

На правах рукописи

Мьят Вин Тун

**Базовые электронные модули для построения РЕТ-сканера
высокого разрешения на основе
позиционно-чувствительных фотодетекторов**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2007г.

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

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бабаян Р.Р.

кандидат технических наук
Лейбович И.Д.

Ведущая организация: ФГУП «Научно-исследовательский
институт импульсной техники» (НИИИТ)

Защита состоится 21 мая 2007г. в 15-00 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

В настоящее время в мире наблюдается рост числа PET-сканеров в медицинских учреждениях. Бурное развитие PET томографии обусловлено тем, что с каждым годом появляется большое число новых радиофармпрепаратов (РФП), использование которых открывает новые горизонты применения данного метода лучевой диагностики. Все крупные зарубежные производители медицинского диагностического оборудования разрабатывают и выпускают PET-сканеры. Существующие PET-сканеры в России современны, но их недостаточно. В основном используются зарубежные системы. Создание современных PET-сканеров отечественного производства является актуальной в настоящее время задачей.

Проведенный анализ современного состояния и перспектив развития PET-сканеров [4, 8] позволил сформулировать основные требования к новому поколению систем, предполагающих широкое использование специализированных многоканальных СБИС со структурой системы на кристалле (SOC), новых сцинтилляционных материалов типа LYSO, а также многоанодных (МА), позиционно-чувствительных (ПЧ) ФЭУ и полупроводниковых детекторов, в том числе – твердотельных кремниевых ФЭУ. Среди основных требований следует выделить:

- равномерная чувствительность во всем рабочем объеме сканера,
- возможность обработки импульсов для временного окна порядка 1нс,
- возможность определения времени пролета – TOF,
- возможность учета глубины взаимодействия для кристаллов сцинтиллятора с поперечными размерами не более 1мм x 1мм,
- использование технологии временных меток,
- высокая технологичность и невысокая стоимость сканера, особенно, ориентированного на отечественный рынок.

Проведенный анализ патентной документации и научно-технической информации показал, что применяемые на практике варианты построения электронных узлов обработки данных ПЧ ФЭУ в PET-сканерах в основном базируются на структурных и схемотехнических решениях, рекомендованных фирмами-производителями. Для данных решений характерен ряд недостатков, ограничивающих функциональные возможности ПЧ ФЭУ: нелинейная и неоднозначная АПХ в периферийной зоне ПЧ ФЭУ; потеря чувствительности в угловых зонах прибора; наличие «мертвых зон» между соседними фотодетекторами при их расположении в виде матрицы.

Создание электронных узлов обработки данных, получаемых от ПЧ ФЭУ, способных обрабатывать полезные события в периферийных и угловых зонах детектора, позволит повысить эффективность работы PET-сканера, а также снизить стоимость всей системы. Отсутствие в открытой печати полной информации об электронных узлах, применяемых в PET-сканерах, обуславливает актуальность разработки отечественных электронных узлов для PET-сканеров высокого разрешения на современной элементной базе.

Разработка аналоговых и цифровых электронных узлов для современных PET-сканеров нового поколения становится возможной на основе композиционного подхода [4, 6, 8, 10, 11], предполагающего совместное моделирование как электронной части функционального узла обработки данных [9, 12], так и оптического тракта передачи сигнала, включая распространение светового потока в кристалле сцинтиллятора, световоде, корпусе детектора (ФЭУ), а также в самом детекторе. При этом для композиционного моделирования предполагается использовать унифицированные программные средства моделирования типа системы ORCAD, включенной в САПР Cadence, либо аналогичные средства моделирования для САПР Mentor Graphics.

Проведенные аналитический обзор и анализ существующих и перспективных конструкций PET-сканеров позволили сформулировать основные научные и практические задачи, решение которых в первую очередь сдерживает создание современных PET-сканеров высокого разрешения, в том числе – мини PET-сканеров для лабораторных животных.

Общие задачи проектирования PET-сканеров на современном этапе:

1. Достижение предельного пространственного разрешения при минимальной дозе вводимого РФП, в том числе - за счет учета так называемого параметра DOI (Depth of Interaction), а также повышения эффективности регистрации полезных событий в периферийной зоне.
2. Преимущественное использование блочно-модульных решений для электронных модулей на всех этапах проектирования, обеспечивающих простоту модернизации системы при использовании нового поколения элементной базы, а также возможность создания семейства PET-сканеров с различной совокупностью технико-экономических параметров, в том числе – мини PET-сканеров для лабораторных животных.
3. Полное и эффективное использование возможностей наиболее дорогостоящих компонентов системы, в первую очередь – ПЧ ФЭУ, матриц сцинтилляторов, световодов. Преимущественное использование унифицированных структурных и схемотехнических решений при создании аналоговых и цифровых электронных узлов обработки.

Целью диссертационной работы является создание и развитие методов проектирования электронных узлов многоканальной системы обработки данных для современного PET-сканера высокого разрешения на основе композиционного подхода к созданию моделей узлов, а также разработка базового набора электронных модулей, позволяющих повысить эффективность обработки полезных событий при использовании ПЧ ФЭУ и обеспечить более высокие технико-экономические показатели на уровне всей системы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзор и анализ патентной и научно-технической информации по РЕТ-сканерам на предмет выделения перспективных технологических и технических решений, используемых ведущими фирмами – разработчиками РЕТ-сканеров, в первую очередь – в области средств и методов обработки данных для получения предельного пространственного разрешения.
2. Анализ общей структуры современных РЕТ-сканеров высокого разрешения, принципов действия РЕТ-сканеров. Анализ основных функциональных узлов РЕТ-сканеров. Классификация современных РЕТ-сканеров с учетом возможности определения параметров DOI и TOF.
3. Выделение обобщенной структуры электронной системы обработки данных в РЕТ-сканере, ориентированной на определение параметра DOI при использовании ПЧ фотодетекторов.
4. Разработка методики обработки импульсов в периферийной зоне детектора с искаженным энергетическим спектром.
5. Создание методических и технических средств обработки полезных событий в периферийной зоне детектора для повышения эффективности работы всей системы.
6. Разработка экспериментальных образцов электронных модулей для эффективной обработки событий в периферийной зоне ПЧ детекторов. Создание тестовых и диагностических средств.
7. Формулирование требований на изготовление многоканальной системы сбора и обработки данных в виде СБИС со структурой SOC.

Научная новизна работы заключается в решении следующих задач:

1. Представлена классификация методов измерения параметра DOI для определения координаты Z полезного события в кристалле сцинтиллятора, ориентированных на использование ПЧ фотодетекторов (ФЭУ).
2. Предложена схема обработки сигналов с искаженным энергетическим спектром, предполагающая использование нескольких каналов обработки сигналов с различными параметрами, что позволяет учитывать полезные события в периферийной и угловой зонах ПЧ детектора.
3. Разработана методика проектирования аналоговых узлов обработки данных с учетом реальных характеристик применяемых детекторов, а также современных средств автоматизированного проектирования узлов РЭА.
4. Разработаны одномерные 1D и двумерные 2D модели входных узлов электронных блоков, предназначенные для работы с современными детекторами, а также учитывающие погрешности, вносимые оптической системой РЕТ-сканера. Модели ориентированы на использование в составе САПР OrCAD.
5. Разработаны модели функциональных блоков, позволяющие определять основные характеристики РЕТ-сканера на этапе проектирования.
6. Разработана методика параметризации созданных моделей входных блоков РЕТ-сканера на основе проведения экспериментальных исследований характеристик функциональных узлов детектора и электронной системы.

Практическая значимость работы обусловлена:

1. Созданием базового набора электронных модулей для построения современных PET-сканеров высокого разрешения, позволяющих повысить эффективность работы системы за счет обработки полезных событий в периферийной зоне, на основе современной электронной базы.
2. Разработкой прототипа электронной системы обработки данных для современного PET-сканера на основе базового набора стандартизованных электронных модулей.
3. Созданием тестовых, диагностических и отладочных аппаратных и программных средств для аналоговых и цифровых электронных модулей базового набора.
4. Созданием тестовых, диагностических и отладочных аппаратных и программных средств для электронной системы PET-сканера.
5. Созданием специализированного программного обеспечения для работы с разработанными модулями PET-сканера.

Проведен комплекс экспериментальных работ по лабораторному исследованию:

1. Характеристик ПЧ детекторов. Основных компонентов детекторов современных PET-сканеров для параметризации разработанных моделей электронных узлов.
2. Разработанного прототипа электронной системы аналоговой и цифровой системы обработки данных в современном PET-сканере для ограниченного числа каналов.
3. Характеристик основных узлов базового набора модулей электронной системы PET-сканера.

Реализация результатов

Основные результаты диссертации использовались:

- при выполнении хоздоговора №84-3-003-896 «Исследование и разработка структурной схемы многоканального аналого-цифрового модуля обработки данных для отечественного мини-PET-сканера для животных на основе высокопроизводительных submodule цифровой и аналоговой обработки NLS», 2004-2006г.г.,
- 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 аналоговых узлов обработки данных на основе композиционного подхода к моделированию, позволяющего учитывать реальные характеристики применяемых детекторов, на основе современных средств автоматизированного проектирования узлов РЭА с применением САПР Cadence и Mentor Graphics.

2. Одномерные модели входных узлов электронных блоков, предназначенных для работы с современными ПЧ детекторами, а также учитывающие искажения энергетического спектра полезных событий в периферийной зоне фотодетекторов, что позволяет повысить эффективность их регистрации.

3. Двумерные модели, предназначенные для исследования и оптимизации краевых эффектов, возникающих при использовании нескольких расположенных рядом ПЧ ФЭУ.

4. Методика параметризации созданных моделей входных аналоговых блоков РЕТ-сканера.

5. Базовый набор модулей для построения электронных систем обработки данных в РЕТ-сканерах высокого разрешения и мини РЕТ-сканерах, позволяющих повысить эффективность работы системы за счет реализации схемы независимой обработки полезных событий в периферийной зоне.

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 12 печатных работ.

Основные результаты диссертации изложены в печатных работах [1-12].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Диссертация вместе с приложением содержит 160 страниц печатного текста, в том числе 23 таблицы, 77 рисунков и библиографию, включающую 99 наименований.

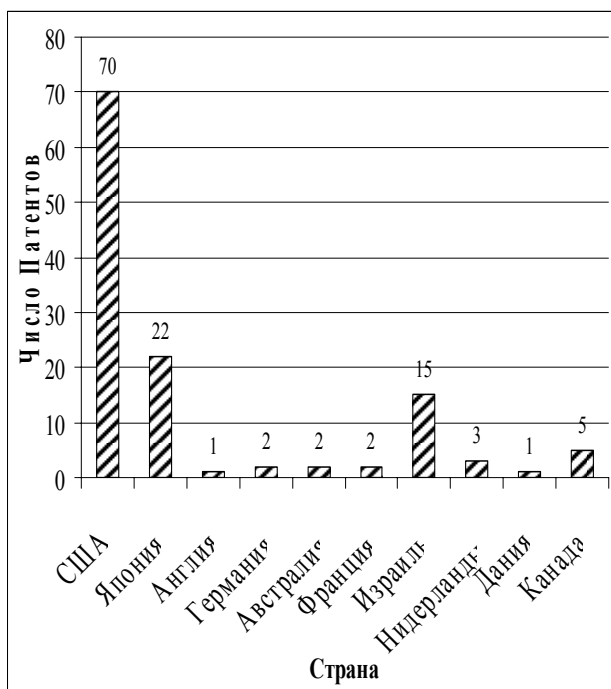
В приложении 1 к диссертации предоставлены результаты анализа патентной документации США по современным РЕТ-сканерам.

Содержание диссертации

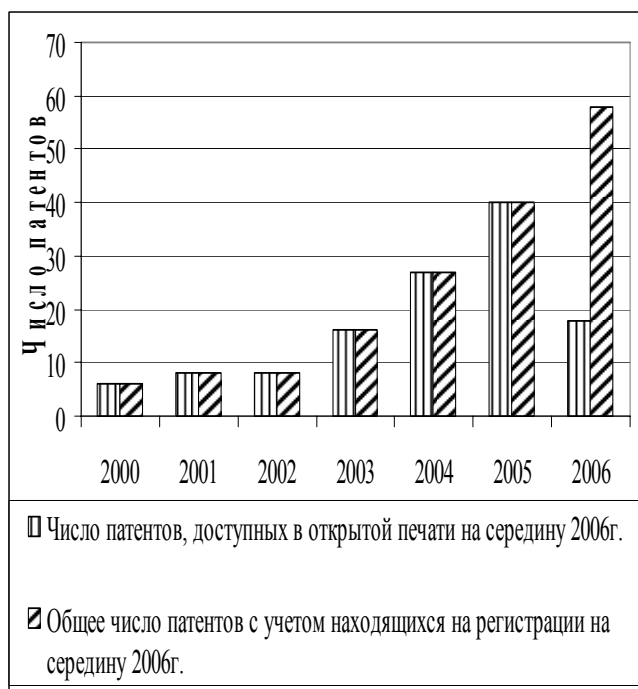
Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задача работы. На основе проведенного анализа современного состояния и перспектив развития PET-сканеров сформулированы основные требования к электронной системе обработки для нового поколения сканеров, предполагающих широкое использование специализированных многоканальных СБИС, новых сцинтилляционных материалов типа LYSO, а также МА ФЭУ, ПЧ ФЭУ и полупроводниковых детекторов, в том числе – твердотельных кремниевых ФЭУ. Среди основных требований выделены [8]:

- равномерная чувствительность во всем рабочем объеме сканера,
- возможность обработки импульсов для временного окна порядка 1нс,
- возможность определения параметров DOI и TOF,
- возможность учета глубины взаимодействия для кристаллов сцинтиллятора с поперечными размерами не более 1мм x 1мм,
- использование технологии временных меток,
- высокая технологичность и невысокая стоимость сканера, особенно, ориентированного на отечественный рынок.

В первой главе представлены результаты обзора патентной и научно технической информации по PET-сканерам [8]. Выделены ведущие фирмы – разработчики PET-сканеров. Анализируется число поданных патентов по данной тематике. На рис.1а показана зависимость числа патентов, поданных в различных странах за последние 5 лет, по теме «PET-сканер». На рис.1б показано число патентов по годам (за последние 7 лет) по теме «PET-сканер».



а)



б)

Рис.1.

Из приведенных данных видно, что наблюдается устойчивый рост активности ведущих компаний – производителей PET-сканеров. Так, в период с 2000г. по середину 2006г. объем подаваемых патентов возрос примерно в 13 раз. Таким образом, во всем мире наблюдается всплеск активности, обусловленный, с одной стороны, успехами интегральной технологии по производству многоканальных быстродействующих микросхем со структурой SOC, и, с другой стороны, освоением ряда новых сцинтилляторов, таких, как LYSO. Ведущими компаниями по разработке современных PET-сканеров (по критерию число поданных патентов) являются следующие: STI PET Systems Inc., Hitachi Corporation, Elgems Ltd.

Проведен анализ задач, решаемых с помощью международных патентов. Наиболее важным направлением развития современных PET-сканеров является обработка данных для улучшения качества получаемого изображения.

Во второй главе представлен анализ общей структуры современных PET-сканеров, рассмотрен принцип действия PET-сканеров, а также дан анализ их основных функциональных узлов. Выделена обобщенная структурная схема обработки данных в PET-сканере. Предложена классификация современных PET-сканеров с учетом возможности определения параметров DOI и TOF. Выделены актуальные научные и практические задачи, сдерживающие создание современного, в первую очередь, отечественного PET-сканера.

В главе 2 дана классификация существующих PET-сканеров в соответствии с основными этапами их развития, а также выделены их основные структурные особенности. На основе проведенного обзора и анализа существующих и создаваемых конструкций PET-сканеров дана оценка перспектив использования различных детекторов для выделенных групп сканеров. Показано, что создаваемые PET-сканеры в первую очередь должны ориентироваться на использование МА ФЭУ, ПЧ ФЭУ, матричные полупроводниковые детекторы, включая твердотельные ФЭУ (SiMT).

Анализ применяемых систем сбора и обработки данных в PET-сканерах позволил выделить ряд тенденций их развития. В частности, дан анализ применяемым способам реализации схемы совпадения импульсов.

Анализируется аналоговый способ организации схемы совпадения импульсов, предполагающий суммирование в аналоговом виде импульсов нормированной амплитуды и, как правило, нормированной длительности на одной, либо нескольких шинах. Наличие в определенный момент времени двух событий приводит к формированию импульса двойной амплитуды, что фиксируется пороговым устройством. К основным недостаткам данного подхода отнесены: низкое быстродействие, возможность появления ложных срабатываний, а также небольшое число обслуживаемых каналов.

Рассмотрены преимущества цифрового способа организации схемы совпадений импульсов в заданном временном окне, предполагающего формирование цифровых импульсов в заданной сетке частот. Для данного способа все импульсы от детекторов складываются параллельным сумматором. Результат цифрового сложения анализируется цифровым процессором. При появлении двух и более импульсов цифровой процессор регистрирует

соответственно двойное, либо, например, тройное событие. Основным недостатком данного подхода – небольшое число обрабатываемых каналов и большая задержка принятия решения.

К наиболее перспективному способу организации устройства совпадения импульсов отнесен метод на основе временных меток, широко применяющийся при обработке событий в экспериментальной физике высоких энергий. Данный подход предполагает независимое в каждом канале обработки импульсов присваивание временной метки – цифрового кода (с точностью, например, 1 нс), который вместе с параметрами импульса – его координатами X, Y и Z, амплитудой A передается в спецпроцессор. Функцией спецпроцессора является перебор всех событий и поиск одиночных, двойных, тройных и других множественных событий. После анализа событий по их временным меткам (в режиме OFF LINE) получают традиционные данные для реконструкции изображения.

Проведенный анализ характеристик сцинтилляторов, а также возможных режимов обработки данных при определении параметра DOI позволил выделить следующие основные модели световой вспышки, которые необходимо учитывать при разработке быстродействующих электронных блоков PET-сканера высокого разрешения. В табл.1 представлены четыре класса моделей, предназначенных для описания характеристик световой вспышки для разных сцинтилляторов.

Таблица 1

Классы моделей световой вспышки для различных сцинтилляторов

№ п.	Класс Модели	Учет параметров переднего фронта	Учет параметров заднего фронта	Область применения (решаемая задача)
1.	SD-0-1	Нет	Да	Все типы сцинтилляторов.
2.	SD-0-2	Нет	Да	Быстрые сцинтилляторы
3.	SD-1-1	Да	Да	Все типы сцинтилляторов. Учет параметров DOI, TOF.
4.	SD-1-2	Да	Да	Быстрые сцинтилляторы. Учет параметров DOI, TOF.

Модель первого класса SD-0-1 является однокомпонентной и описывает эффект эмиссии света после возбуждения и ионизации в сцинтилляторе. Модель класса SD-0-1 имеет следующий вид:

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(-\frac{t_0 - t}{\tau_d}\right),$$

где N – число фотонов, излучаемых за время t ; N_0 – общая сумма испускаемых фотонов; τ_d – постоянная времени; t_0 – момент времени начала световой вспышки. Особенностью модели данного класса является нулевое время нарастания переднего фронта.

Некоторые сцинтилляторы, используемые в ПЕТ-сканерах, сделаны на основе материала BaF_2 , характеризующегося наличием двух излучающих компонент, которые учтены в модели SD-0-2:

$$N(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{t_0 - t}{\tau_f}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{t_0 - t}{\tau_s}\right),$$

где τ_f и τ_s - постоянные времени затухания быстрых и медленных компонент.

Виды световых импульсов, получаемых в соответствии с моделями SD-0-1 и SD-0-2, представлены соответственно на рис.2 и рис.3.

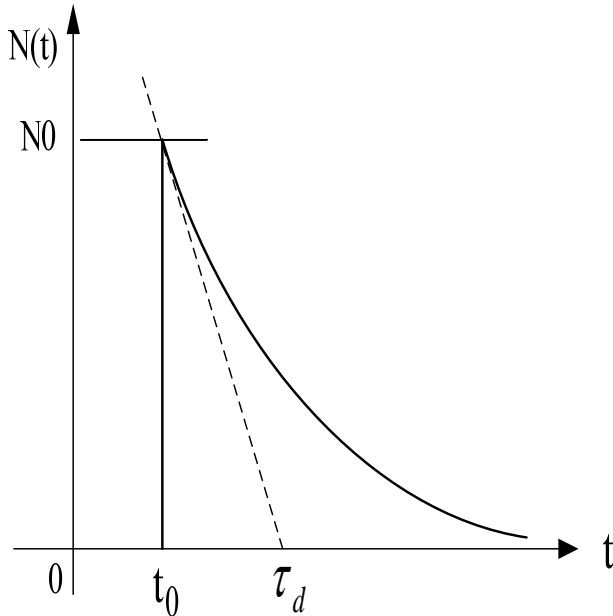


Рис.2. Модель SD-0-1

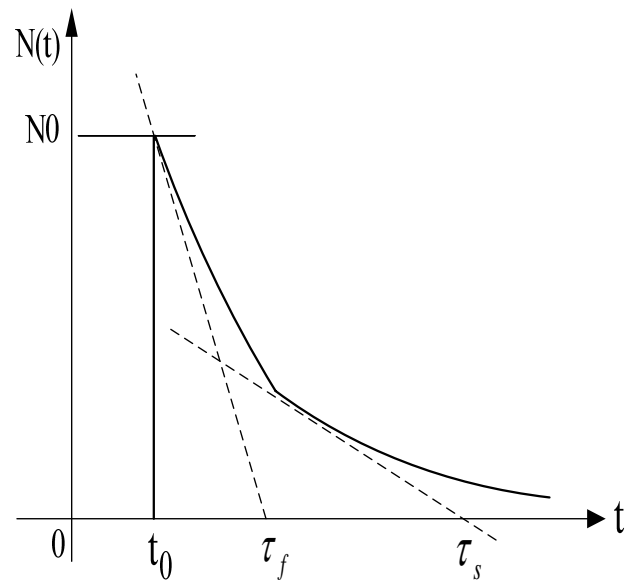


Рис.3. Модель SD-0-2

Модель класса SD-1-1 является двухкомпонентной и описывает эмиссию света в быстром сцинтилляторе. Модель класса SD-1-1 имеет вид:

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau_{d1}} (1 - \exp\left(-\frac{t_0 - t}{\tau_{d2}}\right)) * \exp\left(-\frac{t_0 - t}{\tau_{d3}}\right),$$

где τ_{d1} - интегральная постоянная времени, τ_{d2} - постоянная, характеризующая передний фронт импульса, τ_{d3} - постоянная, характеризующая задний фронт импульса.

Модель класса SD-1-2 имеет следующий вид:

$$N(t) = (1 - \exp\left(-\frac{t_0 - t}{\tau_{d2}}\right)) * (A \cdot \exp\left(-\frac{t_0 - t}{\tau_f}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{t_0 - t}{\tau_s}\right)),$$

где τ_f и τ_s - постоянные времени затухания быстрых и медленных компонент.

Виды световых импульсов, получаемых в соответствии с моделями SD-1-1 и SD-1-2, представлены соответственно на рис.4 и рис.5.

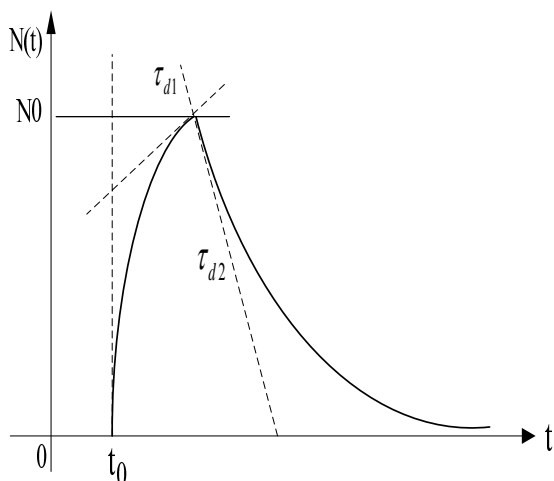


Рис.4. Модель SD-1-1

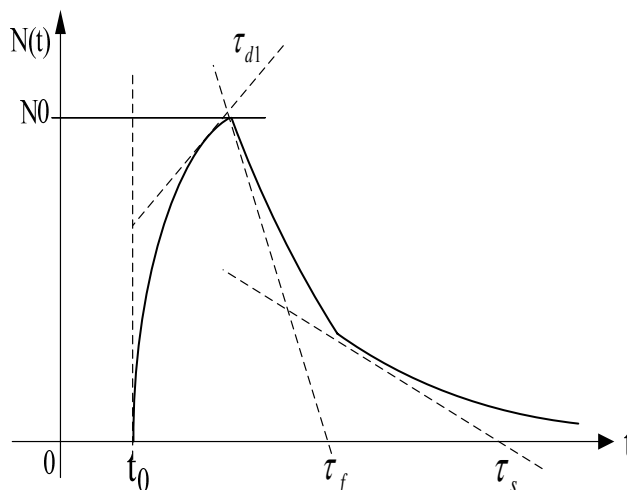


Рис.5. Модель SD-1-2

Рассмотренные модели световой вспышки учитывались при разработке моделей электронных устройств, а также при создании методик проектирования, ориентированных на использование современных САПР РЭА типа Cadence и Mentor Graphics. Наиболее целесообразно учитывать временные характеристики сцинтилляторов при описании параметров генератора сигнала, например, в OrCAD модели данного узла.

Во второй главе проанализированы проблемы, связанные с применением ПЧ ФЭУ, позволяющего использовать малогабаритные матрицы сцинтилляционных кристаллов с поперечными размерами порядка 1мм x 1мм. Данный тип ФЭУ следует рассматривать в качестве основных детекторов для построения современных мини PET-сканеров для животных. Эффективное использование данного типа ФЭУ не требует применения специализированных многоканальных заказных интегральных микросхем (ASIC), однако их разработка и применение позволит существенно уменьшить габариты системы, снизить потребляемую ею мощность.

К основным недостаткам применения ПЧ ФЭУ следует отнести:

- наличие больших периферийных зон, снижающих эффективную площадь рабочего окна фотодетектора,
- необходимость использования слоя световодов для сопряжения геометрических размеров рабочего окна матрицы сцинтилляторов и окна ПЧ ФЭУ, что приводит к дополнительным искажениям светового сигнала,
- искажение энергетического спектра регистрируемых сигналов в периферийной зоне, что снижает эффективность регистрации событий при использовании рекомендованных решений для электронных блоков обработки,
- проблемы адекватного определения параметров DOI и TOF в периферийной зоне детектора по причине искажения энергетического спектра,
- наличие «мертвых» зон между соседними ПЧ ФЭУ порядка 2-4мм, что приводит к потере пространственного разрешения в этих местах и обуславливает необходимость использования световодов.

Выделена обобщенная структурная схема обработки событий в ПЧ ФЭУ, показанная на рис.6.

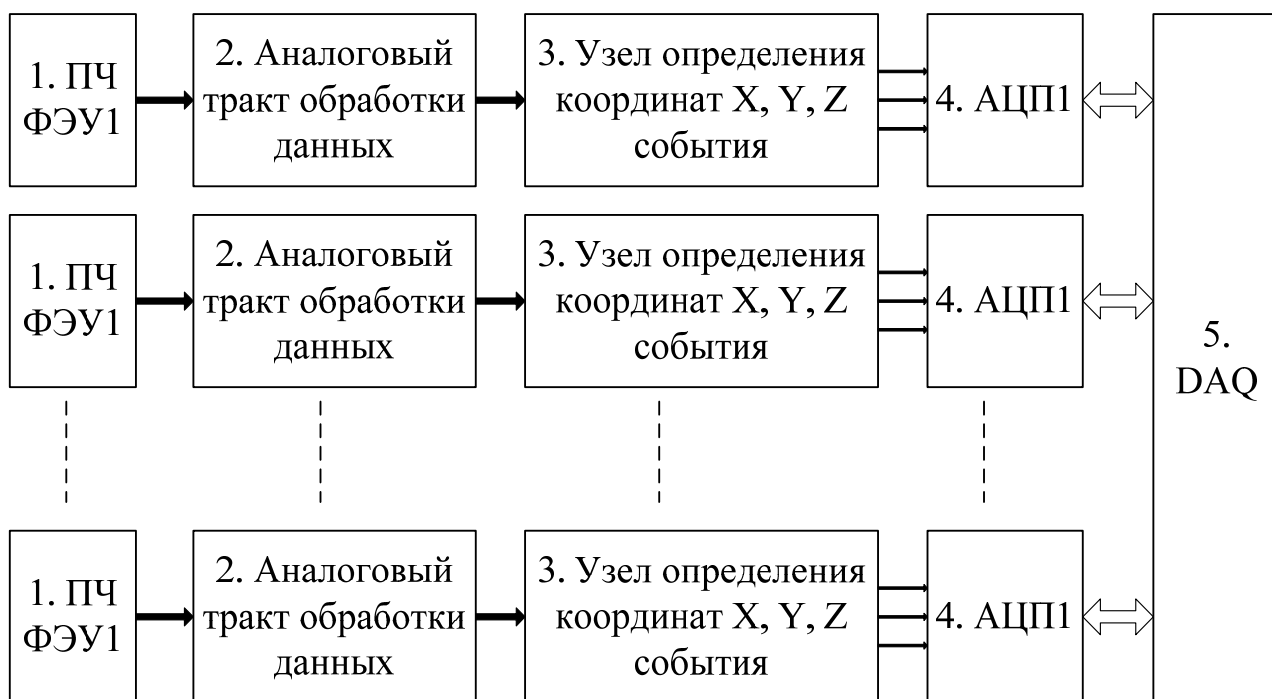


Рис.6. Обобщенная структурная схема обработки событий в ПЧ ФЭУ

На основе результатов анализа существующих электронных систем обработки данных в PET-сканере сформулированы актуальные научные и практические задачи, решение которых в первую очередь сдерживает создание отечественного сканера высокого разрешения.

В третьей главе предложена структурная схема электронной системы современного PET-сканера, допускающая обработку полезных событий в периферийной зоне ПЧ детектора с искаженным энергетическим спектром. Рассмотрено влияние параметра DOI на пространственное разрешение PET-сканера. Анализируется обобщенная схема обработки данных, ориентированная на учет параметра DOI. Дана классификация возможных решений для определения параметра DOI. Рассмотрена методика проектирования электронных узлов на основе предложенной классификации и созданных моделей [10-12].

Проведенные исследования позволили разработать методику проектирования электронных систем (в первую очередь - электронного узла аналоговой обработки), предназначенных для определения параметра DOI, в современных PET-сканерах [10, 11]. Разработанная методика базируется на классификации возможных конструкций детекторов, ориентированных на определение параметра DOI.

Предложенная классификация осуществлена на основе трех следующих параметров: число используемых независимых детекторов – M , число слоев сцинтиллятора/сцинтилляторов – N , способ разделения слоев сцинтиллятора для определения параметра DOI – R .

На рис.7 показаны основные задачи, решаемые при проектировании электронной системы обработки данных, в соответствии с разработанной

методикой [10]. Основными требованиями, предъявляемыми к электронным блокам обработки данных, а также к используемому детектору, являются:

- требуемая точность d_x восстановления координаты X в сцинтилляторе детектора PET-сканера,
- требуемая точность d_y восстановления координаты Y в сцинтилляторе детектора PET-сканера,
- требуемая точность d_z восстановления координаты Z (DOI) в сцинтилляторе детектора PET-сканера,
- требуемое энергетическое разрешение d_E детектора PET-сканера,
- требуемые границы изменения координат X, Y, Z полезного события,
- заданная модель источника света, например, точечная, распределенная, распределенная с эффектом поглощения части света в периферийной зоне,
- шаг изменения координат X, Y, Z при моделировании.

Основными задачами, решаемыми при разработке электронных блоков обработки данных в PET-сканере, являются [10]:

1. Выбор числа детекторов – M , начиная со значения $M=1$, что гарантирует наименьшую стоимость всей системы.
2. Выбор числа слоев сцинтиллятора – N , начиная со значения $N=1$.
3. Выбор способа разделения кристаллов – R , $R=1, 2, \dots, 5$. Обычно на этом этапе необходимо учитывать технологические возможности и стоимость изготовления выбранного варианта разделения кристаллов сцинтиллятора, что позволяет ограничить число возможных значений параметра R несколькими возможными.
4. Загрузка соответствующего варианта модели детектора [9, 12] из созданной библиотеки моделей детекторов, ориентированных на использование в составе электронных моделей аналоговых и цифровых узлов в системе проектирования OrCAD.
5. Подключение модели аналогового узла обработки импульсов из созданной библиотеки моделей аналоговых узлов в системе проектирования OrCAD [6, 9, 12].
6. Подключение моделей стандартных аналоговых и цифровых устройств для системы проектирования OrCAD. Как правило, результатом подключения указанных выше моделей является иерархический проект, готовый для моделирования в САПР OrCAD.
7. Композиционное иерархическое моделирование [11] проекта при использовании заданной модели источника света для всего рабочего объема сцинтиллятора с заданным шагом изменения координат. Получение точностных характеристик для определения координат X, Y, Z , а также энергии для полезных событий в заданном рабочем объеме сцинтиллятора.
8. Анализ полученных параметров, сравнение с полученными параметрами для других вариантов построения детектора.
9. На основе полученных данных о точностных характеристиках принятие решения о целесообразности использования данного варианта построения системы.

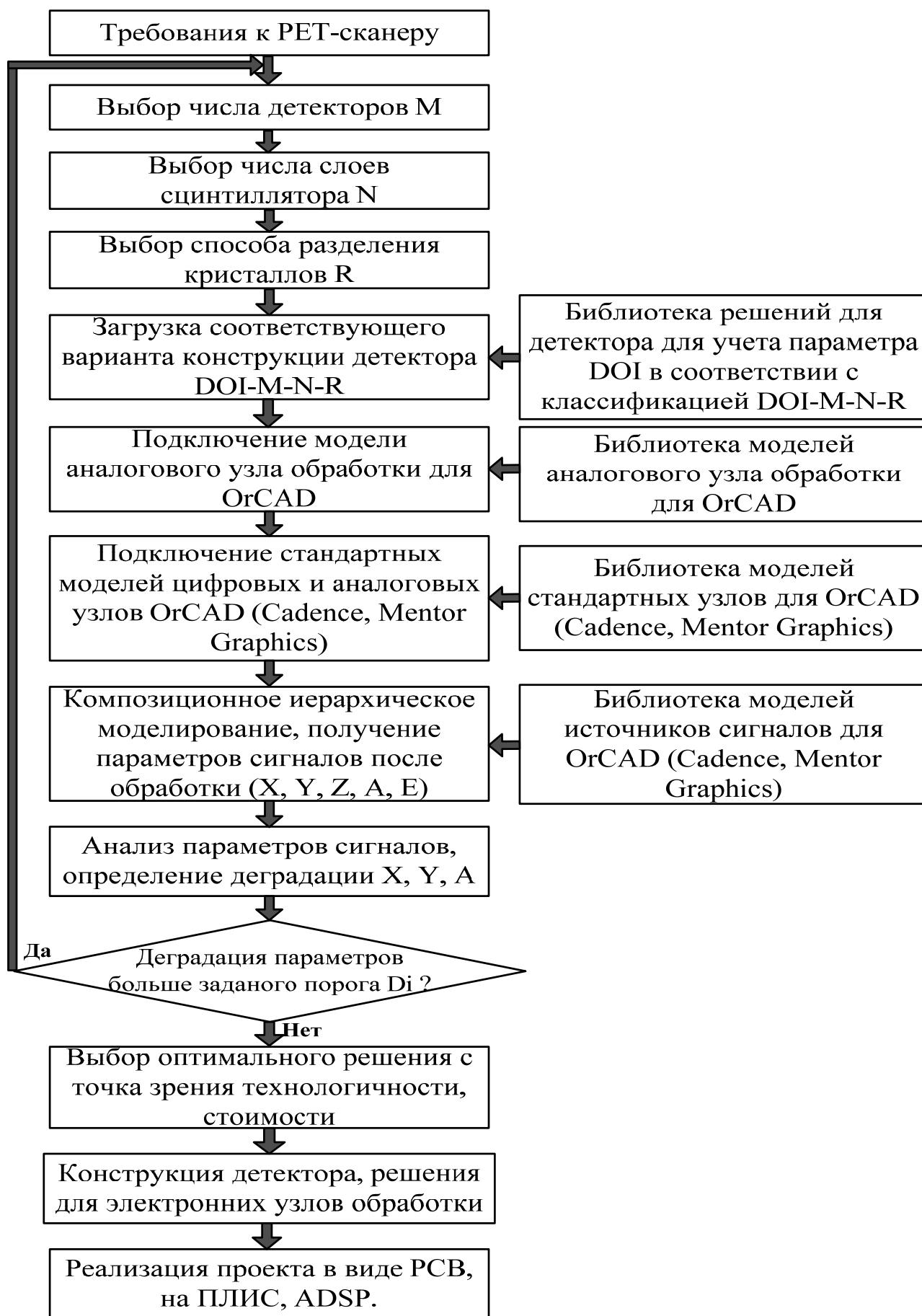


Рис.7. Основные задачи, решаемые при проектировании электронной системы обработки данных

10. Выбор оптимального решения на основе анализа всех рассмотренных вариантов с точки зрения стоимости и технологичности изготовления.

11. Для выбранного варианта построения системы, ориентированной на определение параметра DOI, за основу схмотехнических реализаций аналоговых и цифровых блоков выбираются соответствующие модели этих узлов в системе OrCAD [6-12].

12. Полученные таким образом схмотехнические решения используются при техническом проектировании функциональных узлов электронной системы на уровне ПЛИС, печатных плат, а также фрагментов ПО, реализованного на уровне IP блоков, например, в ПЛИС со структурой SOC, либо на основе стандартных сигнальных процессорах типа ADSP фирмы Analog Devices [1, 2, 3, 5].

Разработанная методика проектирования электронных блоков была использована для создания ряда электронных модулей обработки сигналов с ПЧ ФЭУ фирмы НАМАМАТСУ [9]. Применение данной методики позволило значительно улучшить системные характеристики, такие, как пространственное разрешение в периферийной зоне ФЭУ, а также дало возможность полностью исключить дополнительные световоды, что позволило уменьшить стоимость системы, а также упростить сборку детектора.

Для устранения недостатков работы ПЧ ФЭУ в периферийной зоне в работе предложена структурная схема электронной системы РЕТ-сканера, допускающая обработку событий с искаженным энергетическим спектром, представленная на рис.8.

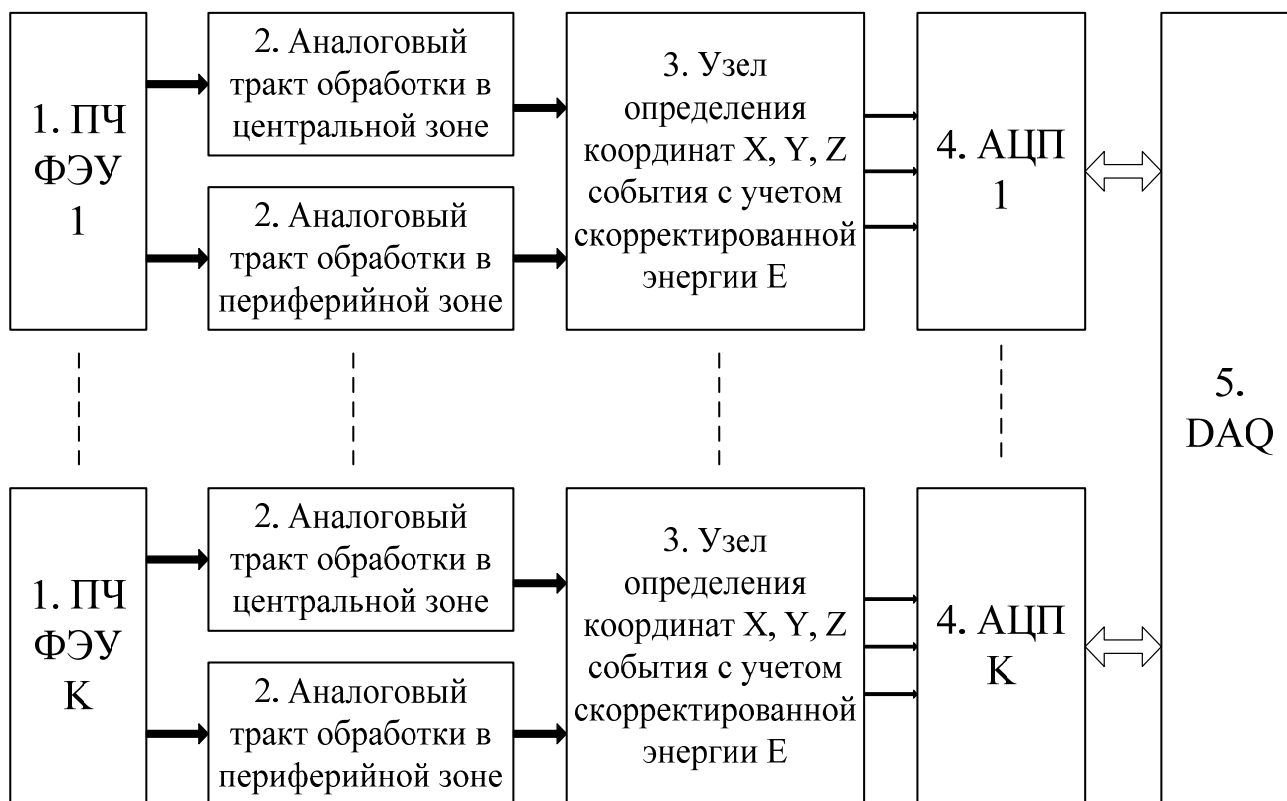


Рис.8. Разработанная структурная схема электронной системы

Сущность предлагаемого подхода заключается в использовании нескольких каналов обработки сигналов в ПЧ ФЭУ. При этом предполагается, что параметры обработки сигналов в центральной части ПЧ ФЭУ отличаются от параметров обработки сигналов в периферийной зоне ПЧ ФЭУ. Такой подход позволяет осуществить индивидуальную коррекцию параметров АПХ каждого ПЧ ФЭУ, что дает возможность реализовать обработку полезных событий в периферийной зоне фотодетектора, а значит – повысить эффективность работы всего РЕТ-сканера.

В четвертой главе рассмотрены вопросы создания моделей аналоговых узлов, предназначенных для первичной обработки сигналов от фотодетектора. Особое внимание уделено моделям, ориентированным на работу с современными МА и ПЧ ФЭУ [11]. Предложена методика проектирования аналоговых узлов обработки данных с учетом реальных характеристик детекторов. Дан перечень разработанных 1D и 2D моделей [6, 11, 12].

Предлагаемый композиционный подход [12] предполагает осуществление единого цикла моделирования сложной системы, объединяющей в себе следующие разнородные subsystemы:

- источник светового сигнала, формирующий световую вспышку с заданными амплитудно-временными параметрами в соответствии с характером взаимодействия гамма-кванта со сцинтиллятором,
- оптическую, включающую в себя сложной составной сцинтиллятор, световод и ряд слоев склеивания, вносящих определенные искажения в передачу сигнала,
- фотодетектор, включающий в себя также элементы его оптической системы – корпус, фотокатод (для ФЭУ),
- входную аналоговую электронику,
- функциональную электронику, осуществляющую обработку сигналов с нескольких анодов (ПЧ ФЭУ, многоанодные ФЭУ) для формирования координатных сигналов X, Y, Z, а также необходимых сигналов временной привязки,
- аналого-цифровой преобразователь, время-цифровой преобразователь,
- модуль цифровой обработки сигналов.

В качестве среды моделирования в данной работе предлагается система моделирования OrCAD, ориентированная на моделирование аналоговых и цифровых блоков [6, 9, 11].

На рис.9 представлена графическая иллюстрация композиционного подхода [12], дающего возможность существенно сократить время и трудоемкость разработки электронных узлов, предназначенных для использования в РЕТ-сканерах.

Разработанные одномерные 1D модели аналоговых устройств предназначены для исследования следующих характеристик, например [6]:

- точность и линейность в определении координаты X, либо Y, либо Z при использовании ПЧ, либо многоанодных фотоприемников (ФЭУ),
- точность определения энергии импульса E,

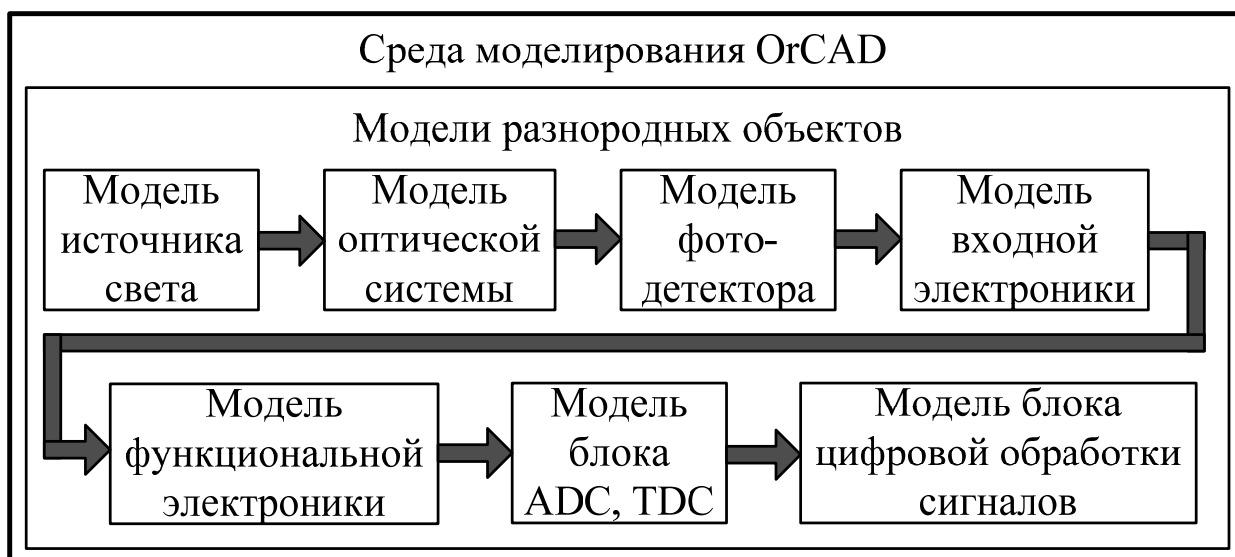


Рис.9. Композиционный подход к моделированию сложной системы

- точность временной привязки при формировании строба начала события,
- чувствительность приемного тракта в периферийной зоне детектора,
- воспроизводимость основных характеристик канала при использовании фотоприемников из одной серии.

Для решения указанных выше задач в рамках композиционного подхода был разработан ряд одномерных моделей, учитывающих характеристики фотоприемника, включая параметры оптического тракта передачи данных. Разработанные модели ориентированы на использование в составе САПР OrCAD, либо подобные ей.

Для описания одномерных эффектов в ПЧ ФЭУ было разработано 35 одномерных моделей, имеющих индексы соответственно от 1D-1 до 1D-35. Аналогичные модели разработаны и для других типов детекторов, например, многоанодных ФЭУ, полупроводниковых детекторов.

На рис.10 представлена, например, разработанная модель 1D-25, предназначенная для моделирования блока определения координат X, либо Y для ПЧ ФЭУ с симметричным параллельным включением и распределенным источником света для моделирования краевых эффектов. Особенности представленной модели является использование:

- в качестве модели источника света – источника электрического сигнала (тока, либо напряжения) – A1,
- в качестве модели оптической системы токового резистивного делителя на основе резисторов R162, R163, R164,
- для построения входного аналогового и функционального блока обработки – стандартных резистивных цепей и библиотечных элементов САПР OrCAD.

На рис.11 представлены результаты моделирования координатного сигнала X и суммарного энергетического сигнала E (Z) с учетом краевых эффектов в координатно-чувствительном ФЭУ с помощью САПР OrCAD.

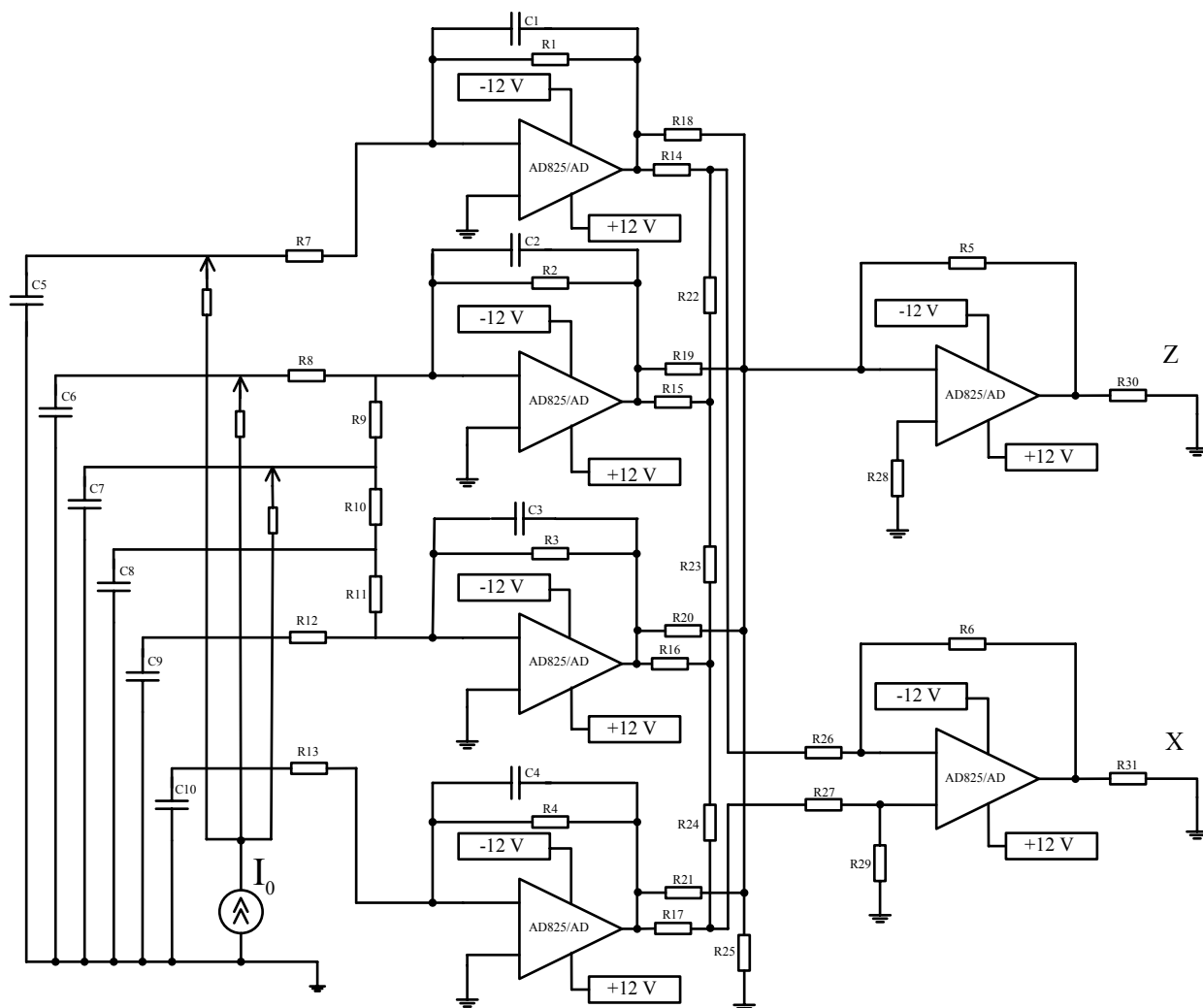


Рис.10. Разработанная модель класса 1D-25

Разработанные одномерные модели были использованы для проектирования ряда аналоговых узлов, ориентированных на использование ПЧ ФЭУ фирмы HAMAMATSU. Использование разработанных моделей позволило существенно улучшить характеристики системы, в частности – повысить чувствительность детектора в соответствующей периферийной зоне ФЭУ.

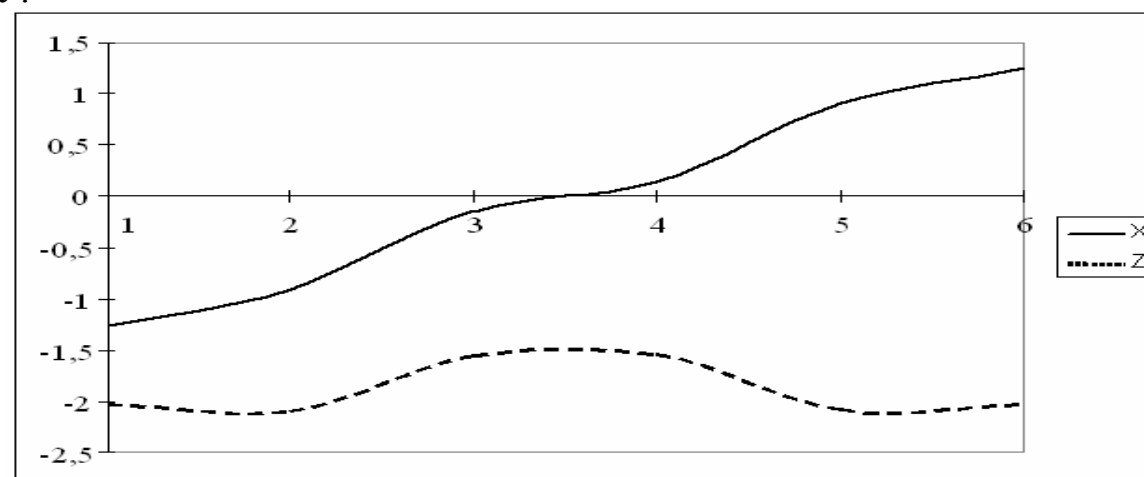


Рис.11. Результаты моделирования координатного сигнала X и суммарного энергетического сигнала E

Для описания двумерных эффектов в ПЧ ФЭУ было разработано 12 двумерных моделей, имеющих индексы соответственно от 2D-1 до 2D-12 [11].

На рис.12 представлена, например, разработанная двумерная модель класса 2D-11, предназначенная для моделирования блока определения координат X и Y для ПЧ ФЭУ с симметричным параллельным включением и распределенным источником света для моделирования краевых эффектов [6].

Особенностями представленной модели класса 2D-11 в соответствии с рассматриваемым композиционным подходом [12] к моделированию, являются использование:

- в качестве модели источника света – источника электрического сигнала (тока, либо напряжения) – A1,
- в качестве модели оптической системы токового резистивного делителя для задания сигналов X и Y,
- для построения входного аналогового и функционального блока обработки – стандартных резистивных цепей и библиотечных элементов САПР OrCAD.

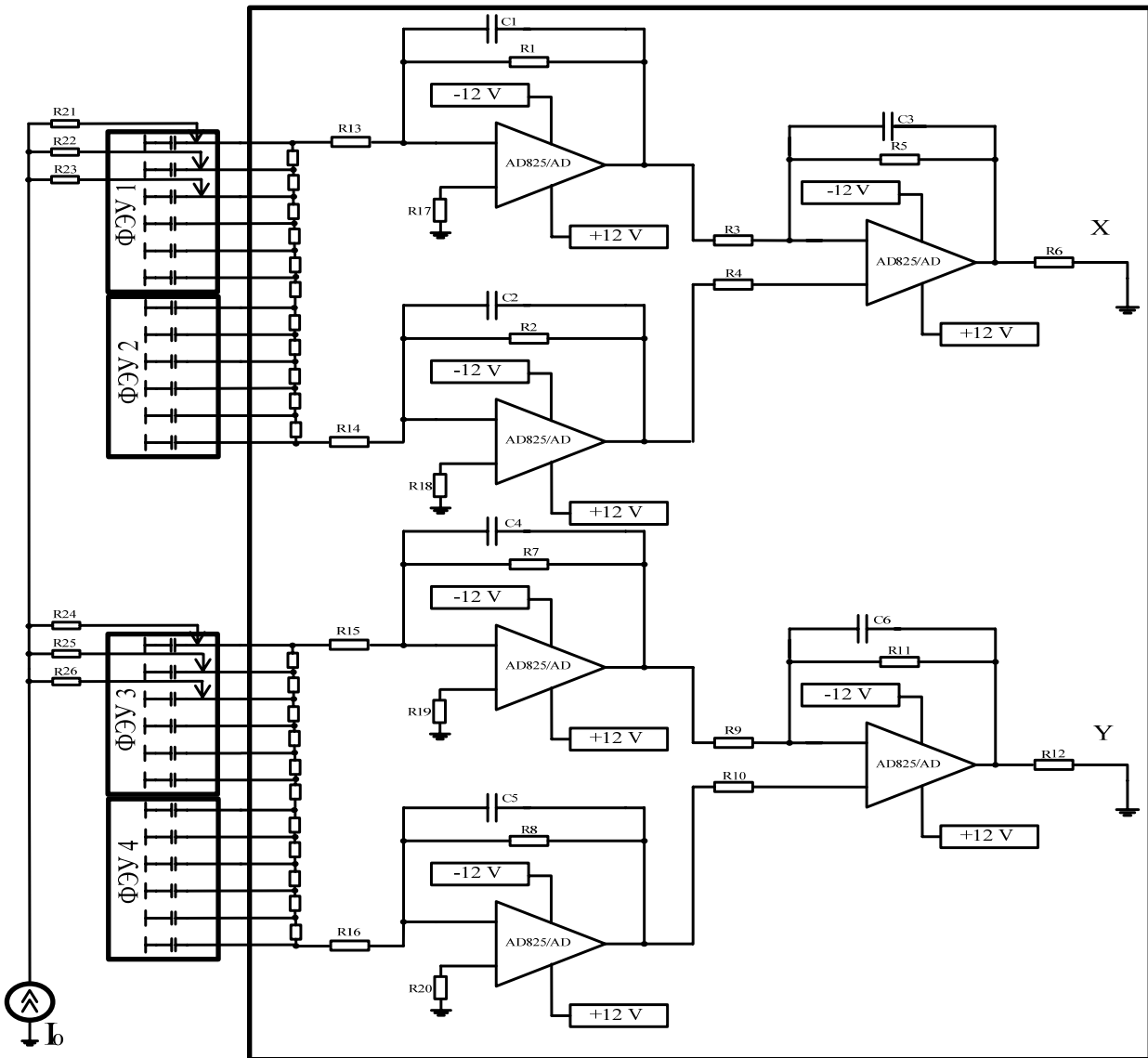


Рис.12. Разработанная двумерная модель класса 2D-11

На рис.13 представлены результаты моделирования координатных сигналов X и Y с учетом краевых эффектов в каждом из четырех ПЧ ФЭУ с помощью САПР OrCAD.

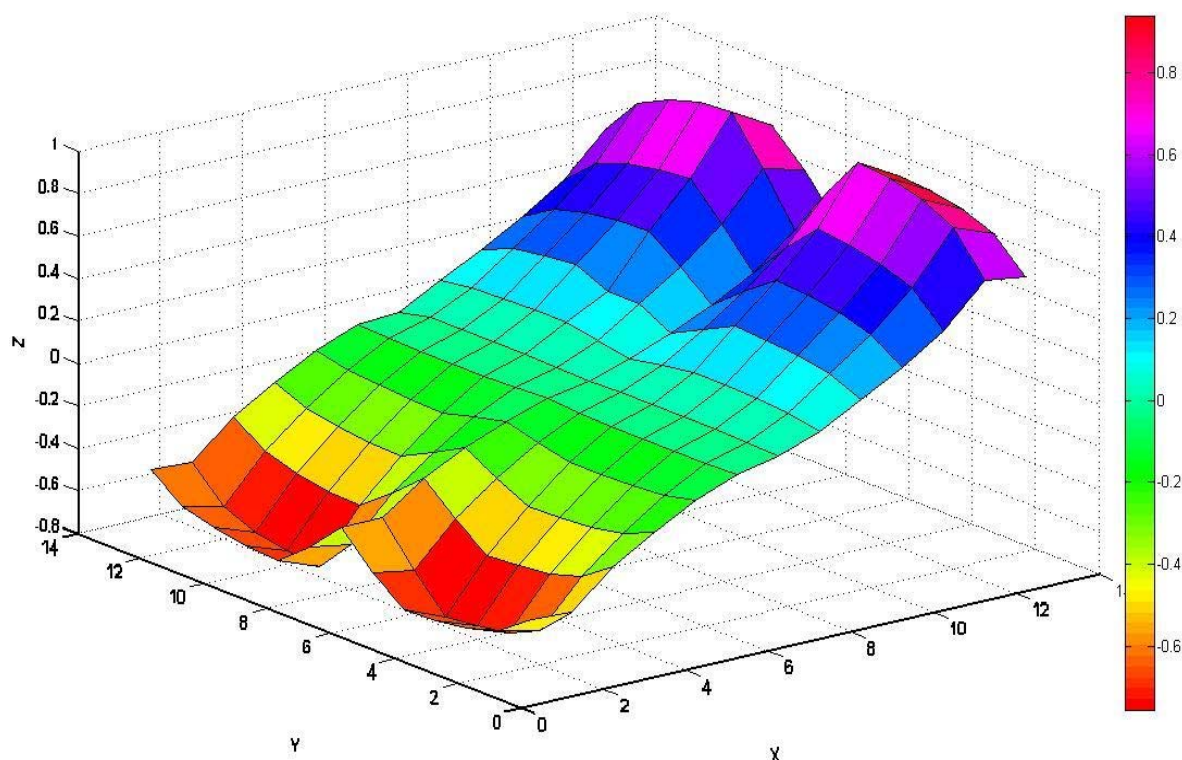


Рис.13. Результаты моделирования координатных сигналов X и Y с учетом краевых эффектов

Разработанные двумерные модели были использованы для проектирования ряда аналоговых узлов, ориентированных на использование ПЧ ФЭУ фирмы HAMAMATSU. Использование разработанных моделей позволило существенно улучшить характеристики системы, в частности – повысить чувствительность детектора, соответствующей периферийной зоне ФЭУ.

На рис.14 показаны основные задачи, решаемые в процессе параметризации моделей в соответствии с разработанной методикой.

Основными решаемыми задачами являются:

1. Определение параметров моделей световых вспышек [10]. Результатом выполнения данной шага являются значения амплитудно-временных параметров источников электрических импульсов – источников тока и напряжения, используемых в данных моделях. Критерием выбора параметров является наилучшее соответствие экспериментальным данным – минимум СКО.

2. Определение параметров моделей оптического тракта. Результатом выполнения данной шага являются значения параметров электрических цепей - резисторов R_i , конденсаторов C_i , индуктивностей L_i , используемых в данных моделях. Критерием выбора параметров является наилучшее соответствие экспериментальным данным – минимум СКО.

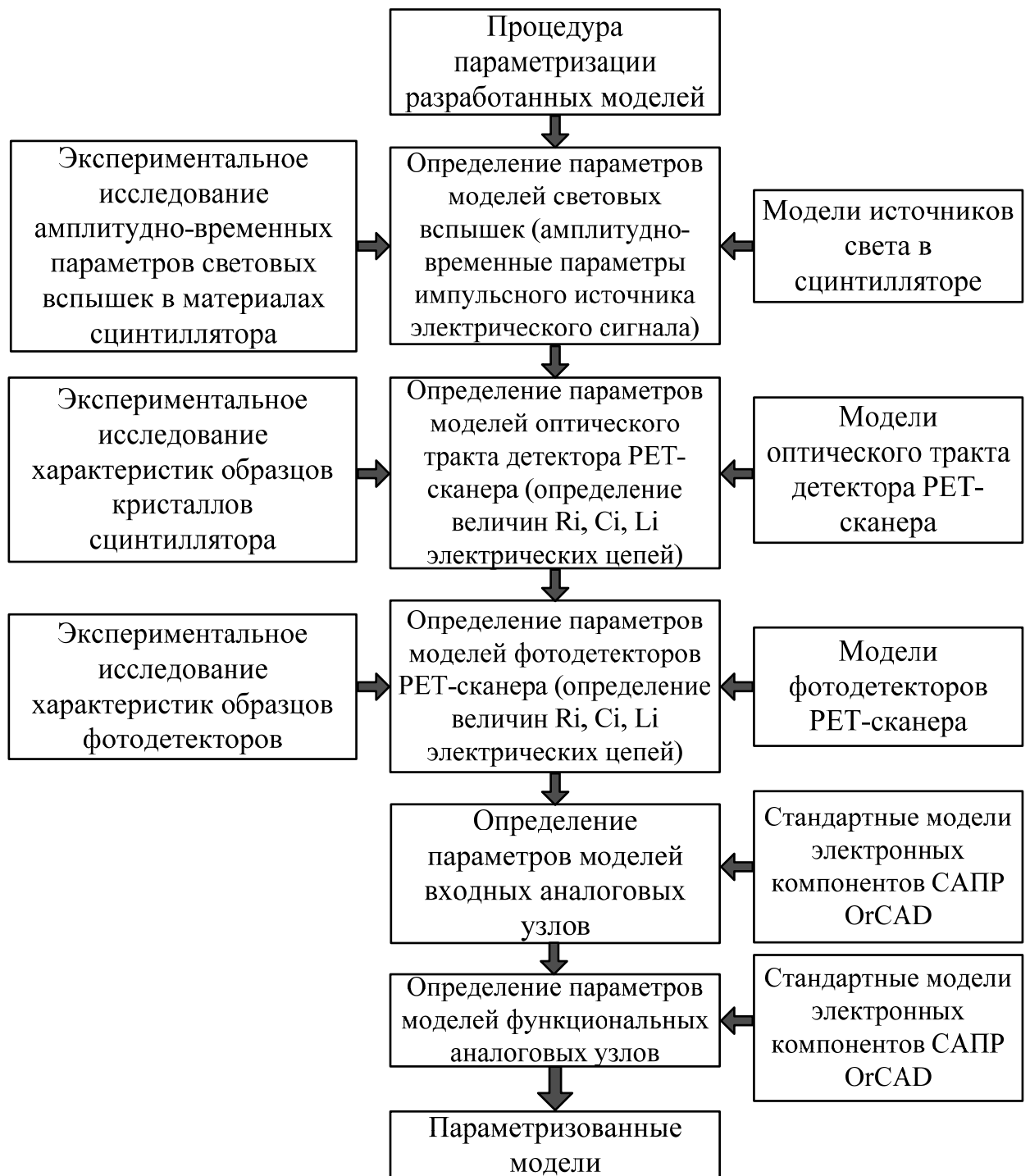


Рис.14. Основные задачи, решаемые в процессе параметризации моделей, в соответствии с разработанной методикой

3. Определение параметров моделей ПЧ, либо многоанодных фотодетекторов. Результатом выполнения данной шага являются значения параметров электрических цепей - резисторов R_i , конденсаторов C_i , индуктивностей L_i , использующихся в данных моделях. Критерием выбора параметров является наилучшее соответствие экспериментальным данным – минимум СКО.

4. Определение параметров моделей входных аналоговых трактов. Для решения данной задачи используются модели стандартных электронных компонентов из библиотек САПР OrCAD.

5. Определение параметров моделей функциональных аналоговых узлов. Для решения данной задачи используются модели стандартных электронных компонентов из библиотек САПР OrCAD.

Рассмотренная методика была использована при проектировании электронных аналоговых узлов для определения параметра DOI в PЕТ-сканере при использовании ПЧ ФЭУ [4, 6, 7, 8].

В пятой главе представлены основные результаты по проектированию базового набора специализированных электронных модулей [1, 2, 4-6], ориентированных на аналоговую и цифровую обработку данных в современном PЕТ-сканере высокого разрешения на основе разработанных методик проектирования, а также созданных моделей функциональных узлов.

Рассмотрены особенности созданного экспериментального лабораторного стенда для исследования характеристик аналоговых модулей, ориентированных на работу с ПЧ ФЭУ.

Представлена структура разработанного тестового программного обеспечения. Анализируются полученные экспериментальные результаты.

Созданные методики проектирования электронных устройств PЕТ-сканера, а также одномерные 1D и двумерные 2D модели аналоговых устройств [12] были использованы для проектирования базового набора специализированных электронных модулей в стандарте VME 3U и VME 6U.

Созданный базовый набор модулей достаточен для создания широкого класса современных PЕТ-сканеров, включая мини PЕТ-сканеры для лабораторных животных. Набор включает в себя как аналоговые модули первичной обработки данных для ФЭУ, так и модули сбора и цифровой обработки данных. В табл.2 приведен перечень основных разработанных электронных модулей.

Таблица 2

Основные разработанные электронные модули

№ пп	Название электронного модуля	Конструкти в модуля	Код модуля	Примечание
1.	Одноканальный модуль обработки данных для ПЧ ФЭУ	VME 3U	VME 3U- PMT-1	Модуль аналоговой обработки данных для ПЧ ФЭУ
2.	Многоканальный модуль обработки данных для ФЭУ	VME 6U	VME 6U- PMT2	Модуль многоканальной обработки данных для ФЭУ
3.	Интерфейсный модуль USB2.0	VME 3U	VME 3U- USB1	Передача данных в персональный компьютер
4.	Диагностический модуль	VME 3U	VME 3U- TST1	Тестирование и диагностика модулей
5.	Интерфейсный и тестовый модуль	VME 6U	VME 6U- TST2	Передача данных и тестирование Модулей

Модули VME 3U PMT-1 и VME 6U-PMT2 предназначены соответственно для аналоговой и аналого-цифровой обработки данных ПЧ ФЭУ.

Модуль VME 3U-USB1 предназначен для обслуживания первых двух модулей. Основной характеристикой модуля является поддержка встроенной системы тестирования и диагностики. Модуль позволяет создавать древовидную систему сбора данных при использовании стандартных USB2.0 разветвителей (USB2.0 HUB). Максимальная скорость ввода/вывода данных составляет 480Мбит/с.

На рис.15 представлена структурная схема модуля VME 3U PMT-1.

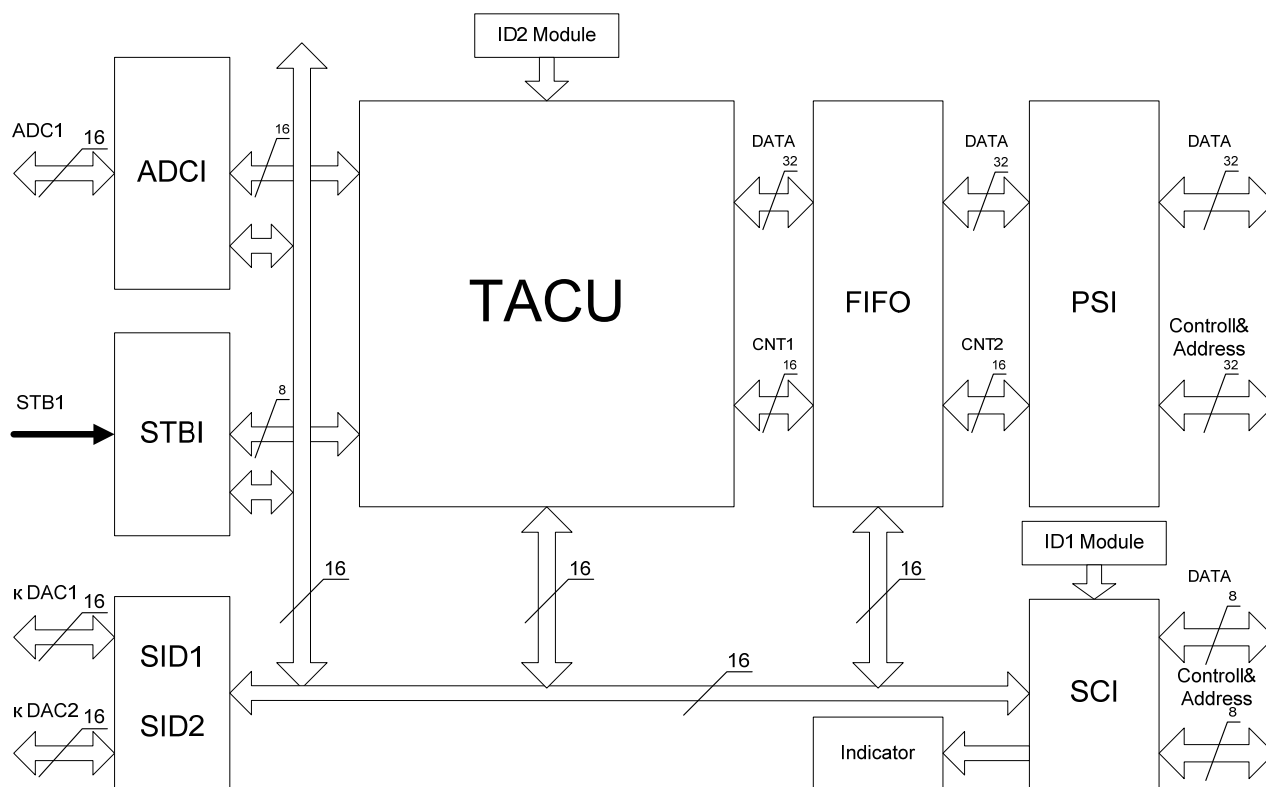


Рис.15. Структурная схема модуля VME 3U PMT-1

Основными функциональными узлами модуля являются: ADC1 – узел входной аналоговой обработки и АЦП, STB1 – входной узел формирования сигнала временной привязки, SID1, SID02 – узлы для диагностики, тестирования и конфигурации периферийных аналоговых и цифровых устройств, TACU – цифровой узел обработки данных, включая реализацию технологии временных меток, сшивки данных от соседних ФЭУ, FIFO – буферная память для поддержки скоростных протоколов чтения и записи данных, PSI – параллельный интерфейс для чтения и записи данных, SCI – тестовый и диагностический интерфейс.

Получение положительного эффекта достигнуто благодаря осуществлению композиционного моделирования, позволившему учесть как краевые эффекты в самом ФЭУ, так и распределенный характер воздействия света на фотокатод ФЭУ, а также потери в так называемых «мертвых зонах» между соседними ФЭУ.

Разработанный электронный модуль удовлетворяет всем основным предъявленным требованиям:

- содержит встроенную систему диагностики и тестирования,
- позволяет обрабатывать импульсы длительностью от 100нс,
- позволяет скорректировать чувствительность в периферийной зоне ПЧ ФЭУ, а также в «мертвых зонах» между соседними ФЭУ,
- допускает объединение ФЭУ в одномерные и двумерные блоки с числом ФЭУ в каждом блоке до 6/12,
- ориентирован на обработку потока импульсов до $5 \cdot 10^6$ импульсов в секунду для каждого ФЭУ,
- имеет встроенные средства учета АПХ каждого из используемых ФЭУ,
- позволяет определить параметр DOI – координату Z взаимодействия в кристалле сцинтиллятора с точностью не хуже 3мм,
- позволяет определять координаты X и Y при использовании матрицы сцинтилляционных кристаллов размером до 22мм x 22мм и минимальными размерами кристалла до 1мм x 1мм для каждого ФЭУ.

Достигнутая совокупность эксплуатационных характеристик позволяет рассматривать данный submodule как один из наиболее перспективных для построения современных PET-сканеров высокого разрешения, в том числе – мини PET-сканеров для лабораторных животных.

Для задач тестирования и диагностики разработанного базового набора электронных модулей было создано специализированное программное обеспечение на языке Delphi. Основными функциями созданного программного обеспечения являются: поддержка основных интерфейсов с разработанными электронными модулями, включая интерфейсы USB, LPT, COM, PCI; диагностика и тестирование основных модулей электронной системы PET-сканера перед началом работы; диагностика и поиск неисправностей электронных модулей в процессе работы системы; начальная инициализация функциональных узлов электронных модулей; перезапись выполняемых микропрограмм, программирование ПЛИС, микроконтроллеров и сигнальных процессоров; поддержка рабочего режима по сбору данных из узлов FEE (Front End Electronics); предварительное восстановление изображения для диагностических целей.

Основные выводы и результаты

Основным научным результатом диссертации является создание и развитие методик проектирования электронных узлов многоканальных систем обработки данных в современных PET-сканерах высокого разрешения на основе композиционного подхода к разработке моделей функциональных узлов детектора, что позволяет повысить эффективность использования современной элементной базы - ПЧ ФЭУ и обеспечить более высокие технико-экономические показатели на уровне всей системы.

Получены следующие основные научные результаты:

1. Дана классификация методов измерения параметра DOI для определения координаты Z полезного события в кристалле сцинтиллятора.
2. Разработана методика проектирования аналоговых узлов обработки данных с учетом реальных характеристик применяемых детекторов, а также современных средств автоматизированного проектирования узлов РЭА с применением САПР Cadence и Mentor Graphics.
3. На основе композиционного подхода разработаны специализированные модели входных узлов электронных блоков, предназначенных для работы с современными детекторами, учитывающие погрешности, вносимые оптической системой PET-сканера.
4. Разработаны модели функциональных блоков, позволяющие определять основные характеристики PET-сканера на этапе проектирования.
5. Разработана методика параметризации созданных моделей входных аналоговых блоков PET-сканера.

На основе проведенных экспериментальных исследований компонентов детекторов были решены следующие практические задачи:

1. Создан базовый набор модулей для построения электронных систем обработки данных в современных PET-сканерах, а также мини PET-сканерах на основе современной электронной базы при использовании разработанных методик проектирования.
2. Разработан прототип электронной системы обработки данных для современного PET-сканера.
3. Созданы диагностические и отладочные аппаратно-программные средства тестирования электронных модулей.
4. Созданы тестовые, диагностические и отладочные аппаратные и программные средства для электронной системы современного PET-сканера.
5. Создано тестовое и диагностическое программное обеспечение для работы с модулями PET-сканера.

Использование разработанных электронных узлов и программных средств дает возможность до 50% увеличить площадь рабочего окна позиционно-чувствительного фотодетектора при заданном уровне нелинейности его АПХ, а также до 30% повысить площадь зоны бокового обзора при использовании световода.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах

1. Мьят Вин Тун, Ширяев А.С., Павленко А.Н., Алюшин М.В., Алюшин А.В. Устройство сопряжения с локальной сетью Ethernet // Научная сессия МИФИ - 2004. Сб. Научн. трудов. В 15 томах. Т.1. М.:МИФИ, 2004. - С.210-211.
2. Мьят Вин Тун, Алюшин М.В., Алюшин А.В., Павленко А.Н., Степанов С.А. Устройство сопряжения с локальной сетью Ethernet для многоканальных систем сбора и обработки данных // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М.:МИФИ, 2004.- С.248-249.
3. Мьят Вин Тун. Особенности использования комплектов STK500 и STK502 для разработки программно-аппаратных систем //Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн.трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М.: МИФИ, 2005.- С.186-188.
4. Мьят Вин Тун. Особенности и разработка микро PET сканера // Научная сессия МИФИ - 2006. Сб. Научн. трудов. В 16 томах. Т.16. Конференция «Молодежь и наука». М.: МИФИ, 2006. - С.92-93.
5. Мьят Вин Тун, Алюшин М.В., Алюшин А.В., Виллисов А.В., Шимчук Г.Г., Кутузов С.Г. Разработка модуля USB интерфейса для сбора данных в мини PET-сканере для животных // Научная сессия МИФИ - 2007. Сб. Научн. трудов. В 17 томах. Т.1, М.: МИФИ, 2007. - С.156-157.
6. Мьят Вин Тун, Алюшин М. В. Моделирование узлов аналоговой обработки для современного PET-сканера с помощью системы OrCAD // Научная сессия МИФИ - 2007. Сб. Научн. трудов. В 17 томах. Т. 17. М.: МИФИ, 2007. - С.91-92.
7. Мьят Вин Тун. Повышение разрешения в PET-сканерах // Научная сессия МИФИ - 2007. Сб. Научн. трудов. В 17 томах. Т. 17. Конференция «Молодежь и наука». М.: МИФИ, 2007. - С.86.
8. Мьят Вин Тун. Современное состояние и перспективы развития PET-сканеров// Научная сессия МИФИ - 2007. Сб. Научн. трудов. В 17 томах. Т. 17. Конференция «Молодежь и наука». М.: МИФИ, 2007. - С.80-81.
9. Мьят Вин Тун, Алюшин М.В. Моделирование узлов аналоговой обработки для современного PET-сканера с помощью системы OrCAD // Известия вузов. Электроника. №3, 2007. - С.98-90.
10. Мьят Вин Тун, Алюшин М.В. Разработка методики проектирования электронных устройств, ориентированных на определение параметра DOI //Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М.:МИФИ, 2007.- С.54-57.
11. Мьят Вин Тун, Алюшин М.В. Композиционный подход и создание одномерных моделей разнородных устройств //Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М.:МИФИ, 2007.- С.58-61.
12. Мьят Вин Тун, Алюшин М.В. Создание моделей 2D аналоговых устройств //Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. – М.:МИФИ, 2007.- С.62-64.

Подписано к печати __.04.2007г.
Формат 60 x 90/16. Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Оттиражировано в