выравнивания чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению, решены вопросы управления механическими узлами сканеров, реконструкции и последующей обработки изображения, хранения изображения в виде графического файла.

Список литературы:

1. *Воробьев А.П., Горохов С.А., Головня С.Н., Полковников М.К., Роднов Ю.В., Айзенштат Г.И., Толбанов О.П., Бородин Д.В., Осипов Ю.В.* Системы цифровой регистрации изображения для рентгеновских аппаратов сканирующего типа // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 132-137.
2. *Ардашев Е.Н., Воробьев А.П., Горохов С.А., Коробчук П.П., Полковников М.К.* Устройство мобильного цифрового малодозового рентгенографического аппарата / Патент РФ на полезную модель № 85284. Приоритет от 22 января 2009 г.
3. *Ardashev E.N., Gorokhov S.A., Polkovnikov M.K., Lobanov I.S., Vorobiev A.P.* A portable X-ray apparatus with GaAs linear array // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2011. A 648. S8-S11.
4. *Ардашев Е.Н., Воробьев А.П., Горохов С.А., Полковников М.К.* Настройка и характеристики линейки GaAs детекторов рентгеновского сканера // Медицинская физика. Декабрь 2012 / http://web.ihep.su/library/pubs/prep2012/12-21-w.html.
5. *Бородин Д.В., Осипов Ю.В., Шушкевич Н.А. и соавт.* Многоканальная микросхема первичного преобразования сигнала с рентгеновских чувствительных элементов // Прикладная физика. 2003. № 1. С. 154-156.
6. http://www.gtkmm.org.
7. http://www.dcmtk.org.
8. http://www.imagemagick.org.
9. http://freecode.com/projects/ccmath.
10. http://www.gnu.org/software/gsl/.
11. http://www.postgresql.org/.
12. http://www.pqxx.org.
13. http://ingenium.home.xs4all.nl/dicom.html.
14. *Åström K.J., Hägglund T.* PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. – Research Triangle Park, NC: ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 1995.

Сергей Александрович Горохов,
научный сотрудник,
Михаил Константинович Полковников,
научный сотрудник,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ,
г. Протвино, Московская обл.,
e-mail: sergey.gorokhov@ihep.ru