

*На правах рукописи*

**ИВАНОВА Алина Александровна**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДИК И АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ  
ЦИФРОВОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ  
ДЛЯ НЕЙТРОННЫХ И ГАММА ДИАГНОСТИК**

**01.04.01 – приборы и методы  
экспериментальной физики**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2016**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БУРДАКОВ Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

НАЙДЕНОВ Виктор Олегович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, заведующий циклотронной лабораторией.

ЖМУДЬ Вадим Аркадьевич – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» НГТУ, г. Новосибирск, заведующий кафедрой автоматики.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Регистрация потоков нейтронов ( $n$ ) и гамма-квантов ( $\gamma$ ) применяется в диагностических целях на исследовательских и промышленных устройствах, использующих генераторы быстрых или тепловых нейтронов, а также в исследованиях по физике высокотемпературной плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС). Традиционно аппаратура регистрации для таких диагностических систем строится на базе схем аналоговой обработки сигнала и спектрометрических аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Такие тракты регистрации обладают низкой термостабильностью интегратора и блока аналоговой обработки сигнала, а также высокой чувствительностью к внешним наводкам вследствие того, что обработка импульса осуществляется в аналоговой форме. Появление в начале 1990-х годов высокоскоростных АЦП с частотой дискретизации  $\sim 60$  МГц и амплитудным динамическим диапазоном  $\sim 10$  разрядов позволило перейти к построению трактов регистрации, основанных на прямой оцифровке сигнала детектора. С выходом цифровых сигнальных процессоров (Digital signal processor, DSP) и программируемых пользователем вентильных матриц (Field-programmable gate array, FPGA) стала возможной реализация алгоритмов цифровой обработки сигнала (ЦОС) на уровне регистрирующей аппаратуры, работающих в режиме реального времени.

Возможность применения алгоритмов ЦОС делает привлекательным решение задач, связанных с регистрацией интенсивных потоков нейтронов и  $\gamma$ -квантов со скоростью счета до  $10^6$  событий/с, при помощи цифровых спектрометрических трактов. Среди коммерческих цифровых систем, выполняющих регистрацию интенсивных потоков нейтронов и  $\gamma$ -квантов, стоит отметить CAEN DT5790, Amptek GAMMA-RAD5, Green Star SBS-75 и SBS-78, обеспечивающие скорость счета до  $10^5$  событий/с. Рекордная скорость счета (до  $4 \cdot 10^6$  событий/с) достигнута в работе [1] при регистрации потока гамма-квантов при помощи сцинтилляционного детектора на основе бромида лантана ( $\text{LaBr}_3$ ) с постоянной времени спада  $\sim 20$  нс. В ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера (г. Новосибирск) на установке «Ускоритель-Тандем БНЗТ» проводятся эксперименты по реализации бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) злокачественных опухолей и созданию системы обнаружения взрывчатых веществ (ВВ). Для этих экспериментов одной из ключевых диагностик является регистрация  $\gamma$ -излучения со скоростью счета, которая может достигать  $10^6$  событий/с. Разработка аппаратуры регистрации диагностического комплекса Вертикальной нейтронной камеры (ВНК) [2] для строящегося экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (г. Кадараш, Франция) ведется в ИЯФ СО РАН. Максимальная скорость счета ВНК ИТЭР может достигать  $10^7$  событий/с. При регистрации потока нейтронов или  $\gamma$ -квантов со скоростью счета  $10^6 - 10^7$  событий/с неизбежно

появление наложенных (Pile-up) событий. Для эффективной регистрации интенсивных потоков следует применять процедуры разделения наложенных событий.

Ко второму классу задач, в которых цифровая спектрометрия обладает большим потенциалом, относятся задачи дискриминации событий по форме импульса. При регистрации быстрых нейтронов детекторами на основе органических сцинтилляторов, чувствительных как к нейтронам, так и к сопутствующим  $\gamma$ -квантам, возникает необходимость разделения этих событий по форме импульса. Для экспериментальных стендов по измерению нейтронного выхода инжекторов и генераторов нейтронов, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН, необходима аппаратура регистрации потока быстрых нейтронов с  $n$ - $\gamma$ -дискриминацией в режиме реального времени. Поэтому задача создания цифровых спектрометрических трактов с процедурами потоковой обработки данных, особенно для регистрации интенсивных потоков частиц  $10^6 - 10^7$  событий/с и  $n$ - $\gamma$ -дискриминации, является несомненно актуальной.

### **Цель работы**

Цель диссертационной работы — создание систем регистрации экспериментальных данных для нейтронных и гамма диагностик со встроенными узлами цифровой потоковой обработки данных, реализованных на базе FPGA:

- разработка спектрометра на основе сцинтиллятора германата висмута (BGO) для регистрации гамма-излучения на установке «Ускоритель-Тандем БНЗТ» (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) с процедурой разделения наложенных событий, позволяющего регистрировать поток частиц до  $10^6$  событий/с;
- разработка анализатора потока быстрых нейтронов, решающего задачу  $n$ - $\gamma$ -дискриминации в режиме реального времени, для исследовательских установок высокотемпературной плазмы и промышленных устройств, использующих источники или генераторы быстрых нейтронов (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск);
- разработка цифрового анализатора импульсных сигналов алмазного детектора Вертикальной нейтронной камеры ИТЭР (г. Кадараш, Франция), формирующего аппаратные спектры в режиме реального времени с дискретностью 10 мс.

### **Личный вклад автора**

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автором лично реализованы алгоритмы ЦОС на базе FPGA, проектирование аппаратной платформы для

регистраторов интенсивного потока  $\gamma$ -квантов и анализатора потока нейтронов. Автором лично проведены метрологические исследования анализатора потока быстрых нейтронов, регистратора ADC12500PX1e и цифрового анализатора для одноканального макета ВНК ИТЭР.

### **Научная новизна**

- Реализована на базе FPGA процедура разделения наложенных событий на основе цифровой гауссовой формировки, работающая в режиме реального времени и обеспечивающая скорость счета до  $10^6$  событий/с.
- Предложена оригинальная схема построения аппаратной платформы спектрометрического тракта, обеспечивающая адаптивность к логике диагностики и типу сцинтилляционного детектора.
- Предложена и реализована на базе FPGA оригинальная схема цифрового узла, обеспечивающая  $n$ - $\gamma$ -дискриминацию с коэффициентом добротности (Figure of Merit)  $FOM = 2.01$  на линии  $1\text{ Cs}$  (477.3 кэВ) при помощи сцинтилляционного детектора на основе стибьена.
- Предложена и реализована на базе FPGA оригинальная архитектура узла цифровой обработки сигналов алмазного детектора для Вертикальной нейтронной камеры ИТЭР, обеспечивающая потоковую обработку данных на частоте 500 МГц.

### **Научная и практическая ценность**

В качестве теоретической значимости диссертационной работы необходимо отметить разработку схемы цифрового спектрометрического тракта регистрации и параллельно-последовательной архитектуры узла ЦОС. Практическая значимость заключается в разработке цифровых спектрометрических трактов для задач  $n$ - $\gamma$ -дискриминации и регистрации интенсивных потоков нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Разработанные регистраторы апробированы в экспериментах на установке «Ускоритель-Тандем БНЗТ» (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск). На их основе также создан экспериментальный стенд в российском отделении международной компании Шлюмберже. При помощи анализатора потока нейтронов проведены измерения нейтронного выхода на прототипе инжектора, разработанного в ИЯФ СО РАН для токамака TCV (г. Лозанна, Швейцария). Цифровой анализатор алмазного детектора для Вертикальной нейтронной камеры (ВНК) ИТЭР (г. Кадараш, Франция) успешно прошел тестовые испытания в Проектном центре ИТЭР (г. Москва). На его основе разрабатывается многоканальная версия системы регистрации ВНК ИТЭР.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Регистратор интенсивного потока  $\gamma$ -квантов со скоростью счета до  $10^6$  событий/с на основе сцинтилляционного детектора BGO с узлом цифровой обработки сигнала, выполняющим процедуры разделения наложенных событий на основе гауссова формирователя и накопление аппаратного спектра в режиме реального времени.
2. Регистратор потока  $\gamma$ -квантов на основе сцинтилляционного детектора BGO с узлом цифровой обработки сигнала, позволяющим работать в режимах с режекцией наложенных событий (с энергетическим разрешением на линии  $^{137}\text{Cs}$  11%) и с процедурой разделения наложенных событий на основе трапецеидального цифрового формирователя (с энергетическим разрешением на линии  $^{137}\text{Cs}$  20%) в режиме реального времени со скоростью счета до  $10^6$  событий/с.
3. Анализатор потока быстрых нейтронов для сцинтилляционного детектора на основе стиблена, обеспечивающий  $n$ - $\gamma$ -дискриминацию в режиме реального времени с коэффициентом добротности (Figure of Merit)  $FOM = 2.01$  на линии  $^1\text{Cs}$  (477.3 кэВ).
4. Цифровой анализатор сигналов алмазного детектора Вертикальной нейтронной камеры ИТЭР (г. Кадараш, Франция), позволяющий проводить потоковую обработку данных на частоте 500 МГц и формировать аппаратные спектры в режиме реального времени с дискретностью 10 мс.

## **Апробация диссертации**

Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН. Материалы диссертации были представлены автором на российских: 13-ой и 14-ой Всероссийских конференциях «Диагностика высокотемпературной плазмы» (г. Звенигород, 2009, 2011); и международных конференциях: международной школе по обработке сигналов ядерной физики (г. Ачирале, Италия, 2011), международном симпозиуме по ядерной физике (г. Анахайм, США, 2012), международной конференции по системам, работающим в режиме реального времени (г. Нара, Япония, 2014).

## **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и изложена на 128 страницах, включая 91 иллюстрацию и 5 таблиц, и содержит 85 наименований библиографии.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено краткое изложение проблем регистрации интенсивных потоков частиц и задач дискриминации событий по форме импульса, обоснована актуальность темы диссертации, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизна и теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор, отражающий эволюцию спектрометрических трактов. Особый акцент в главе сделан на описании цифровых спектрометрических трактов. Подробно рассмотрены особенности проектирования цифровых спектрометрических трактов регистрации и обработки данных в режиме реального времени. Построена обобщенная схема цифрового спектрометрического тракта.

**Вторая глава** посвящена разработке регистраторов интенсивного потока  $\gamma$ -квантов для установки «Ускоритель-Тандем БНЗТ» (ИЯФ СО РАН). Сформулированы требования к аппаратуре регистрации  $\gamma$ -излучения. Рассмотрена архитектура регистратора интенсивного потока  $\gamma$ -квантов с процедурой разделения наложенных событий на основе цифрового гауссова формирователя в режиме реального времени. Описана структура цифрового узла, реализованного на базе FPGA. Приведены результаты экспериментов по регистрации  $\gamma$ -излучения на установке «Ускоритель-Тандем БНЗТ» и в российском отделении международной компании Шлюмберже. Рассмотрена архитектура регистратора интенсивного потока  $\gamma$ -квантов с процедурой разделения наложенных событий на основе цифрового трапецидального формирователя в режиме реального времени. Детально рассмотрена аппаратная платформа и структура цифрового узла, реализованного в FPGA.

Одной из задач, необходимых для реализации БНЗТ злокачественных опухолей является определение и контроль дозы сопутствующего  $\gamma$ -излучения, полученной биологической тканью. Для этого необходимо знать не только интенсивности, но и энергетические спектры  $\gamma$ -излучения. Помимо реализации БНЗТ на установке «Ускоритель-Тандем БНЗТ» проводятся эксперименты по генерации  $\gamma$ -квантов с энергией 9.17 МэВ в реакции  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$  и их резонансному поглощению на ядрах азота  $^{14}\text{N}$ , конечной целью которых является создание установки для обнаружения взрывчатых веществ (ВВ). С практической точки зрения важной характеристикой для рассматриваемого комплекса является время экспозиции, то есть время зондирования исследуемого объекта потоком  $\gamma$ -квантов. Свести время экспозиции к минимуму можно при зондировании исследуемого объекта потоком  $\gamma$ -квантов со скоростью счета  $\sim 10^6$  событий/с. При такой скорости счета время экспозиции объекта с размерами  $3 \times 3$  м и пространственным

разрешением 10 см составит <10 мин. При потоке  $10^6$  событий/с неизбежно появление наложенных событий (см. рисунок 1). Для решения этих задач был разработан регистратор интенсивного потока  $\gamma$ -квантов на основе сцинтилляционного детектора ВГО, обладающего энергетическим разрешением  $\sim 3\%$  в области энергий  $\sim 9$  МэВ.



Рисунок 1. Оциллограмма выходного сигнала детекторного модуля на основе сцинтиллятора ВГО ( $\varnothing 80$  мм, 100 мм) и ФЭУ Photonis XP3312В с диаметром фотокатода  $\varnothing 76$  мм при появлении наложенных событий, зарегистрированная при помощи 14-разрядного АЦП с частотой дискретизации 250 МГц.

Для регистрации  $\gamma$ -излучения для описанных экспериментов разработан регистратор интенсивного потока  $\gamma$ -квантов с процедурой разделения наложенных событий на основе цифрового гауссова формирователя в режиме реального времени. Регистратор состоит из: детекторного модуля, включающего в свой состав сцинтиллятор ВГО с постоянной времени спада 300 нс и ФЭУ Photonis XP3312В с постоянной времени нарастания 5 нс; модуля регистрации и обработки данных, со встроенным цифровым узлом, выполняющим накопление аппаратного спектра в режиме реального времени, а также модуля питания. Ключевым элементом модуля регистрации является 14-разрядный АЦП с частотой дискретизации 64 МГц. В качестве основы для построения цифрового узла тракта регистрации выбрана FPGA ALTERA Cyclone III. Для разделения наложенных событий применен гауссов формирователь, преобразующий экспоненциальный сигнал в короткий гауссов импульс (см. рисунок 2), что эквивалентно снижению вероятности появления наложенных событий. Во время регистрации потока  $\gamma$ -квантов процесс формирования заключается в выполнении дискретной свертки входного сигнала с импульсной характеристикой формирователя. С помощью регистратора интенсивного потока  $\gamma$ -квантов с гауссовым формирователем были проведены измерения энергетических спектров рентгеновского излучения высоковольтных элементов тандемного ускорителя,  $\gamma$ -излучения литиевой нейтроногенерирующей и углеродной  $\gamma$ -образующей мишеней. При помощи регистратора с детекторным блоком на основе сцинтиллятора NaI(Tl) зарегистрирован аппаратный спектр  $\gamma$ -квантов,



излучаемых изотопом  $^{133}\text{Ba}$  с активностью 370 МБк при скорости счета  $\sim 1.3 \cdot 10^5$  событий/с.

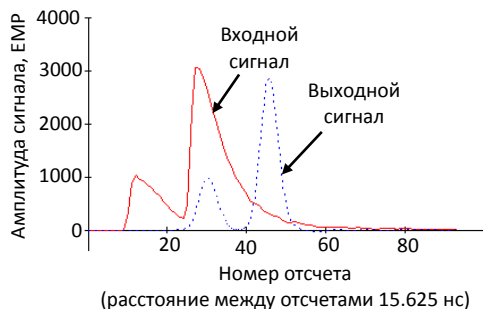


Рисунок 2. Результат обработки наложенных событий гауссовым цифровым формирователем (красный график — входной сигнал, синий график — выходной сигнал модуля цифрового формирователя).

Регистратор интенсивного потока  $\gamma$ -квантов с гауссовым цифровым формирователем успешно применялся в экспериментах на установке «Ускоритель-Тандем БНЗТ» и стал одним из важнейших средств контроля  $\gamma$ -излучения на установке «Ускоритель-Тандем БНЗТ», поэтому к нему предъявляются повышенные требования по надежности работы и обмену данными с ЭВМ. Для обеспечения стабильной передачи данных необходимо перейти от командного и информационного обмена «сырыми» пакетами на обмен данными по протоколу TCP/IP. Поскольку часть экспериментов, проводимых на установке «Ускоритель-Тандем БНЗТ» заключается в регистрации  $\gamma$ -излучения с низкой скоростью счета  $I < 10^5$  событий/с (контроль активности изотопов, генерируемых на установке), необходимо реализовать два режима регистрации: при низкой скорости счета  $I < 10^5$  событий/с с процедурой режекции наложенных событий и максимальным энергетическим разрешением; при высокой скорости счета  $10^5 \leq I < 10^6$  событий/с с процедурой разделения наложенных событий.

В рассматриваемом регистраторе процедура разделения наложенных событий реализована на основе рекурсивного трапецеидального цифрового формирователя, преобразующего экспоненциальные сигналы в короткие трапецеидальные импульсы. На рисунке 3 представлен результат обработки трапецеидальным формирователем наложенных событий, зарегистрированных сцинтилляционным детектором на основе ВГО и ФЭУ Photonic XP3312В. Для измерения энергетического разрешения регистратора интенсивного потока  $\gamma$ -квантов с процедурой разделения наложенных событий на основе трапецеидального формирователя были зарегистрированы аппаратные спектры  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$ . В режиме с режекцией наложенных событий энергетическое разрешение регистратора на основе сцинтиллятора

ВГО на линии  $^{137}\text{Cs}$  составило 11%, в режиме с процедурой разделения наложенных событий на основе трапецеидального формирователя — 20%.

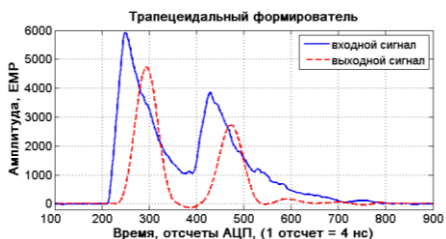


Рисунок 3. Обработка трапецеидальным формирователем наложенных событий, зарегистрированных сцинтиляционным детектором на основе ВГО (Ø80 мм, 100 мм) и ФЭУ Photonis XP3312В с диаметром фотокатода Ø76 мм, синий график — входной сигнал, красный — выходной сигнал.

**Третья глава** посвящена разработке анализатора потока быстрых нейтронов для диагностики промышленных устройств, использующих источники или генераторы быстрых нейтронов, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН. Рассмотрены результаты и методика проведения метрологических измерений систем  $n$ - $\gamma$ -дискриминации. Приведены результаты экспериментальной проверки анализатора по измерению нейтронного выхода на прототипе инжектора, разработанного в ИЯФ СО РАН для токамака TCV (г. Лозанна, Швейцария).

Регистрация потока быстрых нейтронов применяется для диагностики промышленных устройств, использующих источники или генераторы быстрых нейтронов. Для такого рода диагностики используются детекторы на основе органических сцинтилляторов (стильбен или  $p$ -терфенил), которые позволяют различать события, связанные с регистрацией нейтронов, от фоновых событий, таких как космическое излучение (мюоны) и сопутствующих нейтронам  $\gamma$ -квантов. При регистрации нейтрона и  $\gamma$ -кванта форма сцинтилляционных импульсов, генерируемых этими детекторами, будет различной. Для решения задачи  $n$ - $\gamma$ -дискриминации в аналоговых системах широко применяется метод сравнения заряда, собранного за разные временные интервалы импульса. В терминах цифровых систем данный метод заключается в следующем: импульсы от детекторного модуля оцифровываются АЦП с высокой частотой дискретизации, для каждого импульса вычисляются суммы  $FAST$  и  $SLOW$  из последовательности отсчетов АЦП на интервалах времени, обозначенных на рисунке 4 как  $t_{FAST}$  и  $t_{SLOW}$  соответственно, где представлена форма импульсов, полученная усреднением по 1000 событиям при регистрации нейтрона и  $\gamma$ -кванта. Соотношение сумм  $FAST$  и  $SLOW$  используется в качестве критерия  $n$ - $\gamma$ -дискриминации.

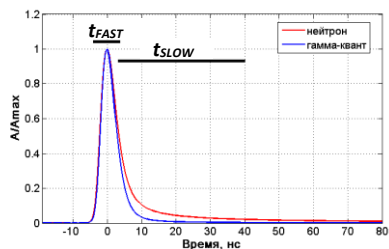


Рисунок 4. Форма импульсов, полученных усреднением по 1000 событиям при регистрации нейтрона (красный график) и  $\gamma$ -кванта (синий график) детектором на основе  $\text{O}30 \times 30$  мм стильбена и ФЭУ Hamamatsu R6231-100.

На основе аппаратной платформы регистратора интенсивного потока  $\gamma$ -квантов, рассмотренного в разделе 2.3, реализован анализатор потока быстрых нейтронов с процедурой  $n$ - $\gamma$ -дискриминации методом сравнения заряда в режиме реального времени. Цифровой узел регистратора интенсивного потока  $\gamma$ -квантов, рассмотренный в разделе 2.3.2, построенный на базе FPGA Altera Cyclone III, был модифицирован для реализации алгоритма  $n$ - $\gamma$ -дискриминации, исполняемого в режиме реального времени. Проведена численная оценка качества  $n$ - $\gamma$ -дискриминации, т. е. рассчитаны коэффициенты добротности (Figure of Merit,  $FOM$ ) на различных энергетических срезах. На линии 1 Cs  $FOM$  составил 2.01. Проведен поиск оптимальных параметров узла ЦОС. Анализатор потока быстрых нейтронов с  $n$ - $\gamma$ -дискриминацией в режиме реального времени был апробирован в эксперименте по измерению нейтронного выхода на прототипе инжектора, разработанного в ИЯФ СО РАН для токамака TCV (г. Лозанна, Швейцария). На рисунках 5 а и б представлены графики  $PSD$  с режекцией высокоэнергетических событий и гистограмма событий соответственно.

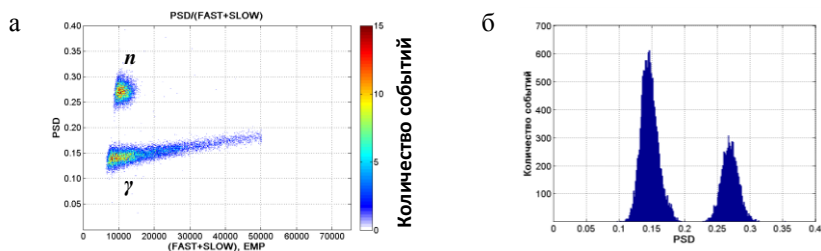


Рисунок 5. а — распределение  $PSD$  от  $FAST + SLOW$  и б — гистограмма событий с коррекцией высокоэнергетических событий при измерении нейтронного выхода на прототипе инжектора для токамака TCV (г. Лозанна, Швейцария).

**Четвёртая глава** посвящена разработке цифрового анализатора сигналов алмазного детектора для Вертикальной нейтронной камеры (ВНК) ИТЭР (г. Кадараш, ИТЭР). Описана структура цифрового анализатора импульсных сигналов алмазного детектора для ВНК ИТЭР. Рассмотрена последовательно-параллельная схема проектирования модуля цифровой обработки сигнала на базе регистратора ADC12500PXIe. Рассмотрена специфика реализации рекурсивных алгоритмов при реализации по последовательно-параллельной схеме. Приведены результаты метрологических испытаний одноканального макета ВНК ИТЭР и сравнение аппаратных спектров ионизирующего излучения, зарегистрированных цифровым анализатором сигналов алмазного детектора для макета ВНК ИТЭР и аналоговой системой ORTEC 926.

ВНК ИТЭР является одной из диагностик, предназначенных для регистрации потока термоядерных нейтронов [3]. Требования к диагностическому комплексу ВНК ИТЭР: регистрация потока нейтронов до  $10^7$  событий/с; формирование аппаратных спектров в режиме реального времени с дискретностью 10 мс; многоканальная система регистрации; единая система синхронизации каналов регистрации; сопряжение на уровне ПО с общей системой хранения данных ИТЭР; электронное оборудование, сертифицированное по стандартам ИТЭР. Сигнал на выходе усилительного блока имеет экспоненциальную форму с длительностью нарастающего фронта  $\sim 10$  нс. На базе узла ЦОС регистратора ADC12500PXIe [4] спроектирован цифровой анализатор сигналов алмазного детектора для ВНК ИТЭР. Ключевая особенность цифрового анализатора заключается в непосредственной реализации блоков обработки данных. В регистраторе ADC12500PXIe частота дискретизации АЦП составляет 500 МГц, при этом для FPGA Altera Cyclone III предельные частоты работы ключей — 500 МГц, встроенных умножителей FPGA разрядностью  $18 \times 18$  бит — 287 МГц. Поэтому для реализации потоковой обработки данных на базе регистратора ADC12500PXIe необходимо снизить частоту потока данных в FPGA минимум в два раза. В регистраторе ADC12500PXIe использовано внешнее 36-разрядное ОЗУ. Для эффективного использования емкости ОЗУ 12-разрядные отсчеты следует «склеить» по три, преобразовав в 36-разрядные слова. Таким образом узел ЦОС должен обрабатывать 36-разрядные данные с частотой следования 166.7 МГц, а все блоки обработки данных должны быть построены по последовательно-параллельной схеме.

В разделе 4.5 приводятся результаты метрологических испытаний одноканального макета ВНК ИТЭР, проведенные на стенде в ИЯФ СО РАН. При регистрации экспоненциальных импульсов с амплитудой входных сигналов 250 мВ и частотой 1 МГц ширина пика аппаратного спектра на полувысоте составила 4 канала, максимально отклонение шкалы преобразования от линейной — 1 канал. Раздел 4.6 посвящен

экспериментальной проверке одноканального макета ВНК ИТЭР при регистрации ионизирующего излучения, выполненной на стенде в Проектном центре ИТЭР (г. Москва). Проведено сравнение аппаратных спектров, зарегистрированных цифровым анализатором сигналов алмазного детектора для макета ВНК ИТЭР и аналоговым спектрометрическим АЦП ORTEC 926. Формы спектров, зарегистрированных цифровой и аналоговой системами (см. рисунок 6), не отличаются, что говорит о корректности работы цифрового анализатора сигналов алмазного детектора ВНК ИТЭР.

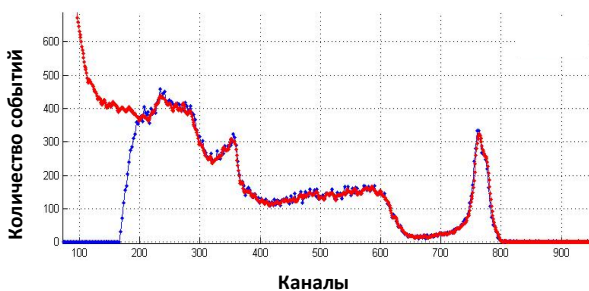


Рисунок 6. Наложение аппаратных спектров от нейтронного генератора ИНГ-07Т, зарегистрированных аналоговой (синий график) и цифровой (красный график) системами за время экспозиции, составляющее 300 секунд.

**В заключении** изложены основные результаты, полученные в диссертации:

- Разработаны регистраторы интенсивного потока  $\gamma$ -квантов со скоростью счета до  $10^6$  событий/с на основе сцинтилляционных детекторов ВГО и NaI(Tl) для установки «Ускоритель-Тандем БНЗТ» (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) и компании Шлюмберже соответственно. На базе FPGA реализован узел ЦОС с процедурой разделения наложенных событий на основе гауссова формиратора, обеспечивающий накопление аппаратных спектров в режиме реального времени.
- Создана единая аппаратная платформа с реконфигурируемым узлом ЦОС, реализованном на базе FPGA, для нейтронных и гамма диагностик на основе 14-разрядного АЦП с частотой дискретизации 250 МГц.
- На основе единой аппаратной платформы создан регистратор потока  $\gamma$ -квантов на основе сцинтилляционного детектора ВГО для установки «Ускоритель-Тандем БНЗТ» (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск). На базе FPGA реализован узел ЦОС, позволяющий работать в режимах с режекцией наложенных событий (с энергетическим разрешением на линии  $^{137}\text{Cs}$  11%) и с процедурой разделения наложенных событий на основе трапецидального

цифрового формирователя (с энергетическим разрешением на линии  $^{137}\text{Cs}$  20%) со скоростью счета до  $10^6$  событий/с.

- На базе единой аппаратной платформы разработан анализатор потока быстрых нейтронов для сцинтилляционного детектора на основе стильбена, обеспечивающий  $n$ - $\gamma$ -дискриминацию в режиме реального времени с коэффициентом добротности (Figure of Merit)  $FOM = 2.01$  на линии 1 Cs (477.3 кэВ). Анализатор апробирован в эксперименте по измерению нейтронного выхода на прототипе инжектора, разработанного в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) для токамака TCV (г. Лозанна, Швейцария).

- На базе регистратора ADC12500PXIe создан цифровой анализатор сигналов алмазного детектора для одноканального макета системы регистрации ВНК ИТЭР (г. Кадараш, Франция). Реализована последовательно-параллельная архитектура узла ЦОС, позволяющего проводить потоковую обработку данных на частоте 500 МГц и формировать аппаратные спектры в режиме реального времени с дискретностью 10 мс. Одноканальный макет системы регистрации ВНК ИТЭР прошел успешную экспериментальную проверку в Проектном центре ИТЭР (г. Москва). На его основе разрабатывается многоканальная версия системы регистрации ВНК ИТЭР.

#### **Основные результаты диссертации** опубликованы в работах:

1. П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.А. Иванова, А.Н. Квашнин, А.И. Котельников, Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, В.Г. Швырев. Цифровой анализатор импульсных сигналов нейтронного детектора // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика, 2014, Т. 9, Вып. 3, С. 11 – 19
2. А.А. Иванова, В.И. Алейник, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, Е.А. Пурыга, А.Ф. Ровенских, Ю.С. Суляев, А.Д. Хильченко. Адаптивный гамма-спектрометр с высокой скоростью обработки событий // Приборы и техника эксперимента, 2012, № 1, С. 5 – 15.
3. А.А. Иванова, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.И. Котельников, Д.В. Моисеев, Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко, В.Г. Швырев. Регистратор импульсных сигналов для диагностик высокотемпературной плазмы // Приборы и техника эксперимента, 2016, № 3, С. 24 – 31.
4. Е.А. Пурыга, С.В. Иваненко, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, А.А. Иванова. Многофункциональный быстродействующий регистратор ADC12500 // Приборы и техника эксперимента, 2012, № 3, С. 75 – 83.
5. А.Д. Хильченко, А.А. Иванова. Система регистрации энергетического спектра  $\gamma$ -квантовой реакции  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$  // Сборник тезисов 13-ой

Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-13, 8-13 июня 2009, г. Звенигород, С. 85 – 87.

6. А.А. Иванова, Е.А. Пурыга, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, В.И. Алейник, А.Ф. Ровенских, Ю.С. Суляев, А.Д. Хильченко. Адаптивный скоростной гамма-спектрометр // Сборник тезисов 14-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14, 5-10 июня 2011, г. Звенигород, С. 62 – 63.
7. A.A. Ivanova, S.V. Ivanenko, A.N. Kvashnin, E.A. Puriga, A.F. Rovenskikh, A.D. Khilchenko. Gamma-ray spectrometer with high event processing rate // 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record, October 29 - November 3, 2012, Anaheim, California, USA, N14-102, pp. 1052 – 1055.
8. A.A. Ivanova, V.N. Amosov, D.A. Skopintsev, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin, P.V. Zubarev, S.V. Ivanenko, A.I. Kotelnikov, E.A. Puryga. Real time digital pulse analyzer for ITER neutron diagnostics // 19th IEEE-NPSS Real Time Conference (RT), May 26-30, 2014, Nara, Japan, pp. 1 – 3.

### **Список литературы**

- [1] M. Nocente, M. Tardocchi, A. Olariu, S. Olariu, I.N. Chugunov et al. High resolution gamma ray spectroscopy at MHz counting rates with LaBr<sub>3</sub> scintillators // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2011, pp. 2010 – 2013.
- [2] A.A. Ivanova, V.N. Amosov, D.A. Skopintsev, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin, P.V. Zubarev, S.V. Ivanenko, A.I. Kotelnikov, E.A. Puryga. Real time digital pulse analyzer for ITER neutron diagnostics // 19th IEEE-NPSS Real Time Conference (RT), May 26-30, 2014, Nara, Japan, pp. 1 – 3.
- [3] П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.А. Иванова, А.Н. Квашнин, А.И. Котельников, Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, В.Г. Швырев. Цифровой анализатор импульсных сигналов нейтронного детектора // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика, 2014, Т. 9, Вып. 3, С. 11 – 19.
- [4] А.А. Иванова, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.И. Котельников, Д.В. Моисеев, Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко, В.Г. Швырев. Регистратор импульсных сигналов для диагностик высокотемпературной плазмы // Приборы и техника эксперимента, 2016, № 3, С. 24 – 31.

ИВАНОВА Алина Александровна

**Развитие методик и аппаратных средств  
цифровой спектрометрии  
для нейтронных и гамма диагностик**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Сдано в набор 04.04.2016 г.

Подписано в печать 04.04.2016 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 усл. печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 6

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринте ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*