

На правах рукописи

Мьо Ньюнт Вин

**Электронные модули системы сбора и обработки данных
для цифровых гамма-камер**

Специальность: 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2007 г.

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Алюшин М.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бацких Г.И.

кандидат технических наук
Яковлев Г.В.

Ведущая организация: НИИ ТАП

Защита состоится 21 мая 2007г. в 16-30 часов на заседании диссертационного совета Д212.130.02 в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете) по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31. (тел 323-91-67).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан «___» апреля 2007 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 115409, г.Москва, Каширское шоссе, д.31, Ученый совет МИФИ

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук, профессор

Г. В. Петров

Общая характеристика диссертации

Актуальность работы

Гамма-камера - основной инструмент современной радионуклидной диагностики [5, 6]. Гамма-камеры предназначены для визуализации и исследования кинетики радиофармпрепаратов (РФП) во внутренних органах и физиологических системах организма пациента с целью ранней диагностики онкологических, сердечно-сосудистых и других заболеваний человека.

Одной из основных современных тенденций развития медицинских гамма-камер является увеличение потока полезной информации без увеличения дозы вводимого пациенту РФП. Решение этой проблемы позволит сократить время исследования, улучшить качество получаемого изображения, а в ряде случаев - расширить функциональные возможности гамма-камеры. Среди известных на практике подходов к решению данной проблемы следует выделить:

- увеличение площади поля зрения детектора, переход от детекторов с полем зрения круглой формы к прямоугольной,
- увеличение числа фотодетекторов и числа каналов обработки данных,
- использование двухдетекторных и многодетекторных гамма-камер,
- использование специализированных коллиматоров с большим коэффициентом пропускания гамма-квантов,
- использование программных и электронных средств обработки наложенных импульсов.

Получение изображения обследуемого органа в гамма-камере осуществляется на основе алгоритмов восстановления координат точки поглощения гамма-кванта в большом кристалле сцинтиллятора (~600мм x 800мм). Для регистрации сцинтилляций обычно применяют ФЭУ с достаточно большим окном (40мм – 80мм). При этом точное восстановление координат сцинтилляции становится возможным за счет учета баланса мощности световых потоков, зарегистрированных группой ФЭУ.

Существующие в настоящее время электронные системы обработки данных в гамма-камере позволяют восстанавливать координаты сцинтилляций с различной точностью [3, 4]. Максимальная точность восстановления координат соответствует центральной зоне детектора, а наихудшая – краевой зоне детектора, соизмеримой с радиусом окна ФЭУ. Данный эффект в первую очередь обусловлен нарушением баланса световых потоков в кристалле сцинтиллятора для ФЭУ, расположенных по периметру детектора. Частичным решением данной проблемы является использование дополнительных малогабаритных ФЭУ, располагающихся по периметру детектора для восстановления баланса световых потоков. Однако данное решение приводит к усложнению и удорожанию всей системы, а также увеличивает число типов используемых компонентов.

В этой связи исследование и создание комплекса методических и технических средств, дающих возможность правильно обрабатывать

координаты сцинтилляций при нарушении баланса световой мощности, является актуальной в настоящее время задачей. Актуальность решения данной задачи обусловлена также необходимостью создания отечественных образцов современной медицинской техники, что предполагает разработку и производство соответствующих электронных узлов и устройств.

Анализ литературных источников, а также патентной документации [4-6] не позволил выявить подходов к решению указанной задачи, кроме использования дополнительных фотодетекторов.

В данной работе для решения задачи правильного определения координат предлагается подход на основе использования методов предсказания, который дает возможность предсказать (оценить) значения световой мощности для искаженных, либо потерянных световых потоков.

Реализация данного подхода на практике связана с решением ряда научных, практических и экспериментальных задач.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании, разработке и реализации электронных модулей системы сбора и обработки данных для цифровых гамма-камер на основе подхода, предполагающего использование методов предсказания для обработки искаженных данных, а также методических и технических средств создания таких модулей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Аналитический обзор и анализ патентной документации и научно-технической информации с целью выявления структурных и алгоритмических решений, использующихся при построении электронных систем обработки данных в современных гамма-камерах. Анализ применяемой элементной базы и классификация гамма-камер на основании критерия степень интеграции системообразующих электронных компонентов, включая аналоговые, аналого-цифровые и цифровые ИМС.
2. Исследование и классификация основных характеристик алгоритмов обработки данных в гамма-камерах, а также применяемых методов коррекции.
3. Исследование структуры и характеристик аналоговых, аналого-цифровых и цифровых гамма-камер с целью выделения обобщенной структурной схемы электронной системы обработки данных, а также набора используемых функциональных преобразований.
4. Анализ и классификация структур детекторов для гамма-камер. Анализ механизма определения координат в детекторе гамма-камеры. Анализ АПХ отдельных фотодетекторов, АПХ всего детектора гамма-камеры.
5. Классификация возможных конструкций одномерных, двумерных и трехмерных детекторов в современной гамма-камере. Создание одномерных и двумерных моделей электронных узлов обработки данных в гамма-камере. Разработка методики параметризации моделей.

6. Разработка унифицированных электронных модулей, ориентированных на аналоговую и цифровую обработку данных в современной гамма-камере высокой эффективности.
7. Создание лабораторного прототипа электронной системы обработки данных в периферийной зоне детектора. Проведение лабораторных испытаний системы. Создание тестового и диагностического программного обеспечения, инструментальных программных и аппаратных диагностических средств.

Научная новизна работы заключается в решении следующих задач:

1. Разработана методика проектирования электронных узлов обработки данных на основе созданных одномерных и двумерных моделей. Сущность методики состоит в структурной оптимизации последовательности функциональной обработки сигналов от детектора гамма-камеры для достижения высокой эффективности обработки полезных событий, в том числе – с искаженным энергетическим спектром в периферийной зоне детектора на основе методов предсказания.
Поставленная цель достигается за счет формализации процесса разработки структурных и схемотехнических решений на основе созданных библиотечных наборов моделей основных функциональных узлов обработки, ориентированных на использование в САПР Cadence и Mentor Graphics. Применение методики позволяет снизить трудоемкость и общее время проектирования.
2. Созданы одномерные и двумерные модели электронных узлов обработки данных в гамма-камере, позволяющие учитывать краевые эффекты в детекторе, в первую очередь обусловленные потерей части светового потока в кристалле сцинтиллятора. Использование предложенных моделей на практике дает возможность повысить эффективность регистрации полезных событий с искаженным энергетическим спектром. Модели ориентированы на использование в едином цикле проектирования электронных узлов в рамках САПР Cadence, либо Mentor Graphics.
3. Предложена методика параметризации одномерных и двумерных моделей на основе проведения планированного эксперимента.

Практическая значимость работы обусловлена:

1. Разработаны высокоэффективные электронные модули электронных систем обработки данных для универсальных и специализированных гамма-камер, позволяющие по сравнению с известными способами обработки данных на 15-25% повысить площадь поля зрения, а также на 10-20% повысить скорость счета благодаря обработке импульсов в периферийной зоне детектора на основе реализации методов предсказания.
2. Разработан лабораторный 19-канальный прототип электронной системы обработки данных для гамма-камеры, позволяющий провести изучение эффектов, связанных с обработкой событий при искажении световых потоков, регистрируемых ФЭУ.

3. Созданы тестовые, диагностические и отладочные аппаратные и программные средства, а также частные методики диагностики и тестирования электронных модулей и их функциональных узлов.

4. Разработаны встроенные тестовые, диагностические и отладочные аппаратно-программные средства на уровне электронной системы гамма-камеры.

5. Разработано специализированное программное обеспечение для работы с электронными модулями гамма-камеры.

Реализация результатов

Созданные электронные модули обработки данных дали возможность сформулировать требования на разработку следующей версии встраиваемых электронных модулей со структурой SiP (System in Package), либо SoC (System on Chip) в рамках САПР Cadence и Mentor Graphics.

Основные результаты диссертации использовались:

- при выполнении хоздоговора №83-3-003-070 «Исследование и разработка структурной схемы цифрового модуля обработки данных для отечественной гамма-камеры на основе высокопроизводительных субмодулей NLS», 2004г.,

- при выполнении госбюджетной НИР №02-Г-003-013 «Создание математической модели для реконструкции трехмерного изображения с использованием быстродействующих нейросетей реального времени, изучение прототипов модулей для обработки данных», 2006г.,

- в учебном процессе при модернизации лекционного курса и лабораторных работ по курсу «Проектирование электронных систем» на кафедре Электроники МИФИ для групп А9-04, А9-05, И8-03.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика проектирования электронных узлов обработки данных на основе структурной оптимизации последовательности функциональной обработки сигналов от детектора гамма-камеры для достижения высокой эффективности обработки полезных событий, в том числе – с искаженным энергетическим спектром в периферийной зоне детектора на основе методов предсказания.
2. Разработанные одномерные и двумерные модели электронных узлов обработки данных в гамма-камере, позволяющие учитывать краевые эффекты в детекторе, в первую очередь обусловленные потерей части светового потока в кристалле сцинтиллятора.
3. Методика параметризации одномерных и двумерных моделей на основе проведения планированного эксперимента.
4. Электронные модули для обработки данных в цифровой гамма-камере, реализующие предложенный подход к обработке импульсов.
5. Разработанные тестовые, диагностические и отладочные аппаратные и программные средства, а также частные методики диагностики и тестирования электронных модулей и их функциональных узлов.

Апробация диссертации

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались на:

- научных сессиях МИФИ (Москва, 2004г., 2007г.),
- конференции «Молодежь и наука» научной сессии МИФИ (Москва, 2005г., 2006г., 2007г.),
- на российских научно-технических конференциях «Электроника, микро- и нано- электроника» (2004г. – г. Нижний Новгород, 2005г. – г.Вологда, 2007г. – г. Пушкинские горы).

Всего по теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Основные результаты диссертации изложены в печатных работах [1-11].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Диссертация вместе с приложениями содержит 152 страницы печатного текста, в том числе 17 таблиц, 71 рисунок и библиографию, включающую 149 наименований.

В приложении 1 к диссертации предоставлены результаты анализа патентной документации США по современным PET-сканерам.

В приложении 2 представлены результаты анализа научно-технической информации по современным гамма-камерам.

Содержание диссертации

Во введении на основании проведенного анализа современного состояния и перспектив развития гамма-камер сформулированы основные требования к новому поколению высокоэффективных систем, обладающих улучшенной совокупностью технико-экономических параметров. Среди основных требований выделены:

- высокая эффективность регистрации гамма-квантов в периферийной зоне детектора,
- возможность обработки наложенных в пространстве и во времени импульсов,
- возможность работать при скоростях счета до $10 \cdot 10^6$ импульсов в секунду,
- широкое использование заказных БИС и СБИС со структурой SOC,
- ориентация на переход к полупроводниковым фотодетекторам, например, твердотельным ФЭУ – SiPMТ,
- высокая технологичность и невысокая стоимость гамма-камеры.

В первой главе рассмотрены результаты анализа патентной и научно-технической информации по современным гамма-камерам для ведущих стран мира - США, Канады, Франции, Бельгии, Израиля, Дании, Японии, Республики Корея и Нидерландов [6]. На рис.1 показано изменение числа патентов по годам по данной теме. На рис.2 показана зависимость числа патентов, поданных в различных странах за последние 5 лет по современным гамма-камерам.

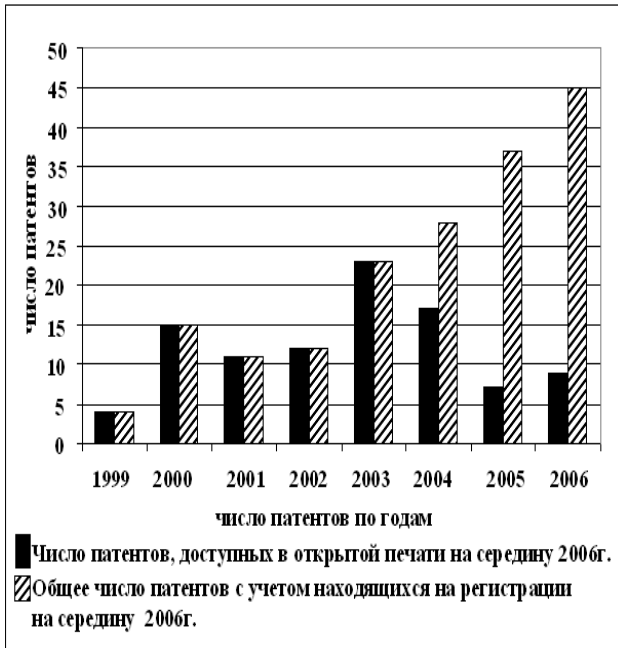


Рис.1

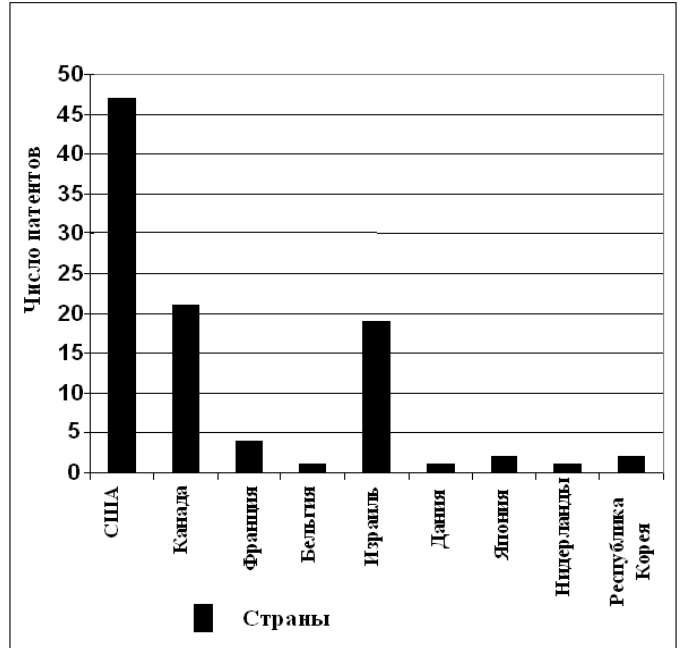


Рис.2

Анализ патентов показал, что большое внимание в патентах уделяется таким проблемам, как повышение: скорости счета гамма-камеры за счет обработки наложенных импульсов; пространственного разрешения гамма-камер за счет учета параметра DOI (Depth of Interaction); быстродействия гамма-камеры за счет кластерной обработки данных.

Вопросам использования полупроводниковых детекторов, кодированной апертуры, сложных кристаллов сцинтилляторов и спецпроцессоров в современной гамма-камере судя по имеющимся в открытой печати информации уделяется недостаточно внимания.

Несмотря на большое число патентов, направленных на решение указанных выше задач, связанных с обработкой данных для улучшения качества получаемого изображения, а также с коррекцией данных в современной гамма-камере, представленные в патентной документации решения в основном носят частный характер, позволяющими получить выигрыш только в определенных условиях применения.

Во второй главе дан анализ современного состояния и перспектив развития гамма-камер. Рассмотрены особенности построения и область применения гамма-камер. Дана классификация гамма-камер в соответствии с основными этапами их развития. Проанализирована обобщенная структура аналоговых, аналого-цифровых и цифровых гамма-камер. Рассмотрены перспективы использования многоканальных специализированных микросхем для построения современных гамма-камер.

Выделены основные классы гамма-камер – аналоговые, аналого-цифровые и цифровые. Показано, что для аналоговых гамма-камер в качестве алгоритма восстановления координат используется алгоритм взвешенного суммирования Энгера. Для данного класса гамма-камер характерна коррекция аналоговых данных. При этом необходимо выполнить нормировку полученных значений для координатных сигналов X и Y на общую энергию импульса E :

$$X' = X/E \quad \text{и} \quad Y' = Y/E,$$

что обеспечивает правильное определение координат на основе алгоритма Энгера при обработке координатных сигналов X и Y событий, имеющих различную энергию.

Для аналоговых и аналого-цифровых гамма-камер выделены обобщенные структурные схемы обработки данных. Среди основных недостатков алгоритма Энгера выделены: невозможность обработки множественных одновременных событий в случае использования кристалла сцинтиллятора большого размера, искажение координатных сигналов X и Y в периферийной зоне, соизмеримой с полушириной окна используемого фотодетектора, невозможность обработки наложенных во времени импульсов.

На рис.3 показана обобщенная структурная схема обработки данных для цифровой гамма-камеры.

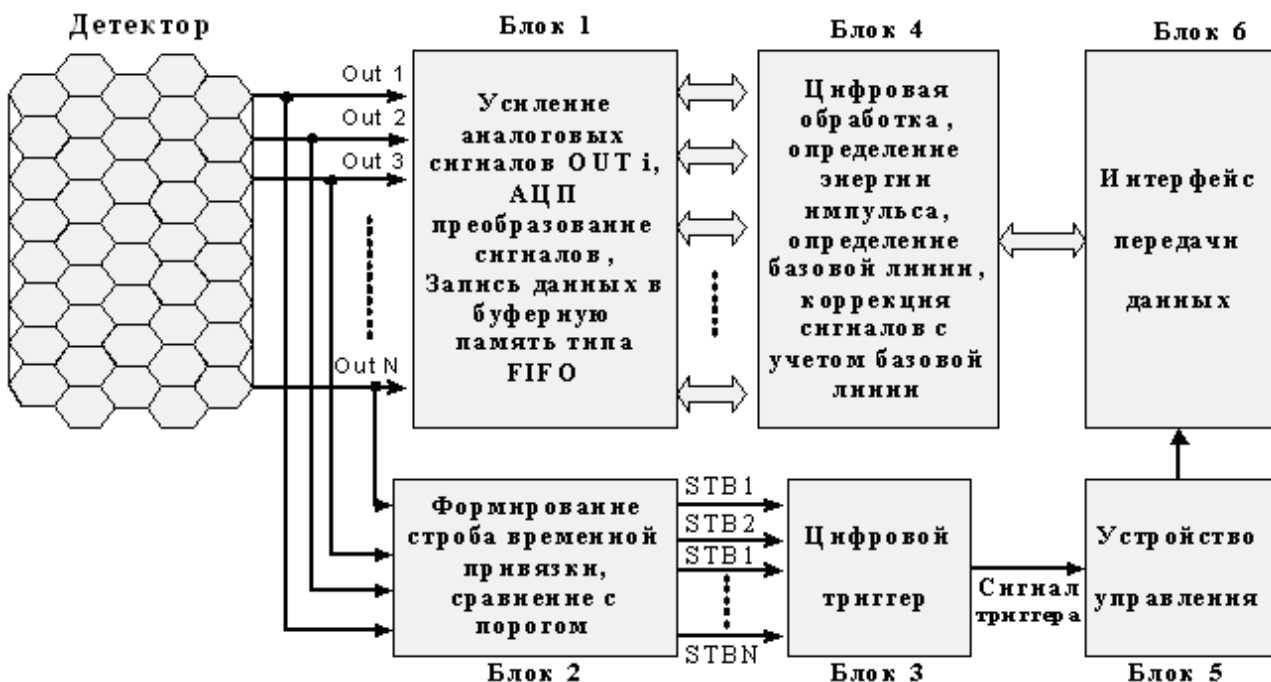


Рис.3. Обобщенная структурная схема обработки данных для цифровой гамма-камеры

Основными функциями электронной системы цифровой гамма-камеры являются:

- усиление и первичная обработка аналоговых сигналов OUT_i , $i=1, \dots, N$, их АЦП преобразование, запись данных в буферную память типа FIFO (блок 1);
- сравнение импульсов с заданным порогом, формирование стробов временной привязки, временная привязка стробов к временной сетке (блок 2),
- анализ стробов временной привязки на совпадение, принятие решения о полезном, либо ложном событии, формирование сигнала триггера (блок 3),
- цифровая обработка импульсов, определение энергии импульсов, определение и коррекция базовой линии (блок 4),
- синтез управляющих временных диаграмм, стробов начала и завершения операций, инициализация режимов тестирования и диагностики (блок 5),
- формирование пакетов с данными, передача данных в РС, обеспечение интерфейса с базой данных, поддержка тестовых и диагностических интерфейсов (блок 6).

Выделены блоки 1-4, которые необходимо использовать для реализации подхода к обработке импульсов с искаженными характеристиками.

На основе результатов анализа существующих электронных систем обработки данных в гамма-камере сформулированы актуальные научные, практические и экспериментальные задачи.

В третьей главе представлен анализ основных функциональных узлов позиционно-чувствительных детекторов для гамма-камер. Рассмотрены АПХ ФЭУ. Анализируется механизм определения координат X и Y в детекторе гамма-камеры. Выявлены недостатки АПХ существующих детекторов гамма-камер, ограничивающие возможность точного определения координат X и Y в периферийной зоне детектора. Дана классификация конструкций детекторов гамма-камер. Показана возможность улучшения чувствительности детекторов в периферийной зоне. Рассмотрены перспективы использования

разрабатываемых методических и электронных средств обработки импульсов для создания детектора RICH в международном физическом эксперименте CBM (Германия, Дармштадт, GSI).

В третьей главе представлен анализ механизмов возникновения искажений координатных сигналов применительно к 19-канальному детектору гамма-камеры, показанному на рис.4.

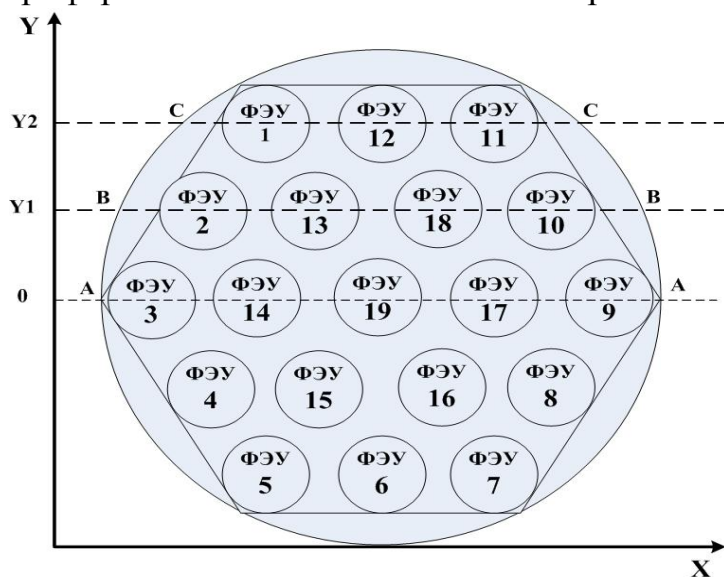


Рис.4.

Для этой цели рассмотрены процессы формирования координатных сигналов для сечений А-А, В-В и С-С. На рис.5 показан вариант формирования координатных сигналов для сечения В-В. На рис.5 использованы следующие обозначения: F2, F13, F18, F10 – выходы аналоговых блоков 1 (рис.3), содержащих предварительные усилители PreAmp2, PreAmp13, PreAmp18, PreAmp10; АПХ2, АПХ13, АПХ18, АПХ10 – пространственные характеристики соответственно для ФЭУ2, ФЭУ13, ФЭУ18, ФЭУ10; АПХ2⁺, АПХ13⁺, АПХ18⁺, АПХ10⁺ – взвешенные АПХ каждого ФЭУ (АПХ ФЭУ умноженные на величину соответствующей координаты – X2⁺, X13⁺, X18⁺, X10⁺), используемые для формирования координатно-зависимого сигнала АПХ⁺; АПХ⁺, АПХ⁻ – суммарные позиционные сигналы детектора; АПХ2⁻, АПХ13⁻, АПХ18⁻, АПХ10⁻ – взвешенные АПХ ФЭУ (АПХ ФЭУ умноженные на величину соответствующей координаты – X2⁻, X13⁻, X18⁻, X10⁻), используемые для формирования координатно-зависимого сигнала АПХ⁻; АПХД, ERRD – соответственно результирующие АПХ детектора и функция ошибки гамма-камеры относительно сечения В-В; E_{ВВ} – суммарный энергетический сигнал детектора.

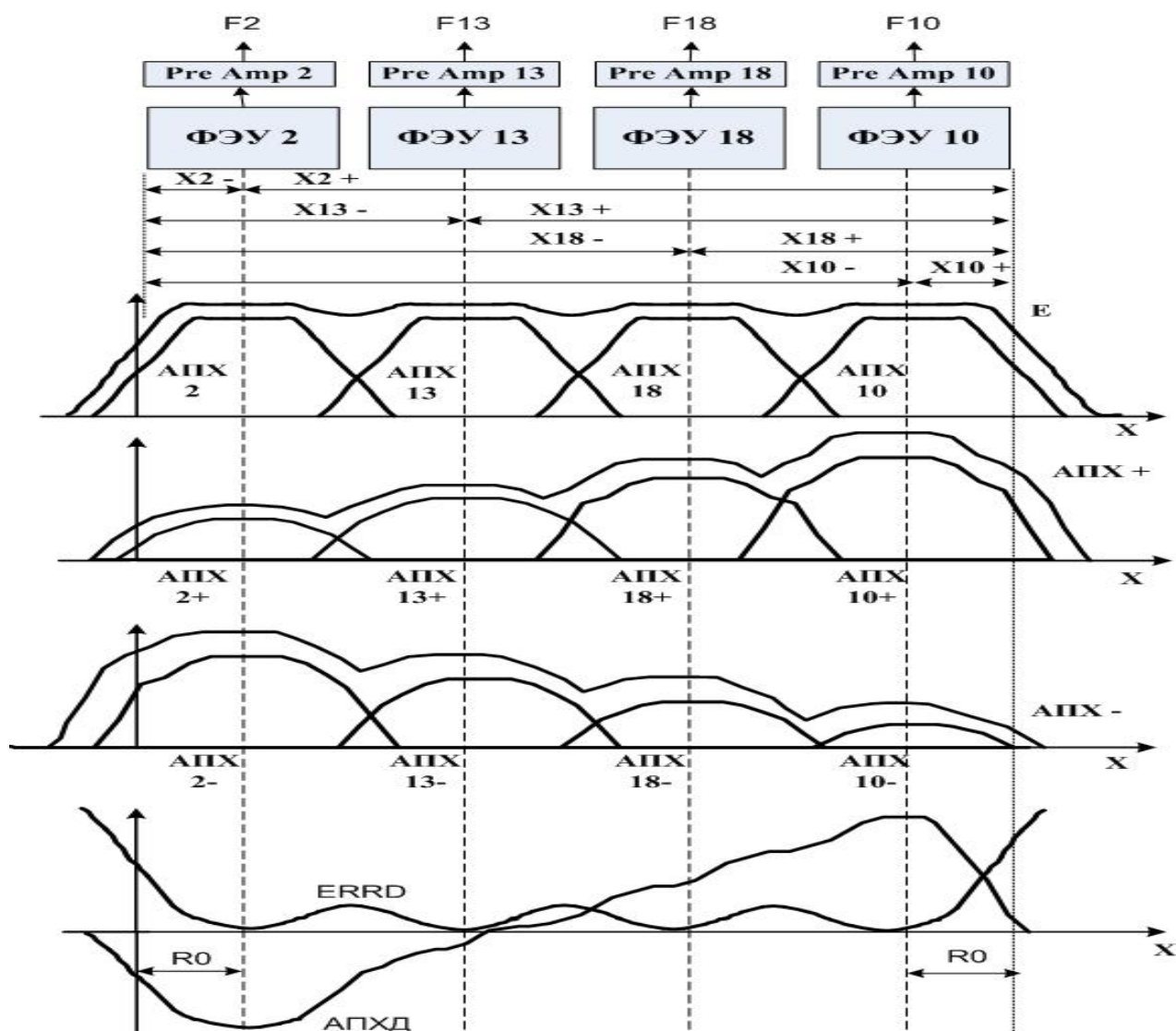


Рис.5. Механизм формирования координатных сигналов

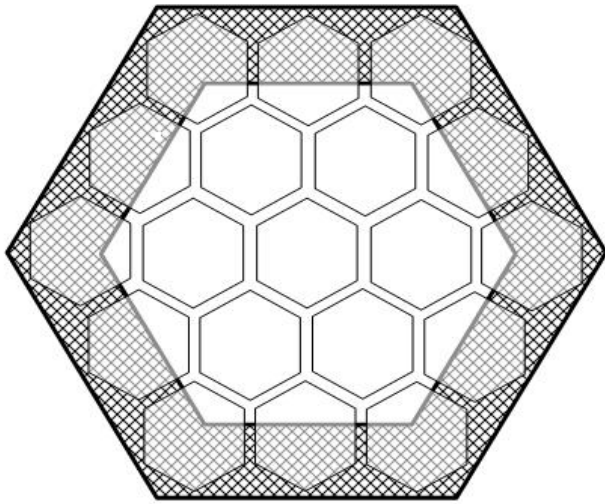


Рис.6.

За счет искажения световых потоков в периферийной зоне в детекторе возникает область с плохим разрешением, показанная на рис.6, ширина которой соизмерима с радиусом фотодетектора.

В работе предложен механизм компенсации искажений сигналов, основанный [11] на предсказании значения недостающей компоненты.

На рис.7 показан механизм определения координат сцинтилляции X и Y на основе анализа баланса световых потоков.

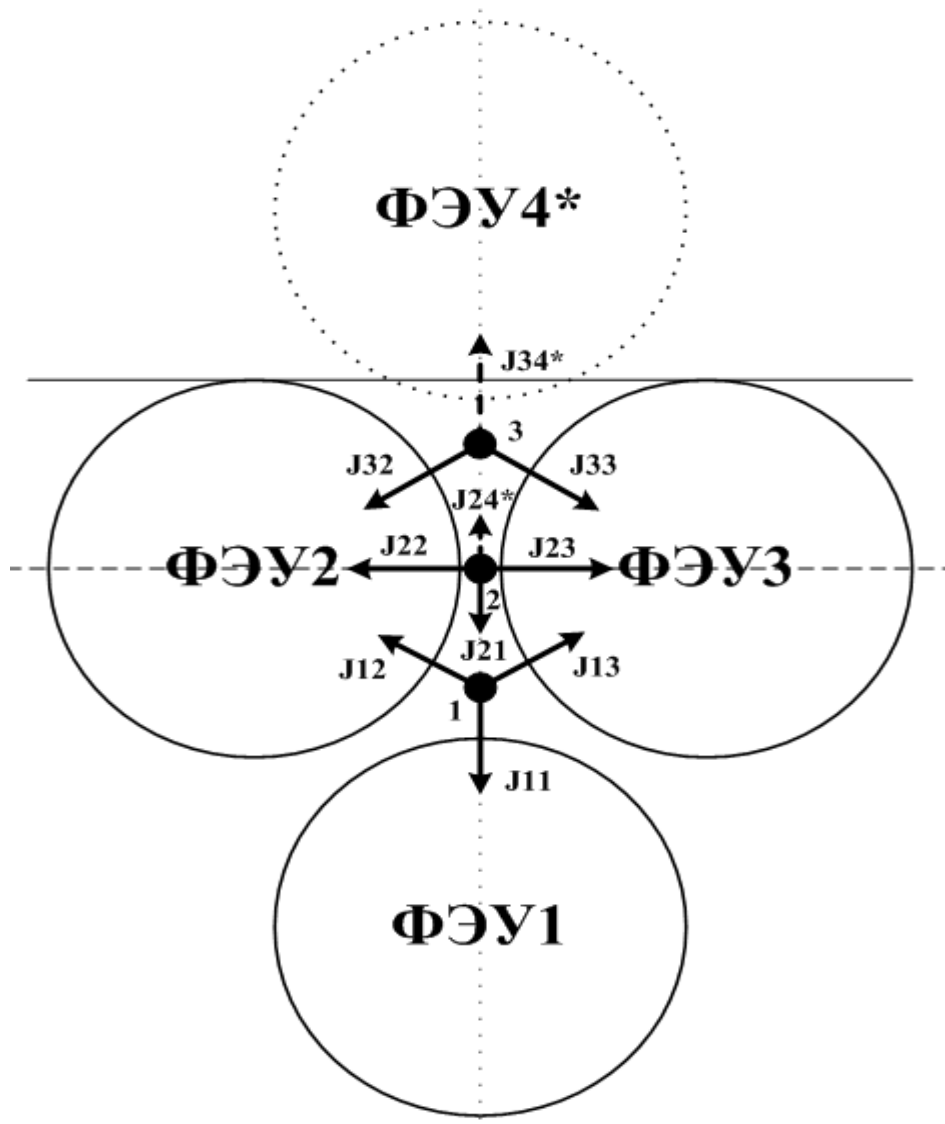


Рис.7. Механизм определения координат сцинтилляции X и Y на основе анализа баланса световых потоков

Сцинтилляция 1 находится в центральной зоне и определение ее координат X и Y осуществляется на основе анализа баланса сигналов $J11$, $J12$ и $J13$. События 2 и 3 находятся на краю центральной зоны, и в традиционных электронных системах для их обработки используются соответственно сигналы $J21$, $J22$, $J23$ и $J32$, $J33$. Ошибка в определении координат X и Y обусловлена отсутствием (либо сильным искажением) компонент $J24^*$ и $J34^*$ по причине отсутствия ФЭУ4*. На рис.8 показан энергетический спектр сигналов для событий 1, 2 и 3. События 1 и 2 характеризуются полной энергией. Событий 3 характеризуется неполной зарегистрированной энергией, что приводит к искажениям координат.

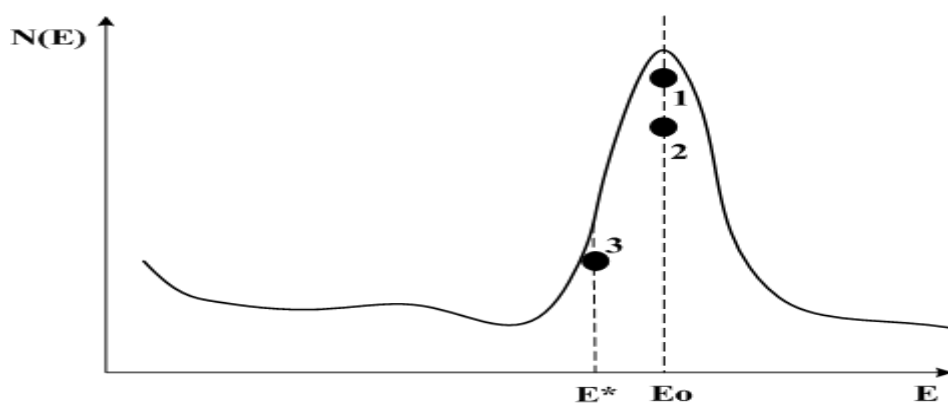


Рис.8. Энергетический спектр сигналов для событий 1, 2 и 3

Для реализации предлагаемого в работе подхода необходимо осуществить определение недостающих сигналов, необходимых для правильного расчета координатных сигналов X и Y [9]. Для этого в работе предлагается использовать специальный модуль, выполняющий функции предсказания значений недостающих сигналов. На рис.9 представлена структурная схема электронного узла, осуществляющего эти функции.

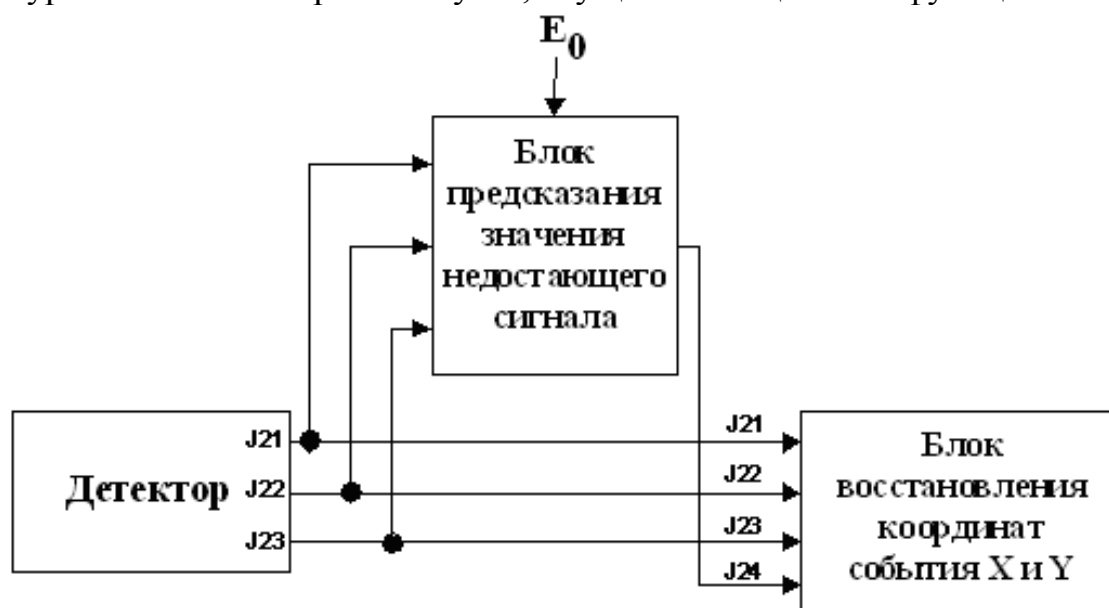


Рис.9. Структурная схема электронного узла восстановления координат

В работе предложен ряд структурных и схмотехнических вариантов реализации блока предсказания. Наиболее простая реализация блока предполагает использование операции вычитания для определения недостающего сигнала J_{24} [9]:

$$J_{24} = J(E_0) - J_{21} - J_{22} - J_{23},$$

где $J(E_0)$ – эквивалент электрического сигнала, регистрируемого одним ФЭУ в случае попадания в него всего светового потока от сцинтилляции.

Использование данного подхода дает возможность использовать для восстановления координат X и Y событий с нарушенным балансом светового потока те же аппаратно-программные средства, что и для событий в центральной части детектора.

В третьей главе дана классификация структур детекторов, для которых выявлены зоны целесообразного использования блока предсказания [9].

Для реализации подхода, предполагающего использование блока предсказания, были разработаны экспериментальные версии электронных модулей обработки данных для цифровой гамма-камеры.

В четвертой главе представлены результаты разработки одномерных 1D и двумерных 2D моделей электронных узлов [8, 10], ориентированных на использование в системе моделирования OrCAD. Модели предназначены для исследования эффектов обработки сигнала при искажении светового потока.

Предложена методика проектирования аналоговых узлов обработки данных с учетом реальных характеристик детекторов. Дан перечень разработанных 1D и 2D моделей. Рассматривается методика параметризации созданных одномерных и двумерных моделей.

Одномерные 1D модели предназначены для решения следующего класса задач:

- выбор оптимального с точки зрения чувствительности и разрешающей способности аналогового узла из созданных библиотечных наборов для обработки данных в центральной зоне детектора,
- исследование линейности преобразования при использовании различных фотодетекторов,
- исследование и выбор наиболее эффективного варианта схмотехнической и структурной реализации блока предсказания в зависимости от типа используемых детекторов гамма-камеры,
- исследование АПХ отдельного канала при использовании фотодетектора заданного типа,
- оценка точности определения энергии импульса E ,
- определение точности временной привязки при формировании строка начала события.

Для решения указанных выше задач был разработан ряд одномерных 1D моделей, учитывающих характеристики фотоприемника, включая параметры оптического тракта передачи данных. Разработанные модели ориентированы на использование в составе САПР OrCAD. В табл.1 приведен перечень разработанных одномерных 1D моделей.

Перечень разработанных одномерных 1D моделей

№	Код модели	Название разработанной модели
1	1D-G-1	Одноуровневая модель фотодетектора (ФЭУ) для определения сигнала $X(Y)$, использующая сосредоточенный источник света.
2	1D-G-2	Одноуровневая модель фотодетектора (ФЭУ) для определения сигнала $X(Y)$, использующая распределенный источник света.
3	1D-G-3	Двухуровневая модель кластера из двух расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения сигнала $X(Y)$, использующая сосредоточенный источник света.
4	1D-G-4	Двухуровневая модель кластера из двух расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения сигнала $X(Y)$, использующая распределенный источник света.
5	1D-G-5	Двухуровневая модель кластера из трех расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения сигнала $X(Y)$, использующая сосредоточенный источник света.
6	1D-G-6	Двухуровневая модель кластера из трех расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения сигнала $X(Y)$, использующая распределенный источник света.
7	1D-G-7	Двухуровневая модель кластера из семи расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения сигнала $X(Y)$, использующая сосредоточенный источник света.
8	1D-G-8	Двухуровневая модель кластера из семи расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения сигнала $X(Y)$, использующая распределенный источник света.

На рис.10 показан результат моделирования АПХ отдельного ФЭУ детектора гамма-камеры, полученный при использовании системы OrCAD и созданных моделей. Для определения параметров моделей была разработана методика, основанная на проведении планированного эксперимента.

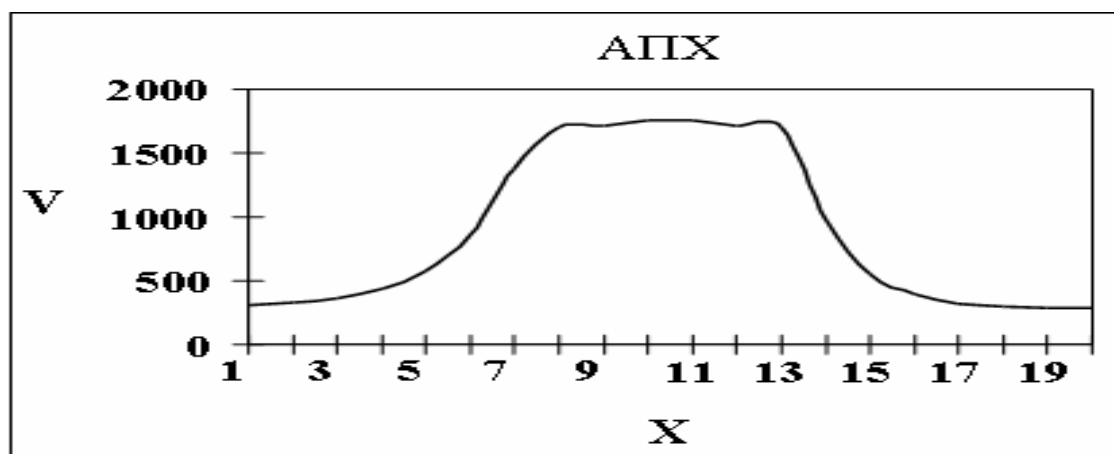


Рис.10. Результат моделирования АПХ отдельного ФЭУ детектора гамма-камеры

Двумерные 2D модели дают возможность исследовать характеристики электронных узлов при одновременном изменении координат X и Y световой вспышки (сцинтилляции) и предназначены для решения следующих задач:

- выбор оптимального с точки зрения чувствительности и разрешающей способности аналогового узла из созданных библиотечных наборов для обработки данных в центральной, периферийной и угловой зонах детектора,
- исследование линейности преобразования при использовании различных фотодетекторов,
- определение оптимальной структуры детектора классов 2D и 3D в зависимости от числа используемых детекторов данного типа,
- исследование АПХ группы фотодетекторов заданного типа,
- оценка точности определения энергии импульса E,
- оценка точности временной привязки при формировании строка начала события.

Для решения указанных выше задач был разработан ряд двумерных 2D моделей, учитывающих характеристики фотоприемника, включая параметры оптического тракта передачи данных. Разработанные модели ориентированы на использование в составе САПР OrCAD.

Разработанные модели учитывают распределенный характер воздействия света, а также краевые эффекты в сцинтилляторе и световоде детектора. В табл.2 приведен список разработанных двумерных 2D моделей.

Таблица 2

Список разработанных двумерных 2D моделей

№	Код модели	Название разработанной модели
1	2D-G-1	Двухуровневая модель одного фотодетектора (ФЭУ) для одновременного определения координатных сигналов X и Y, использующая сосредоточенный источник света.
2	2D-G-2	Двухуровневая модель одного фотодетектора (ФЭУ) для одновременного определения координатных сигналов X и Y, использующая распределенный источник света.
3	2D-G-3	Двухуровневая модель кластера из двух расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения координатных сигналов X и Y, использующая распределенный источник света.
4	2D-G-4	Двухуровневая модель кластера из трех (2+1) расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения координатных сигналов X и Y, использующая распределенный источник света.
5	2D-G-5	Двухуровневая модель кластера из четырех (2x2) расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения координатных сигналов X и Y, использующая распределенный источник света.
6	2D-G-6	Двухуровневая модель кластера из шести (3x2) расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения координатных сигналов X и Y, использующая распределенный источник света.

7	2D-G-7	Двухуровневая модель кластера из семи (2+3+2) расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения координатных сигналов X и Y, использующая распределенный источник света.
8	2D-G-8	Двухуровневая модель кластера из девяти (3x3) расположенных рядом фотодетекторов (ФЭУ) для определения координатных сигналов X и Y, использующая распределенный источник света.

На рис.11 и рис.12 показаны два уровня описания фрагмента (только для двух ФЭУ) модели 2D-G-5, предназначенной для исследования АПХ ФЭУ в периферийной зоне детектора гамма-камеры при использовании блока предсказания.

На рис.13 показан результат моделирования АПХ двух соседних ФЭУ детектора гамма-камеры, полученный при использовании системы OrCAD. Для определения параметров моделей была разработана методика, основанная на проведении планированного эксперимента.

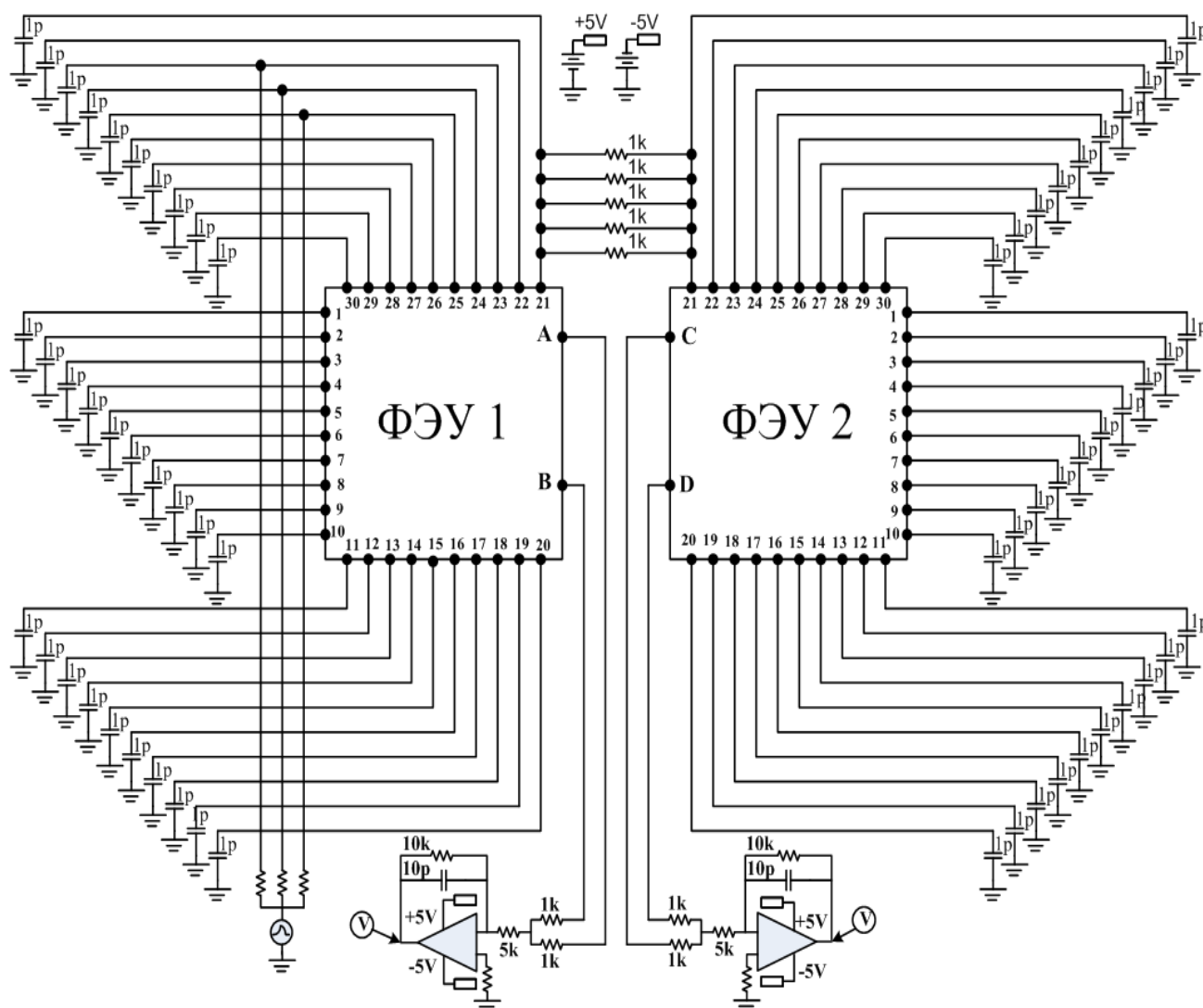


Рис.11. Второй уровень двухуровневой модели 2D-G-5

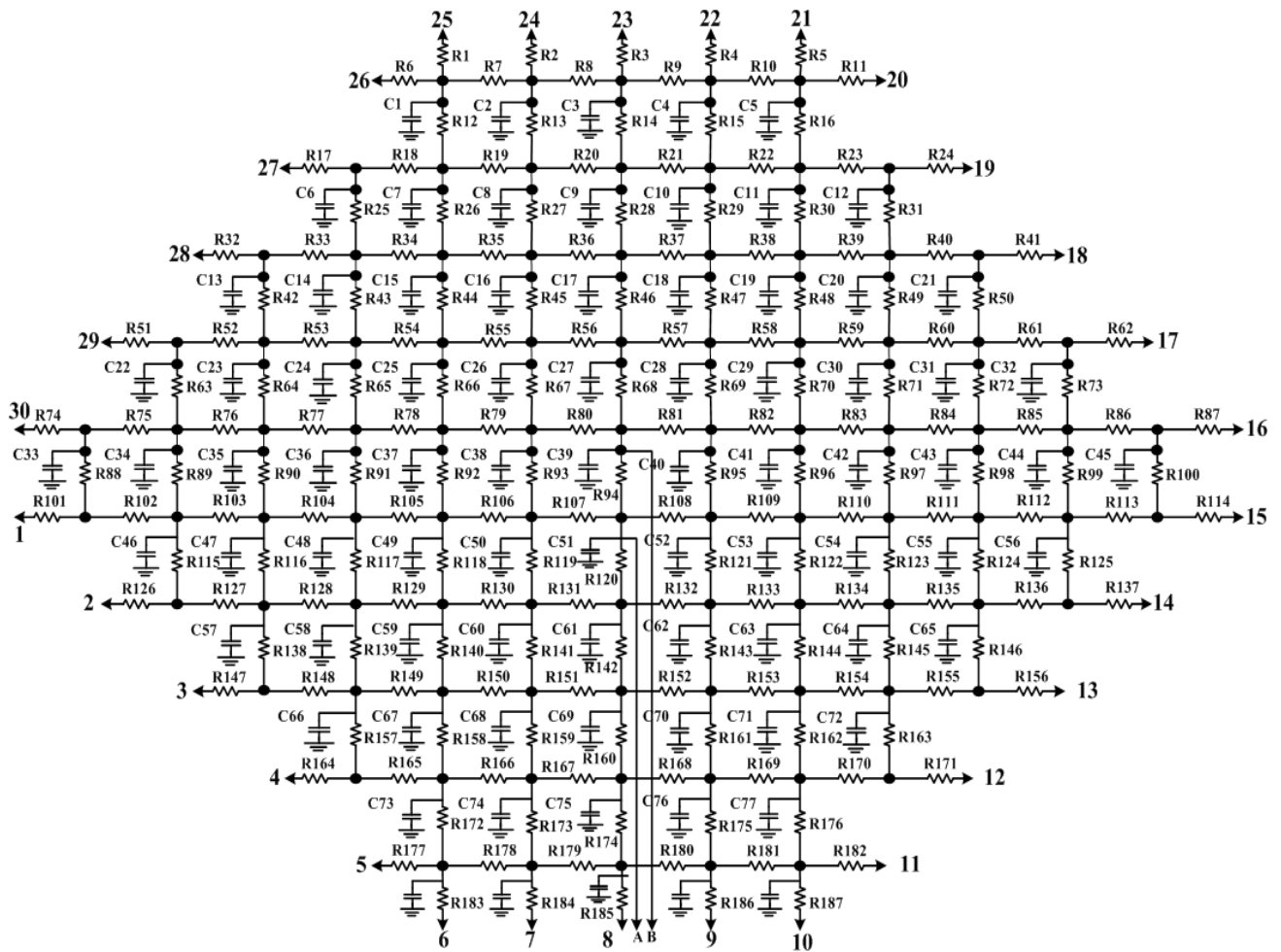


Рис.12. Первый уровень двухуровневой модели 2D-G-5

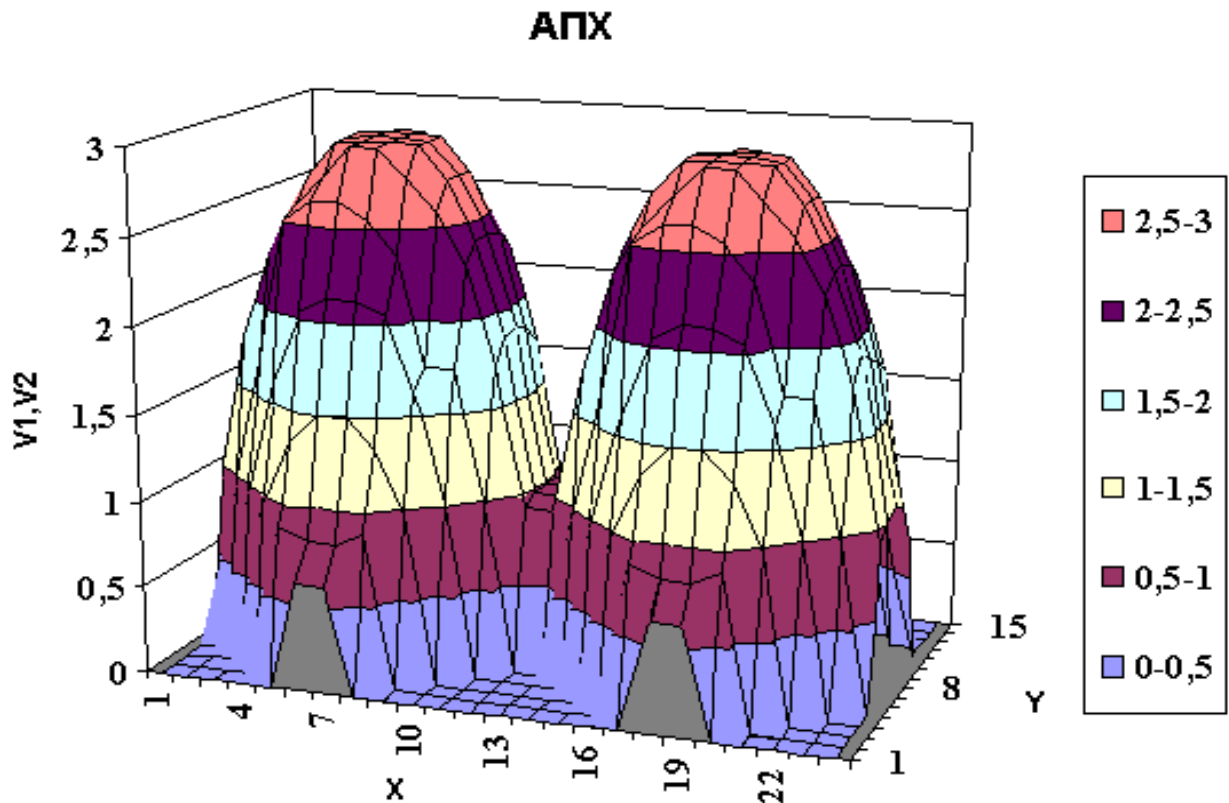


Рис.13. Результат моделирования АПХ двух соседних ФЭУ

Разработанная методика параметризации моделей дает возможность «настроить» созданные одномерные 1D и двумерные 2D модели для использования в процессе проектирования конкретных электронных узлов. На рис.14 показаны основные задачи, решаемые в процессе параметризации моделей, в соответствии с разработанной методикой [9-11].

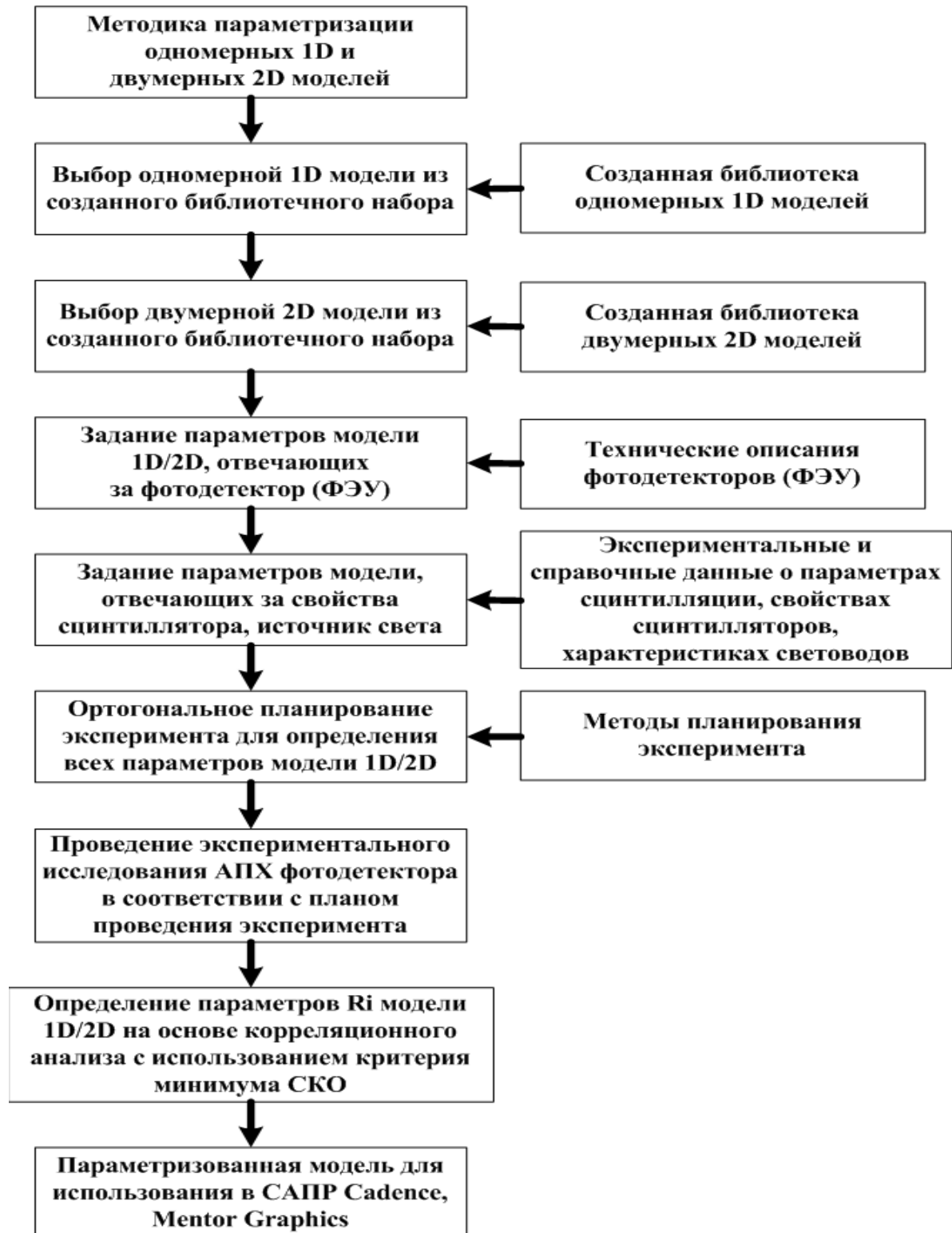


Рис.14. Основные задачи, решаемые в процессе параметризации моделей, в соответствии с разработанной методикой

Основными решаемыми задачами являются:

1. Выбор одномерной 1D модели из созданного библиотечного набора моделей 1D-G-1, ... ,1D-G-8.
2. Выбор двумерной 2D модели из созданного библиотечного набора моделей 2D-G-1, ... ,2D-G-8.
3. Задание параметров 1D/2D модели, отвечающих за фотодетектор (ФЭУ) на основе технического описания применяемого фотодетектора.
4. Задание параметров модели, отвечающих за свойства источника света, сцинтиллятора, световода. Для этой цели используются экспериментальные и справочные данные о характеристиках используемых материалов, параметрах сцинтилляции.
5. Ортогональное планирование эксперимента по определению параметров выбранной 1D/2D модели. Для планирования эксперимента используются известные методы планирования эксперимента с целью минимизации числа итераций.
6. Проведение экспериментального исследования АПХ реальных детекторов в соответствии с планом проведения эксперимента.
7. Определение параметров R_i выбранной 1D/2D модели на основе корреляционного анализа при использовании критерия минимума СКО. Определение погрешности воспроизведения АПХ фотодетектора с помощью параметризованной таким образом 1D/2D модели.
8. Получение параметризованной модели для использования в САПР Cadence, Mentor Graphics.

Предложенная в работе классификация возможных конструкций детектора, а также созданные библиотеки одномерных 1D моделей и двумерных 2D моделей позволили разработать методику проектирования электронных узлов обработки данных для гамма-камеры, реализующую подход с использованием блока предсказания.

На рис.15 показаны основные задачи, решаемые при проектировании электронных устройств обработки данных на основе созданных моделей.

Основными решаемыми задачами являются:

1. Выбор класса детектора гамма-камеры в соответствии с предложенной классификацией возможных конструкций детекторов.
2. Выбор 1D модели для данного класса детекторов на основе созданной библиотеки одномерных 1D моделей.
3. Выбор 2D модели для данного класса детекторов на основе созданной библиотеки двумерных 2D моделей.
4. Моделирование характеристик аналоговых узлов в САПР Cadence, либо Mentor Graphics.
5. Анализ полученных характеристик проектируемых электронных узлов. В случае несоответствия полученных характеристик необходимо повторное выполнение пунктов методики 2-4.
6. Разработка схемотехнического проекта электронного узла.
7. Топологическое проектирование печатной платы (PCB), заказной микросхемы (ASIC).

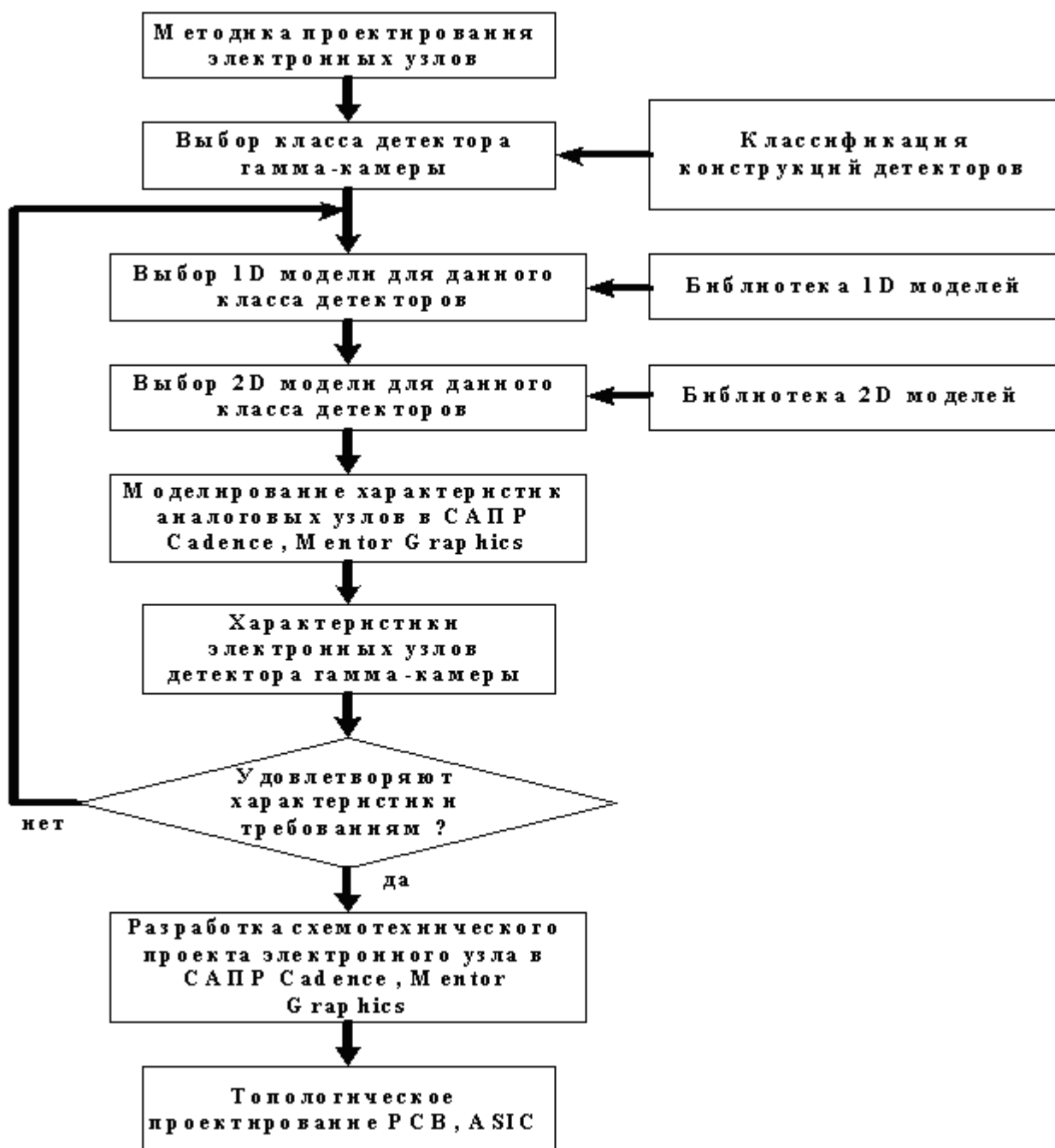


Рис.15. Методика проектирования электронных узлов обработки данных

В пятой главе представлены основные результаты по проектированию аналоговых и цифровых электронных модулей для современной гамма-камеры. Разработка электронных модулей была осуществлена на основе разработанных методик проектирования, а также созданных моделей функциональных узлов.

Представлены результаты разработки лабораторного стенда для исследования характеристик электронных модулей гамма-камеры.

Рассмотрена структура разработанного тестового и диагностического программного обеспечения. Анализируются полученные экспериментальные результаты.

Разработанные электронные модули предназначены для построения широкого класса универсальных и специализированных гамма-камер на основе вакуумных и полупроводниковых фотодетекторов.

Все разработанные электронные модули имеют встроенную систему контроля и диагностики (Slow Control System) [1, 2, 7], предназначенную для выполнения следующих основных функций:

- верификация структуры многоканальной системы сбора и обработки данных гамма-камеры,
- начальная конфигурация программируемых узлов обработки данных,
- тестирование протоколов передачи данных на всех уровнях системы.

В табл.3 приведен перечень основных разработанных электронных модулей.

Таблица 3

Разработанные электронные модули

№ пп	Тип электронного модуля	Размер модуля	Код модуля	Назначение модуля
1.	Четырехканальный модуль аналоговой и цифровой обработки данных в детекторе гамма-камеры	VME 3U	VME 3U GR-4-1	Модуль аналоговой и цифровой обработки данных в детекторе гамма-камеры
2.	Встраиваемый 16-канальный модуль обработки данных для детектора гамма-камеры	Заказной для монтажа в детекторе	PXI-GR-16-2	Модуль для многоканальной обработки данных фотодетектора
3.	Встраиваемый интерфейсный модуль LPT	VME 3U*	VME 3U-GR-LPT1	Передача данных в персональный компьютер
4.	Встраиваемый 8-канальный модуль аналоговой и цифровой обработки данных детектора	VME 3U*	VME 3U-GR-8-3	Многоканальная обработка данных детектора гамма-камеры
5.	Интерфейсный, диагностический и тестовый модуль	VME 3U*	VME 3U-GR-TST1	Диагностика и тестирование разработанных модулей

VME 3U*- модуль не имеет стандартных лицевых планок и разъема к шине

Модуль VME 3U GR-4-1 предназначен для аналоговой и цифровой обработки данных в детекторах гамма-камер. Четырехканальный модуль VME 3U GR-4-1 был разработан на основе созданной методики проектирования, представленной в главе 4. При моделировании узлов модуля VME 3U GR-4-1 были использованы созданные одномерные модели 1D-G-3, 1D-G-4, 1D-G-5, 1D-G-6 и двумерные модели 2D-G-5, 2D-G-6, 2D-G-8.

Разработанный модуль позволяет обрабатывать полезные события в детекторе гамма-камеры с минимальной периферийной зоной, составляющей 10% от ее обычной площади. Для гамма-камер с характерным размером

сцинтиллятора 600мм x 800мм и размером окна фотодетекторов порядка 70мм использование модуля VME 3U GR-4-1 дает возможность увеличить эффективную площадь сцинтиллятора до 580мм x 780мм. Выигрыш в увеличении полезной площади детектора для данного случая составляет 17%.

Достижение положительного эффекта достигнуто за счет коррекции сигналов при использовании блока предсказания.

Разработанный электронный модуль VME 3U GR-4-1 (рис.16) удовлетворяет всем основным предъявленным требованиям:

- содержит встроенную систему диагностики и тестирования,
- позволяет обрабатывать импульсы длительностью от 100нс до 1000нс,
- позволяет скорректировать чувствительность в периферийной зоне детектора гамма-камеры,
- допускает объединение фотодетекторов в двумерные блоки в соответствии с возможной структурой детектора,
- ориентирован на обработку потока импульсов до $(1-10) \cdot 10^6$ импульсов в секунду,
- имеет встроенные средства настройки на АПХ использующихся фотодетекторов (ФЭУ),
- модуль VME 3U GR-4-1 имеет программируемый внешний интерфейс, позволяющий обслуживать как стандартные шины типа VME, так и полностью заказные.

Достигнутая совокупность эксплуатационных характеристик позволяет рассматривать модуль VME 3U GR-4-1 как один из наиболее перспективных для построения электронных систем современных гамма-камер.



Рис.16. Экспериментальный образец модуля VME 3U GR-4-1

Разработанный модуль PXI-GR-16-2 (рис.17) ориентирован на встраиваемые применения и позволяет обрабатывать полезные события в детекторе гамма-камеры с минимальной периферийной зоной, составляющей 10% от ее обычной площади. Для гамма-камер с характерным размером сцинтиллятора 600мм x 800мм и размером окна фотодетекторов порядка 70мм использование модуля PXI-GR-16-2 дает возможность увеличить эффективную площадь сцинтиллятора до 580мм x 780мм. Выигрыш в увеличении полезной площади детектора для данного случая составляет 17%.

Достижение положительного эффекта достигнуто за счет доопределения величины недостающей компоненты, обусловленной краевыми эффектами в периферийной зоне детектора.



Рис.17. Экспериментальный образец модуля PXI-GR-16-2

Для вторичной цифровой обработки сигналов предлагается использовать унифицированные модули сигнальной обработки, широко использующиеся для построения многоканальных систем обработки в таких областях, как ядерная физика, гидроакустика [1-2].

Созданное тестовое и диагностическое оборудование дает возможность осуществить:

- полный цикл тестирования и диагностики аналоговых и цифровых узлов разработанных электронных модулей,
- программирование и верификацию электронных узлов, реализованных на основе ПЛИС ALTERA и XILINX,
- программирование и верификацию электронных узлов, реализованных на основе микроконтроллеров типа ATMEL AVR,

- отладку основных протоколов обмена данными, включая протоколы TCP/IP и UDP для сетей Ethernet.

На рис.18 показано восстановленное с помощью созданных электронных модулей и программного обеспечения тестовое изображение. Энергетический спектр сигналов показан в правой части рабочего окна. Площадь периферийной зоны для данного случая не превышает 6% от общей площади детектора.

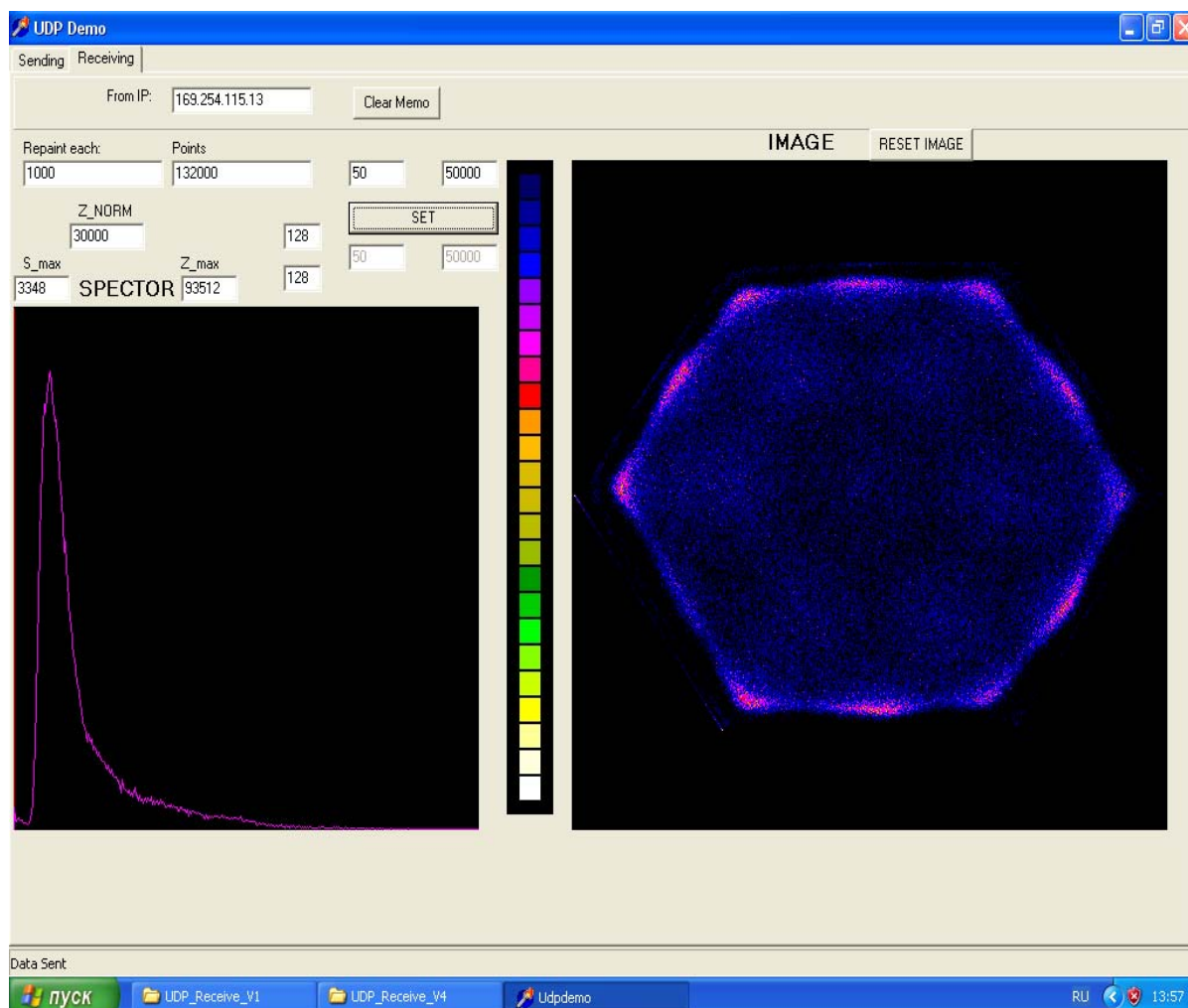


Рис.18. Восстановленное тестовое изображение

Тестовое и диагностическое программное обеспечение реализовано на языке Delphi 6.0 и ориентировано на работу с операционной системой Windows XP. Разработанное программное обеспечение имеет блочную структуру. Основные интерфейсные функции обмена данными вынесены в библиотеки DLL, что облегчает модернизацию программного обеспечения.

Основные выводы и результаты

Основным научным результатом диссертации является создание и развитие методов проектирования электронных узлов многоканальных систем обработки данных в современных гамма-камерах высокой эффективности на основе подхода, предполагающего использование принципов предсказания для обработки искаженных данных, что позволяет увеличить поле зрения

применяемых детекторов, повысить скорость счета событий в периферийной зоне, а также обеспечить более высокие технико-экономические показатели на уровне всей системы.

В ходе выполнения исследований по теме диссертации были получены следующие научные результаты:

1. Дана классификация перспективных конструкций позиционно-чувствительных детекторов для гамма-камер высокого разрешения.
2. Разработана методика проектирования аналоговых узлов обработки данных гамма-камеры с учетом реальных характеристик применяемых детекторов, а также современных средств автоматизированного проектирования узлов РЭА.
3. Разработаны одномерные 1D и двумерные 2D модели входных узлов электронных блоков гамма-камер, учитывающие распределенный характер воздействия света, а также искажения в периферийной зоне детектора.
4. Разработаны модели функциональных блоков, позволяющие определить основные характеристики гамма-камеры на этапе проектирования.
5. Разработана методика параметризации моделей входных аналоговых блоков гамма-камеры на основе проведения планированного эксперимента.

В ходе работы над диссертацией были решены следующие практические задачи:

1. Разработаны высокоэффективные электронные модули электронных систем обработки данных для универсальных и специализированных гамма-камер, позволяющие по сравнению с известными способами обработки данных на 15-25% повысить площадь поля зрения, а также на 10-20% повысить скорость счета благодаря обработке импульсов в периферийной зоне с искаженным энергетическим спектром.
2. Разработан лабораторный 19-канальный прототип электронной системы обработки данных для современной гамма-камеры.
3. Созданы тестовые, диагностические и отладочные аппаратные и программные средства, а также частные методики диагностики и тестирования электронных модулей и их функциональных узлов.
4. Разработаны встроенные тестовые, диагностические и отладочные аппаратно-программные средства на уровне электронной системы гамма-камеры.
5. Разработано специализированное программное обеспечение для работы с электронными модулями гамма-камеры.

Использование разработанных электронных модулей и программных средств дает возможность на 15-25% повысить площадь поля зрения, а также на 10-20% повысить скорость счета благодаря обработке импульсов в периферийной зоне с искаженным энергетическим спектром.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах

1. Мьо Ньюнт Вин, Беспалова Н.М. Многоканальный модуль обработки гидроакустической информации на основе сигнального процессора ADSP21061L // Научная сессия МИФИ -2004. Сборник научных трудов. В 15 томах. Т.1.-М.: МИФИ, 2004. с. 206-207.
2. Мьо Ньюнт Вин, Алюшин М.В. Многоканальный модуль обработки гидроакустической информации на основе сигнального процессора ADSP21061L // Электроника, микро и наноэлектроника. Сб. научн. Трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М: МИФИ, 2004. -с. 246-247.
3. Мьо Ньюнт Вин. Способ и устройство для улучшения чувствительности гамма-камеры // Научная сессия МИФИ -2006. Сборник научных трудов. В 16 томах. Т.16. Конференция «Молодежь и наука» М.: МИФИ, 2006.-с. 94-95.
4. Мьо Ньюнт Вин. Современное состояние и перспективы развития гамма-камеры // Научная сессия МИФИ -2007. Сборник научных трудов. В 17 томах. Т.17. Конференция «Молодежь и наука» М.: МИФИ, 2007.-с. 84-85.
5. Мьо Ньюнт Вин. Разработка модели блока ФЭУ для исследования алгоритмов восстановления координат события в современной гамма-камере для системы OrCAD version 10.0 // Научная сессия МИФИ -2007. Сборник научных трудов. В 17 томах. Т.17. Конференция «Молодежь и наука» М.: МИФИ, 2007.-с.87-88.
6. Мьо Ньюнт Вин. Повышение пространственного разрешения гамма-камеры для лабораторных животных при использовании сцинтилляционной матрицы кристаллов // Научная сессия МИФИ -2007. Сборник научных трудов. В 17 томах. Т.17. Конференция «Молодежь и наука» М.: МИФИ, 2007.-с.93-94.
7. Мьо Ньюнт Вин. Разработка спецпроцессора реального времени для современной гамма-камеры на основе модуля ADP160QPCI // Научная сессия МИФИ -2007. Сборник научных трудов. В 17 томах. Т.1. М.: МИФИ, 2007.-с.158-159.
8. Мьо Ньюнт Вин, Алюшин М.В. Разработка модели блока ФЭУ для исследования алгоритмов восстановления координат события в современной гамма-камере для системы OrCAD // Известия вузов Электроника. №3, 2007.-С.93-94.
9. Мьо Ньюнт Вин, Алюшин М.В. Классификация конструкций детекторов в современных гамма-камерах// Электроника, микро и наноэлектроника. Сб. научн. трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М: МИФИ, 2007. -с. 45-48.
10. Мьо Ньюнт Вин, Алюшин М.В. Разработка 1D и 2D моделей для электронных узлов гамма-камеры// Электроника, микро и наноэлектроника. Сб. научн. трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М: МИФИ, 2007. -с. 49-53.
11. Мьо Ньюнт Вин, Алюшин М.В. Разработка методики проектирования электронных узлов гамма-камеры// Электроника, микро и наноэлектроника. Сб. научн. трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М: МИФИ, 2007. -с. 56-59.

