

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-2000-209

На правах рукописи
УДК 539.1.075

Р-882

РУСАНОВ
Иван Русалинов

**РАЗРАБОТКА
И СОЗДАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ
ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРА СФЕРА**

**Специальность: 01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики**

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

Дубна 2000

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований и Институте ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук

Научные руководители:
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

ЛИТВИНЕНКО
Анатолий Григорьевич
АФАНАСЬЕВ
Сергей Владимирович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук
профессор
кандидат технических наук
старший научный сотрудник

ОМЕЛЬЯНЕНКО
Михаил Николаевич
ГРЕБЕНЮК
Виктор Матвеевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Научно-технологический комплекс «Электроника» –
Российский научный центр «Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2000 года в «___» часов на заседании диссертационного совета при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований 141980, г. Дубна, Московской области, ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук, профессор

 М. Ф. Лихачев

Представленная диссертация основана на материалах разработок, выполненных автором в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований и Институте ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук в период с 1992 по 1999 год.

Целью настоящей работы является разработка и внедрение электронной аппаратуры для экспериментов, проводимых на спектрометре СФЕРА (ЛВЭ ОИЯИ). Аппаратура предназначена для:

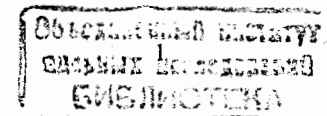
- сбора данных с дрейфовых камер центрального детектора спектрометра СФЕРА;
- быстрого отбора «полезных» событий по времени пролета частиц;
- создания системы высоковольтного питания для сцинтилляционного годоскопа спектрометра СФЕРА.

Актуальность работы обусловлена ее направленностью на разработку современной электронной аппаратуры, используемой в экспериментах, проводимых на универсальном 4π-спектрометре СФЕРА:

1. Для регистрации продуктов фрагментации мишени спектрометра СФЕРА изготавливается цилиндрическая дрейфовая камера. При проведении планируемых экспериментов необходимо обеспечить регистрацию многотрековых событий с высоким пространственным разрешением.

Для создания системы сбора данных с дрейфовых камер был разработан модуль *M1102 Multihit TDC*.

2. На спектрометре СФЕРА осуществляются эксперименты по изучению реакций фрагментации ядер дейтерия в K^+ и развала дейтрона. В этих исследованиях время пролета частицы, вылетающей из точки взаимодействия, пропорционально длине пробега и обратно пропорционально ее скорости. Поэтому частицы с одинаковым импульсом, но с различными массами имеют различное время пролета. Так как эта методика идентификации частиц применялась при создании триггера по времени пролета, то с



целью улучшения работы системы сбора данных необходимо использовать быстрый триггер с существенно меньшим «мертвым» временем.

Решение этой задачи привело к разработке и созданию преобразователя время-код с отбором интервалов времени по длительности и быстрого «временного дискриминатора».

3. Область фрагментации ядра-снаряда характеризуется значительной множественностью вторичных частиц, летящих в малом телесном угле. В этих исследованиях идентификация заряженных частиц осуществляется путем измерения импульса по отклонению в постоянном магнитном поле и определения скорости частиц с помощью времяпролетной методики. Для решения этой задачи координатные измерения на спектрометре СФЕРА выполняются с помощью набора сцинтилляционных годоскопов.

Для обеспечения работы нового сцинтилляционного годоскопа была создана программно-управляемая система высоковольтного питания для фотоэлектронных умножителей.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

1. На основе анализа источников погрешностей счетно-импульсного метода предложен измерительный алгоритм для преобразования время-код, работающий по многофазному методу. На базе этого алгоритма разработана оригинальная схема четырехфазного интерполятора для измерения «остаточных» интервалов в комбинированных преобразователях время-код.

Предложенная схема многофазного интерполятора до настоящего времени не имеет аналогов в литературе.

2. Впервые, на базе программируемых интегральных схем повышенной степени интеграции фирмы *XILINX*, разработаны:

— архитектура и создан 16-канальный преобразователь время-код в виде интегральной схемы;

— модуль *M1102 Multihit TDC*, работающий по комбинированному методу. Устройство отвечает всем требованиям многостопового временного анализа. При этом оно не уступает по своим измерительным характеристикам зарубежным разработкам подобного назначения.

3. Предложен и реализован на практике принцип «временного дискриминатора» для реализации устройств, применяемых при создании триггеров по времени пролета.

Схема «временного дискриминатора» не имеет аналогов в литературе.

4. Создана система высоковольтного питания фотоэлектронных умножителей, входящих в состав сцинтилляционного годоскопа спектрометра СФЕРА.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанная аппаратура нашла применение в экспериментах, проводимых на установке СФЕРА в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты работ, вошедших в диссертацию и опубликованных в виде журнальных статей, препринтов и сообщений ОИЯИ [1,2,6-9], обсуждались на научно-методических семинарах Лаборатории высоких энергий, докладывались на международных совещаниях «Релятивистская ядерная физика от сотен МэВ до ТэВ», Созополь (1996) и Варна (1998), Болгария [3-5].

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 98 страниц машинописного текста, 7 таблиц, 36 рисунков. Она содержит также библиографический список литературы из 99 наименований и приложение, включающее в себя полные характеристики разработанных устройств.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В ВВЕДЕНИИ сформулированы цель работы, ее актуальность и научная новизна. Приведен краткий обзор диссертации.

ГЛАВА I. Первая глава посвящена разработке многофазного интерполятора для измерения «остаточных» интервалов времени.

После короткого введения, на основе обзора литературы (**раздел 1.1**), изложены наиболее часто используемые методы преобразования время-код и принципы построения систем временного анализа. Среди них.

— одностоповый и многостоповый режимы работы анализаторов, применяемых в экспериментальной физике;

— счетно-импульсный метод;

— методы для измерения малых интервалов времени: хронотрон, нониус и время-амплитудный метод;

— комбинированные методы.

В разделе 1.2 рассмотрены вопросы, связанные с применением микросхем общего назначения для измерения интервалов времени: памяти, сдвиговых регистров и аналого-цифровых преобразователей.

В конце раздела дано краткое описание наиболее широко применяемых модулей для съема информации с дрейфовых камер. Признаком, объединяющим рассмотренные устройства в одну группу, является способ преобразования интервалов времени в цифровой код — комбинированный метод с интерполятором на основе фазового кодирования.

В разделах 1.3 – 1.4 на базе обобщенного анализа источников измерительной ошибки, действующих во время преобразования, предложен алгоритм измерительного процесса [1]. Данный алгоритм разработан на основе многофазного метода для измерения интервалов времени. В процессе преобразования формируется множество цифровых кодов, соответствующих длительности измеряемого интервала. Так как счетно-импульсный метод преобразует каждый временной интервал двузачно и оценки временного интервала имеют различную частоту «проявления» в данном множестве, то при помощи алгоритмов «усреднения» результатов измерения формируется оптимальная оценка для измеряемого интервала.

Раздел 1.5. В начале раздела, после короткого введения, приведен анализ работы схемы синхронизации в счетно-импульсных преобразователях. Анализ работы схемы фазирования показывает, что логические элементы, осуществляющие функцию фазирования, срабатывают по управляющему фронту первого тактового импульса эталонной серии за стартовым и стоповым сигналами. Если в преобразователе используются две противофазные последовательности импульсов опорной частоты, то по очередности срабатывания схемы фазирования можно определить моменты прихода стар-

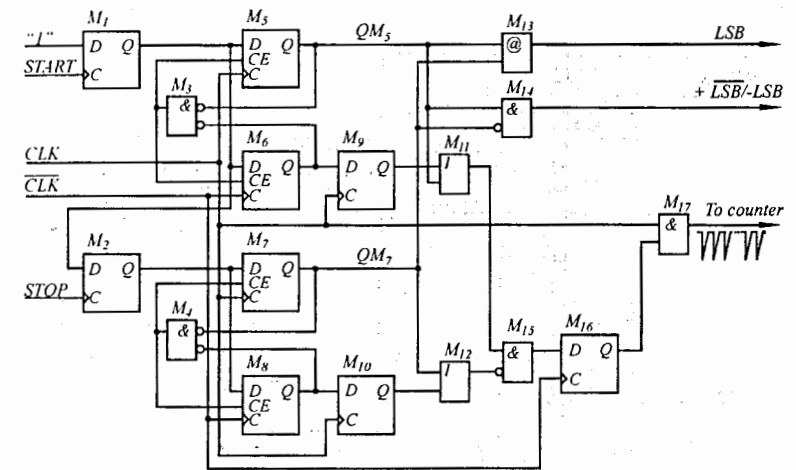


Рис. 1. Функциональная схема двухфазного преобразователя время-код

тового и стопового сигналов относительно фазы опорной серии. На базе этой информации повышается вдвое временное разрешение и точность измерения.

В разделе 1.5.1 рассмотрен принцип работы двухфазной схемы синхронизации с обратной связью (см. рис.1) [2]. В данном преобразователе по состоянию выходов схемы синхронизации определяется время прихода стартового и стопового сигналов относительно импульсов эталонной серии с точностью до половины эталонного периода.

Раздел 1.5.2. На рис.2 приведена схема 4-фазного интерполятора [2]. Реализация интерполяционного алгоритма «остаточных» интервалов осуществляется на базе рассмотренного двухфазного интерполятора. В данном случае импульсные последовательности $CLK1-CLK4$ имеют одинаковый эталонный период и коэффициент заполнения — 50%. Они сдвигаются относительно «основного» тактового сигнала $CLK1$ по правилу

$$\varphi_{i,j} = (i-1) \frac{T_c}{2M}, \quad (1)$$

где i – номер импульсных серий ($i = 1, 2, 3, 4$).

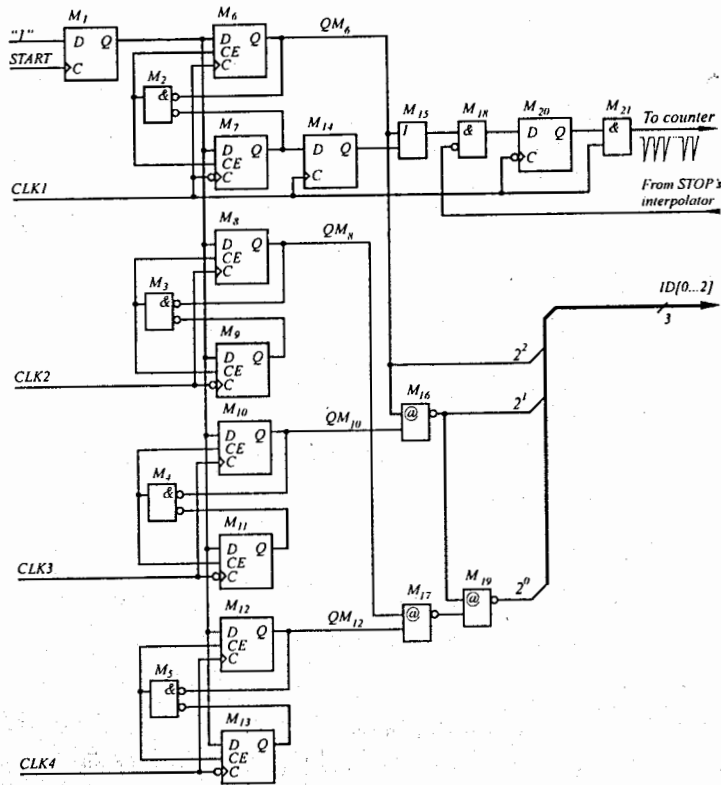


Рис.2. Функциональная схема 4-фазного интерполятора

Цифровой код, соответствующий «остаточному» интервалу, определяется следующим образом:

Старший разряд b_2 : его значение определяется относительно основной тактовой частоты $CLK1$:

$$b_2 = \overline{QM_6}. \quad (2)$$

Разряд b_1 : его значение определяется относительно импульсных последовательностей $CLK1$ и $CLK3$:

$$b_1 = \overline{QM_6 \oplus QM_{10}}. \quad (3)$$

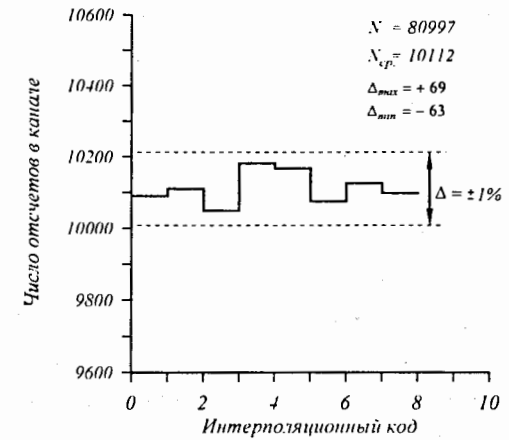


Рис.3. Распределение суммарного интерполяционного кода

Младший разряд b_0 : его значение зависит от состояний всех схем фазирования:

$$b_0 = \overline{\overline{(QM_6 \oplus QM_{10} \oplus (QM_8 \oplus QM_{12}))}}. \quad (4)$$

Предложенный интерполяционный алгоритм реализован в модуле [6]. Линейность интерполятора экспериментально была определена по так называемому «белому спектру». На рис.3 приведено полученное распределение суммарного интерполяционного кода. Дифференциальная нелинейность составляет 1%. Проведенные тесты показали, что вследствие неидеальности применяемых элементов (ненулевое время подготовки по D -входу триггеров и ненулевое время срабатывания логических элементов) полностью устранить нелинейности интерполяторов не удастся. Поэтому, для заданной эталонной частоты, к идеальному результату можно приближаться, если минимальный период импульсов генератора определяется по правилу

$$0,5T_c \geq T_{FF} + T_{\&} + T_{EC}, \quad (5)$$

где T_{FF} – время срабатывания триггеров, T_{EC} – минимальное время подготовки по EC -входу триггеров, $T_{\&}$ – время задержки элемента «И».

Выполнение условия (5) обеспечивает правильность работы схемы фазирования с обратной связью. Кроме этого, при заданной точности преобразования время-код ΔT , для достижения минимальной нелинейности необходимо выполнение условия

$$\Delta T \geq T_D, \quad (6)$$

где ΔT – цена канала преобразователя время-код, T_D – минимальное время подготовки по D -входу триггеров интерполятора.

ГЛАВА II. Вторая глава посвящена разработке многостопового многоканального преобразователя время-код *M1102* [3–6]. Впервые, на основе многократно программируемых интегральных схем фирмы *XILINX*, разработан измеритель интервалов времени комбинированного типа. Предложенный способ создания модулей для временного анализа позволяет отказаться от трудоемких схемных решений на базе стандартных интегральных схем.

В разделе 2.1 приведена блок-схема модуля (см. рис.4). Модуль представляет собой специализированное устройство для съема временной информации с дрейфовых камер. Использование в модуле программируемых схем с большой степенью интеграции позволило обеспечить необходимые измерительные характеристики:

- цена канала составляет 2 нс;
- программируемый измерительный диапазон (16 нс – 8 мкс / шаг 64 нс);
- программируемое количество регистрируемых сигналов «стоп» в каждом измерительном канале (1 – 16 стоповых импульсов);
- измерение временного интервала осуществляется по положительному или по отрицательному фронту управляющих сигналов;
- два режима работы: «общий старт» и «общий стоп»;
- исключение нулевой информации и передача только значащей.

Раздел 2.2. Основу модуля составляет 16-канальный преобразователь время-код, разработанный на основе интегральной схемы фирмы *XILINX* – *XC4010PQ160-4*. По логическим уровням входных и выходных сигналов, напряжению питания и диапазону рабочих температур он согласуется с *TTL*-логикой серии *74FXX*.

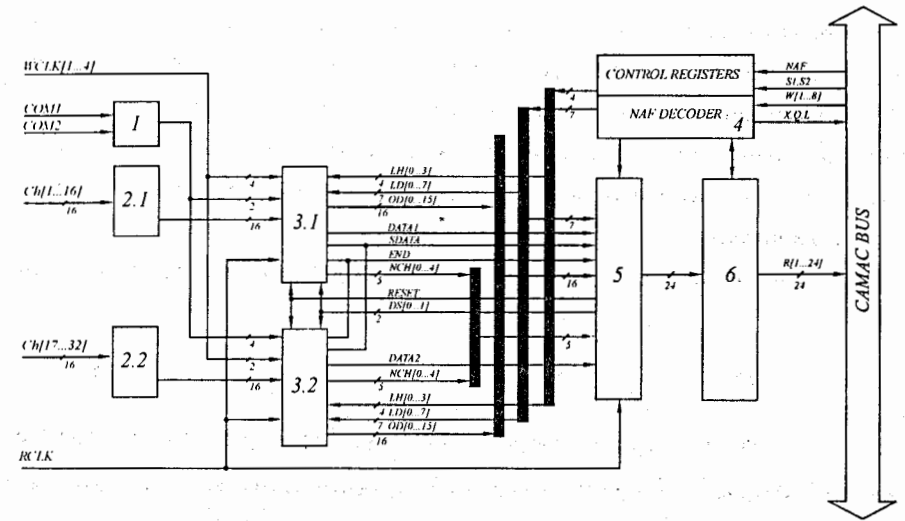


Рис. 4. Блок-схема модуля *M1102 Multihit TDC*: 1, 2 – трансляторы уровней входных сигналов; 3 – 16-канальный преобразователь время-код; 4 – *NAF* декодер; 5 – арифметико-логическое устройство; 6 – буфер типа *FIFO*

Раздел 2.2.1. В преобразователе реализуются три режима работы: преобразование измеряемых интервалов в цифровой код, считывание и хранение информации.

Режим «общий старт» (раздел 2.2.1.1). При появлении сигнала «общий старт», несущего информацию о начале временных интервалов, измеряется временное положение его переднего фронта относительно положительного фронта, следующего за ним, импульса тактовой серии *WCLK1*. После срабатывания стартового интерполятора, синхронизируя стартовый импульс относительно импульсов тактового сигнала *WCLK1*, инициализируется начало счета «грубо». «Грубое» преобразование измеряемых интервалов в цифровой код выполняется при помощи 9-разрядного синхронного счетчика.

С момента прихода сигнала «стоп» также происходит интерполяция его временного положения и синхронизация относительно импульсов тактового сигнала *WCLK1*. В каждом измерительном канале используется индивидуальный интерполятор, аналогичный стартовому интерполятору. Запись в каналный накопитель типа *LIFO* текуще-

го состояния выходов счетчика, соответствующего времени «грубо», осуществляется синхронно, по положительному фронту третьего за стоповым сигналом тактового импульса. По четвертому тактовому импульсу опорной серии производится смена адресов канального накопителя типа *LIFO* и сброс входного селектора сработавшего канала. После этого преобразователь готов к измерению временных координат следующего стопового импульса.

Максимальное «мертвое» время по стоповому каналу определяется из выражения

$$T_D = 4T_e, \quad (7)$$

где T_e — эталонный период тактового сигнала *WCLK1*. В модуле *M1102 Multihit TDC* при тактовой частоте эталонной серии $f = 64$ МГц «мертвое» время по стоповому каналу составляет 62,5 нс.

После завершения каждого измерительного цикла модуль переключается в режим счета данных.

Оценка измеряемого временного интервала определяется из соотношения

$$N = N_G + N_1 - N_2, \quad (8)$$

где N_G — число отсчетов «грубо», N_1 и N_2 — коды интерполяции стартового и стопового сигналов.

Режим «общий стоп» (раздел 2.2.1.2). В этом режиме кроме сигнала «общий стоп» необходим также и сигнал «начало измерения», по которому инициализируется измерение временных интервалов. «Грубое» преобразование интервалов в цифровой код выполняется при помощи 10-разрядного кольцевого счетчика. Старший разряд счетчика «грубо» используется для того, чтобы при чтении не появилась неоднозначность в значениях времени, принадлежащих разным периодам сканирования (период сканирования равен 8 мкс). При переходе к новому периоду сканирования старший разряд счетчика «грубо» устанавливается в противоположное состояние. Для сохранения этой информации дополнительно был использован один разряд быстрого накопителя типа *LIFO* каждого измерительного канала.

В этом режиме запись осуществляется до появления сигнала «общий стоп». При переполнении быстрый накопитель типа *LIFO* не блокируется.

После появления сигнала «общий стоп» измерение прекращается, текущее состояние счетчика «грубо» сохраняется. При наличии ненулевых данных модуль устанавливается в режим счета данных. Истинное значение измеряемого интервала определяется следующим образом:

— если состояние старшего разряда счетчика «грубо» и состояние того же самого разряда при регистрации сигнала «стоп» одинаковы, то

$$T = \Delta T(N_1 - N_2), \quad (9)$$

иначе

$$T = \Delta T(N_1 + (4095 - N_2)), \quad (10)$$

где N_1 — код временной координаты сигнала «общий стоп», N_2 — код временной координаты стопового сигнала, $\Delta T = 2$ нс — цена канала.

Запоминающие устройства современных временных анализаторов строятся по многоступенчатой схеме. В данном модуле первая ступень буферной памяти находится в преобразователе время-код, реализованном в виде интегральной схемы. Для накопления измерительной информации используют быстродействующую буферную память, рассмотренную в [7] (раздел 2.2.2). По способу обращения она является памятью с параллельно-последовательной выборкой. В памяти используются 16 одинаковых накопителей типа *LIFO*. Во время записи они работают параллельно, а во время считывания образуют общую буферную память со страничной организацией. Кроме этого, запись и считывание осуществляются отдельными тактовыми импульсами, соответственно *WCLK1* и *RCLK*. Такая организация памяти наряду с возможностью высокоскоростной записи информации позволяет обеспечить перезапись только ненулевых данных.

Раздел 2.3. Вторая ступень разработана на основе интегральной памяти типа *FIFO*. Подобная организация второй ступени буферной памяти позволяет осуществлять процессы перезаписи результатов преобразования и их выдачу в магистраль крейта одновременно. Поэтому во время передачи данных в компьютер модуль может выполнять

свои основные функции — преобразование в цифровой код временных интервалов или перезапись данных преобразования во вторую ступень буфера. Так заметно уменьшается «мертвое» время между соседними измерительными циклами.

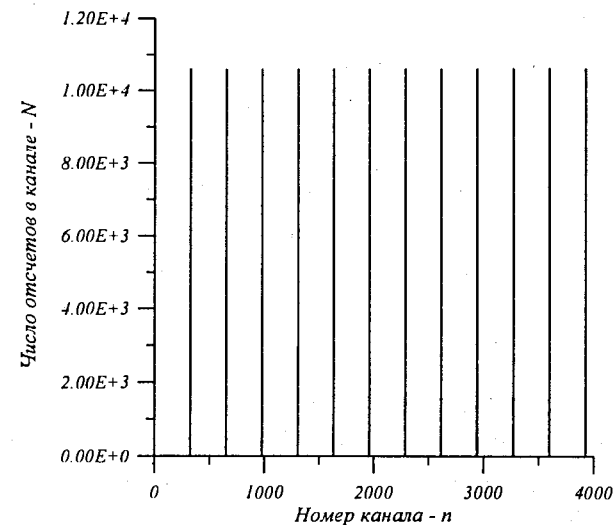
Дешифратор команд *КАМАК* обеспечивает управление модулем со стороны магистрали крейта. Коды, соответствующие зарегистрированным в цикле измерения событиям, считываются в магистраль крейта по команде $F(0)A(0)$. При этом считывается только значащая информация, т.е. только коды, соответствующие зарегистрированным за время измерения событиям. В устройстве предусмотрены два режима чтения.

В первом случае после сброса сигнала «пустая память», вырабатываемого в буфере типа *FIFO*, в дешифраторе устанавливается сигнал «*Q*». Коды, соответствующие зафиксированным событиям, последовательно считываются в магистраль крейта. Так как в этом режиме сброс и выдача сигнала «*Q*» осуществляется автоматически, то считывание данных по команде $F(0)A(0)$ и запись в буфере могут производиться непрерывно.

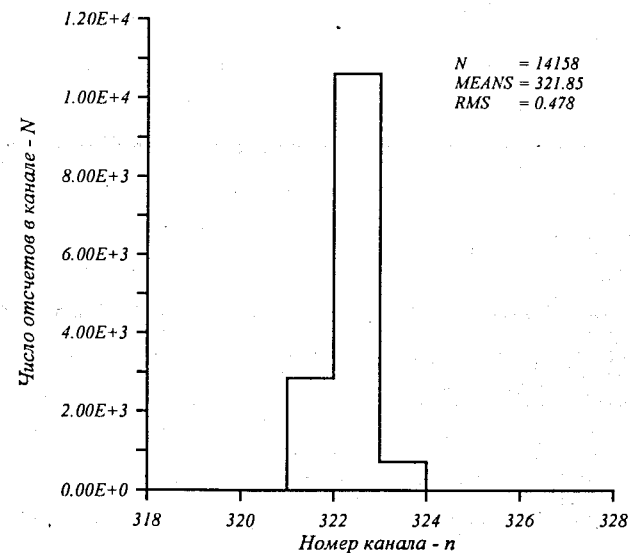
Во втором случае данные считываются в магистраль после выдачи сигнала «*L*». Сигнал «запрос» формируется по окончании очередной записи измерительной информации в буфер типа *FIFO*. В буфере данные являются упакованными в виде массива. Во время считывания окончание массива регистрируется по снятию сигнала «*Q*». После считывания в магистраль крейта результатов преобразования модуль устанавливается в начальное состояние импульсом сброса, вырабатываемым в схеме общего сброса по командам $C*S2$ или $F(9)A(0)$.

На рис.5 приведены градуировочный спектр преобразователя время-код и структура одного из его пиков.

В заключение раздела приведены таблицы, позволяющие сравнить характеристики разработанных модуля *M1102 Multihit TDC* и интегрального преобразователя с параметрами разработок, известными из литературы.



а/.



б/.

Рис.5. Градуировочный спектр (а) и структура одного из его пиков (б). Ширина канала 2 нс

ГЛАВА III. В этой главе предлагаются электронные устройства, которые осуществляют отбор измеряемых интервалов времени с помощью «временного дискриминатора» [8]. Эта функциональная особенность работы предложенных устройств дает возможность применять их при решении задач по быстрой идентификации элементарных частиц по времени пролета. При этом обеспечено минимальное собственное «мертвое» время «временного дискриминатора».

В разделе 3.1 дается краткий обзор устройств и методов, применяемых для отбора «полезных» событий по времени пролета частиц.

Раздел 3.2. Анализ работы преобразователей время–код показывает, что до начала процессов преобразования происходит регистрация входных сигналов. Формируются временные метки, несущие информацию о начале и конце измеряемого временного интервала. Потом по этим сигналам осуществляется процесс преобразования. Если в преобразователе используют дополнительные элементы, при помощи которых формируются временные реперы относительно стартового сигнала и определяется время прихода стопового сигнала относительно заданных реперов, то на базе этой информации можно измерять интервалов времени с заданной длительностью — отбор полезных событий по времени пролета частиц.

Этот подход (применение «временного дискриминатора») был использован для создания данного преобразователя время–код, измеряющего интервалы времени с точностью 100 пс в диапазоне 0–100 нс. Разрядность выходного кода — 10. Время отбора составляет 50 нс.

На рис.6 представлена его блок–схема. В состав устройства входят следующие функциональные узлы: входные буферы, преобразователь время–амплитуда, аналого–цифровой преобразователь, блок отбора интервалов времени по длительности, блок общего сброса и дешифратор команды *КАМАК*.

Модуль работает по методу преобразования время–амплитуда–код с автономными каналами преобразования время–амплитуда и амплитуда–код. Запуск осуществляется по сигналу *STROB*. Блок отбора измеряемых интервалов вырабатывает импульс *GATE1*, по которому снимается блокировка со стартового канала. При этом длительность этого импульса задает время «ожидания стартового сигнала».

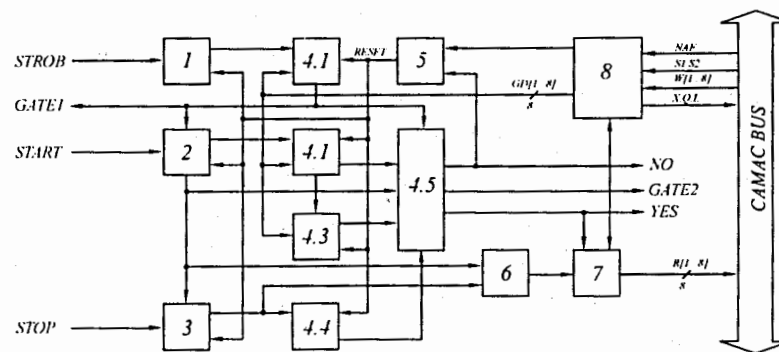


Рис.6. Блок–схема модуля: 1, 2, 3 – входные буферы; 4 – блок отбора интервалов времени по длительности; 5 – блок общего сброса; 6 – преобразователь время–амплитуда; 7 – АЦП; 8 – дешифратор команд *КАМАК*

После прихода стартового сигнала включается генератор линейного напряжения и происходит формирование импульса *GATE2*. Так как фронт и срез этого импульса определяют интервал времени, в котором ожидается стоповый сигнал, то при его помощи осуществляется отбор интервалов времени по длительности. По стоповому сигналу происходит фиксация мгновенного значения линейного напряжения. При этом если стоповый сигнал появился во время действия импульса *GATE2*, то осуществляется запуск *АЦП* и формируется цифровой код, соответствующий длительности измеряемого интервала времени. В противном случае происходит быстрый сброс и установка модуля в начальное состояние.

Дешифратор команд *КАМАК* обеспечивает управление блоком со стороны магистрали крейта и чтение данных преобразования, а также участвует в выработке сигнала «L».

В модуле измеряемый диапазон, время «ожидания стартового сигнала», временные положения фронта и среза импульса *GATE2* задаются программно.

В разделах 3.2.2 и 3.2.3 дано описание функциональных узлов модуля.

Раздел 3.3. Рассмотренный преобразователь время–код имеет собственное «мертвое» время. В случае отрицательного решения модуль является нечувствительным к входным сигналам за время установки преобразователя время–амплитуда в на-

чальное состояние — 1 мкс, что снижает эффективность приема полезных событий. Чтобы устранить этот недостаток модуля, был создан «временной дискриминатор» на базе блока отбора интервалов времени по длительности.

На рис.7 приведены времяпролетные спектры, демонстрирующие работу «временного дискриминатора». Данные спектры были получены в реакции фрагментации тензорно-поляризованных дейтронов в кумулятивные адроны ($c = p, \pi, d$) с импульсом 2,5 ГэВ/с на бериллиевой мишени. Набор большого числа «полезных» событий получен за счет уменьшения «мертвого» времени системы сбора данных. Можно отчетливо видеть чистоту выделения требуемого временного диапазона, что показывает качество работы «временного дискриминатора» в условиях больших нагрузок.

В заключении раздела приведена таблица, позволяющая сравнить характеристики разработанных модулей с параметрами разработок ЛВЭ ОИЯИ.

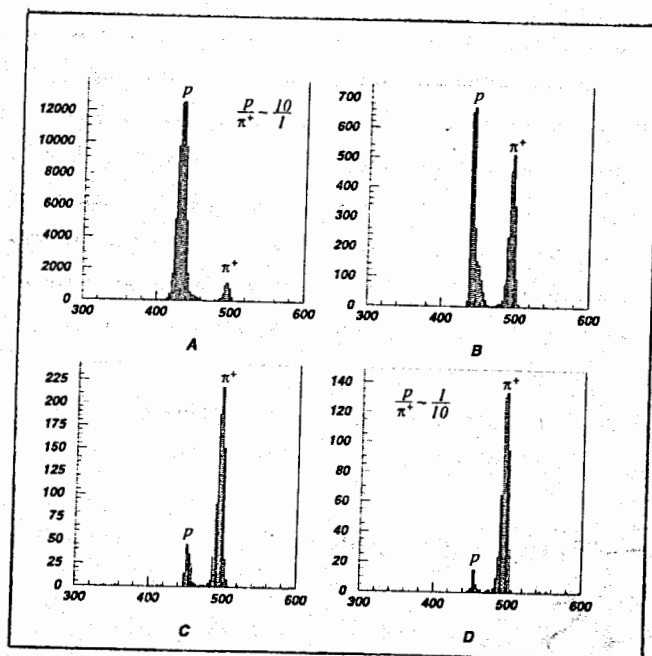


Рис.7. Зарегистрированные спектры, демонстрирующие работу «временного дискриминатора»: а — времяпролетный спектр протонов и пионов; б-д — с последовательным подавлением протонов

ГЛАВА IV. Для эффективной и правильной регистрации сигналов с фотоэлектронного умножителя необходимо обеспечить высокую стабильность напряжений питания катода и динодов ФЭУ. Обычно в схемах питания применяются делители на резисторах или нелинейных элементах (стабилитронов или транзисторов). В первом случае средняя частота повторения выходных импульсов ограничивается величиной среднего тока анода на уровне 30–40 % от тока делителя.

Применение в делителе стабилитронов позволяет поднять нагрузку до величины среднего тока анода ~ 80 % от тока делителя. Недостатками подобной схемы питания является необходимость подбора стабилитронов, а также непропорциональность изменения междинодных потенциалов при регулировке напряжения питания. Кроме этого, если необходимо подпитать несколько счетчиков, приходится либо подбирать ФЭУ с одинаковыми режимами, либо ставить их в неоптимальные режимы работы.

В разделе 4.1 дано краткое описание многоэлементного сцинтилляционного годоскопа. Он состоит из 32 независимых счетчиков, представляющих собой сцинтилляторы длиной 1 м и сечением $2 \times 3,5 \text{ см}^2$. В качестве светоприемника в счетчиках использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-87.

Система питания ФЭУ состоит из индивидуальных источников высоковольтного напряжения, системного модуля (Splitter) и персонального компьютера [9]. В этой системе индивидуальные источники объединены в группы. В группе каждый источник имеет собственный 5-разрядный адрес. Младшие три адреса задаются по линии управления, а старшие при помощи переключателей на плате каждого высоковольтного источника. Адреса и уровень выходного напряжения передаются по линии управления в виде последовательного кода. Доступными они являются во время действия стробового импульса.

Система высоковольтного питания позволяет:

- подбирать напряжение питания для каждого ФЭУ согласно его индивидуальным характеристикам;
- отслеживать рабочие напряжения каждого ФЭУ и изменять их в соответствии с требованиями проводимого эксперимента;

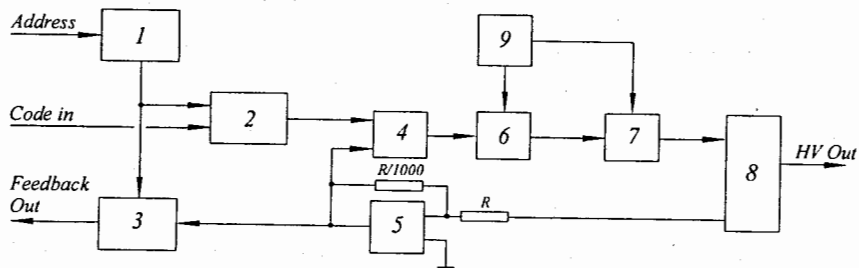


Рис.8. Блок-схема источника высоковольтного напряжения: 1 – декодер; 2 – цифро-аналоговый преобразователь; 3 – аналоговый ключ; 4 – дифференциальный усилитель; 5 – буфер; 6 – модулятор тактовых сигналов; 7 – регулятор напряжений; 8 – умножитель напряжений; 9 – генератор

— сохранить пропорциональность между диодными напряжениями, что не приводит к расфокусировке ФЭУ;

— не использовать дорогостоящие высоковольтные кабели между источниками высокого напряжения и ФЭУ.

Раздел 4.2. В этом разделе дано описание миниатюрного источника высоковольтного напряжения. Блок-схема источника приведена на рис. 8. Реализация схемы питания ФЭУ основана на применении генератора тактового сигнала с управляемым коэффициентом заполнения и умножителем напряжений. При этом высоковольтный источник и делитель совмещены на общей плате — умножитель исполняет роль делителя. Формирование и распределение потенциалов на диодах осуществляются при помощи умножителя напряжений. Он реализован на базе схемы «Greinacher». Особенность данной схемы состоит в том, что она составлена из отдельных ячеек. Ячейки связаны последовательно в схеме умножителя напряжений. Поэтому их число определяет максимальное значение выходного высоковольтного напряжения. Подобный подход обеспечивает постоянное соотношение между диодными напряжениями и их высокой стабильностью.

В табл. 1 показано распределение диодных напряжений при катодном напряжении $U_k = 2400$ В. Так как общее количество ячеек составляет 43, а $U_{emax} = 55.8$ В, то полученное распределение диодных напряжений не отличается существенно от оптимального.

Табл.1. Распределение междиодных напряжений — ФЭУ-87

Порядковый номер диодов	Необходимый шаг аппроксимации	Действительный шаг аппроксимации	Число ячеек	Распределение междиодных напряжений [В] / ($U_k = 2400$ В)
1	6	5.5	11	614
2	1	1	2	112
3	1.4	1.5	3	167
4	1	1	2	112
5	1	1	2	112
6	1	1	2	112
7	1.5	1.5	3	167
8	1	1	2	112
9	1.5	1.5	3	167
10	1	1	2	112
11	2.2	2	4	223
Катод	4	3.5	7	390

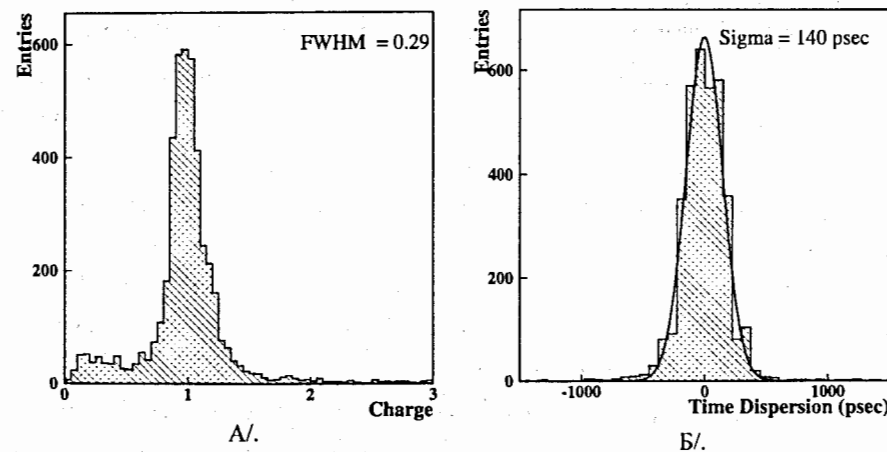


Рис.9. Амплитудный (а) и временной (б) спектры, иллюстрирующие работу сцинтилляционного годоскопа

На рис.9 приведены временной и амплитудный спектры, демонстрирующие работу годоскопа. Спектры были получены в сеансе на ускорителе «НУКЛОТРОН» Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Сцинтилляционный годоскоп применялся при регистрации протонов, образующихся в реакции $-d+C$. При этом были получены:

- временное разрешение $\sigma_t=140$ пс;
- координатное разрешение $\sigma_x=2,2$ см.

В заключение раздела приведена таблица, позволяющая сравнить характеристики разработанного источника высоковольтного напряжения с параметрами созданного в ЛВЭ ОИЯИ (Дубна) высоковольтного источника.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты представленной работы состоят в создании электронной аппаратуры, предназначенной для обеспечения эксперимента СФЕРА. При этом были решены следующие задачи:

1. В настоящее время принципиально новым направлением в методике разработки приборов для физических экспериментов является применение перепрограммируемых логических матриц. При этом задача, связанная с применением перепрограммируемой логики разработать дешевые и гибкие приборы, при помощи которых можно решить специфические задачи любого эксперимента.

На основе подобного подхода и применения интегральных схем фирмы XILINX разработаны:

- многоканальный измеритель временных интервалов *M1102 Multihit TDC*, обладающий высокими измерительными и эксплуатационными характеристиками. Модуль предназначен для съема информации с дрейфового детектора установки СФЕРА;
- 16-канальный преобразователь время-код в виде интегральной схемы. Он предназначен для создания набора измерительных блоков, на базе которых будет создаваться система регистрации для дрейфового детектора установки СФЕРА.

2. С целью увеличения точности преобразования счетно-импульсного метода разработан интерполятор «остаточных» интервалов. Интерполятор работает по многофазному методу. В данном интерполяторе, благодаря процессу «усреднения», минимизируется интервал погрешностей.

Интерполятор ориентирован на применение в комбинированных преобразователях время-код, обеспечивающих точность измерения 1–2 нс.

3. Разработан модуль для отбора полезных событий по времени пролета частиц. В этом модуле осуществлен принцип отбора при помощи «временных дискриминаторов», обеспечивающий быстрый отбор частиц — 50 нс.

4. Разработан миниатюрный источник высоковольтного напряжения для питания фотоэлектронных умножителей. На базе этого программно-управляемого модуля создана система для питания фотоэлектронных умножителей, применяемых в сцинтилляционном годоскопе.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Русанов И.Р., Атанасов И.Х. Многофазный алгоритм для прямого преобразования время-код с высокой разрешающей способностью. Письма в ЭЧАЯ, 2000, № 1[98], с. 64.
2. Русанов И.Р., Атанасов И.Х. Многофазный интерполятор для комбинированных преобразователей время-код. Препринт ОИЯИ P13-2000-63, Дубна, 2000 (направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»).
3. Анисимов Ю.С.,..., Русанов И.Р. и др. Система сбора данных и контроля в экспериментах на установке СФЕРА. В сб.: Труды международного совещания «Релятивистская ядерная физика – от сотен МэВ до ТэВ». Болгария, Созополь, 1996, Том 1, с. 121.
4. Анисимов Ю.С.,..., Русанов И.Р. и др. Система сбора данных установки ДЕЛЬТА. Прогресс в развитии систем сбора данных и медленного контроля для экспериментов в рамках коллаборации СФЕРА. В сб.: Труды международного совещания «Релятивистская ядерная физика – от сотен МэВ до ТэВ». Болгария, Варна, 26–31 мая 1998, с.253.
5. Русанов И.Р., Атанасов И.Х. 32-канальный многостоповый преобразователь время-код для дрейфовых камер. В сб.: Труды международного совещания «Релятиви-

стская ядерная физика – от сотен МэВ до ТэВ». Болгария, Варна, 26–31 мая 1998, с.290.

6. **Русанов И.Р.**, Атанасов И.Х. Многоканальный измеритель временных интервалов для дрейфовых камер. Краткие сообщения ОИЯИ, 1998, № 6[92], с. 55.
7. **Русанов И.Р.**, Атанасов И.Х. Быстродействующая память для многоканальных преобразователей время–код. Письма в ЭЧАЯ, 2000, № 2[99], с. 27.
8. Атанасов И.Х., **Русанов И.Р.** Преобразователь время–код с отбором интервалов времени по длительности. Препринт ОИЯИ Р13–2000–123, Дубна, 2000 (направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»).
9. Атанасов И.Х., **Русанов И.Р.** Источник высоковольтного напряжения для питания фотоэлектронных умножителей. Письма в ЭЧАЯ; 2000, № 3[100], с.62.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 сентября 2000 года.