

Ядерная электроника

Бару Семен Ефимович

**Учебное пособие
Новосибирск, 1995.**

Оглавление.

1. Предисловие. Общая характеристика курса. Метод изложения материала. Литература.
2. Современный ядерно-физический эксперимент. Роль электроники. Элементная база ядерной электроники.
3. Аналоговая электроника. Преобразование и обработка аналоговой информации.
4. Представление, преобразование и обработка цифровой информации.
5. Аналого-цифровое преобразование.
6. Электронные тракты регистрации некоторых распространенных детектирующих устройств.
7. Стандарты в ядерной электронике как структурная база систем сбора данных.
8. ЭВМ в системах сбора данных. Ввод — вывод информации, режимы использования.
9. Системы сбора данных (ССД). Структура ССД. Сбор информации, триггер, on line обработка данных. Типы систем.
10. Заключение. Роль и место ядерной электроники в науке и технике. Круг вопросов, специфика.

1. Предисловие.

Общая характеристика курса. Метод изложения материала. Литература.

В последние годы в физике высоких энергий значительное место занимает метод встречных пучков частиц. Институт ядерной физики СО РАН хорошо известен среди физиков всего мира как один из основоположников этого метода. Первые эксперименты с электрон-электронными пучками были проведены в 1965 г. в ИЯФ и в Стэнфордском университете (США). Сегодня с помощью метода встречных пучков поставляется основная часть фундаментальной информации о физике высоких энергий. Все ведущие центры мира, занятые изучением элементарных частиц, участвуют в экспериментах или в подготовке будущих экспериментов на встречных пучках. Сооружаются накопители, обладающие высокими светимостью и энергиями взаимодействующих частиц. Для экспериментов на этих накопителях создаются детекторы, представляющие собой уникальные, весом в сотни и тысячи тонн, комплексы разнообразных регистрирующих систем, служащих для идентификации и изучения свойств частиц - продуктов взаимодействия пучков. Эти системы обслуживаются тысячами и десятками тысяч измерительных электронных трактов. Разработка и производство такой сложной аппаратуры для физики высоких энергий стали возможными благодаря успехам интегральной схемотехники, решившей задачу создания компактной и дешевой электроники съема и обработки сигналов с детектирующих структур.

Задачей детектора является набор информации о взаимодействии элементарных частиц при их столкновениях. Скорость набора информации зависит как от светимости накопителя, так и от быстродействия регистрирующих систем детектора, т.е. от их способности с незначительными просчетами получать, обрабатывать, фильтровать интенсивные потоки данных и накапливать отобранную информацию в памяти ЭВМ. В детекторах, сооружаемых для экспериментов на встречных пучках частиц в последние годы, можно выделить признаки, позволяющие говорить о новом поколении этих установок. Главные из этих признаков:

- одинаково высокая эффективность регистрации как заряженных, так и нейтральных частиц в большом телесном угле;
- разрешение по энергии на уровне нескольких процентов, а по импульсу - на уровне десятых долей процента;
- возможность работы на накопителях с высокой светимостью;
- возможность работы при больших энергиях накопителей, т.е. в условиях высокой множественности частиц, что приводит к необходимости высокой гранулярности систем регистрации.

Регистрирующие системы детекторов нового поколения содержат, как правило, тысячи и десятки тысяч сложных измерительных аналоговых каналов. Это, прежде всего, разнообразные дрейфовые камеры, используемые практически во всех детекторах для измерения треков частиц; вершинные детекторы; мюонные системы на стримерных трубках; калориметры на основе сжиженных благородных газов и т.п. Примерами детекторов нового поколения могут служить новые установки ИЯФ - СНД, КМД-2, КЕДР.

Требования к электронике детекторов нового поколения значительно возросли. Кроме уникальных метрологических характеристик, которыми, как правило, должны обладать электронные тракты регистрации (точность, уровни шума и т.п.), высокие требования предъявляются и к другим, интегральным, параметрам систем сбора данных. Желание уменьшить просчеты регистрации при высокой светимости современных накопителей заставляет искать пути уменьшения мертвого времени аналого-цифрового преобразования и систем вывода информации, повышения быстродействия и эффективности домашних систем отбора полезных событий. Резко увеличилось объемы информации о событии, что вызывает необходимость параллельной обработки, сжатия и оптимальной упаковки данных перед их записью в ЭВМ. Стремление максимально использовать интеллектуальный машинный триггер с его резко выросшими современными возможностями заставляет, тем не менее, вводить в ЭВМ большие объемы информации о событии ($\sim 10^3$ слов/соб.) с высокой интенсивностью ($\sim 10^2$ соб./с), что приводит к необходимости разравнивания этого потока перед вводом в ЭВМ. Электроника регистрации современных детекторов, при ее сложности и объеме (десятки, а иногда и сотни крейтов), должна работать многие годы,

в основном круглосуточно, и обладать высокой надежностью, стабильностью параметров (минимум калибровок!), удобством в эксплуатации и возможностью адаптации к изменяющимся условиям эксперимента. Наконец электроника должна быть простой в изготовлении и минимально трудоемкой, поскольку в основном должна производиться в условиях экспериментального производства.

Информация с детекторов поступает в виде импульсных сигналов, амплитудно-временные параметры которых надо измерить. Измерительные каналы электроники, как правило, состоят из схем, расположенных вблизи регистрирующих систем детекторов (усилители, усилители-формирователи, экспандеры и т.п.), линий связи и устройств преобразования аналоговой информации в цифровой вид. Эти устройства вместе с аппаратурой обработки цифровой информации, отбора и регистрации полезных событий обычно размещаются в пультовой. Функционально вся эта электроника представляет собой так называемую систему сбора данных (ССД). Описанию элементов ССД и всей системы в целом и посвящен данный годовой курс. В нем излагаются требования к элементам ССД, современные методы их реализации, приводятся примеры, иллюстрирующие оптимальные решения конкретных задач. Курс построен следующим образом. Изложение материала отражает последовательное движение и обработку информации в эксперименте: детекторы - прикамерная электроника - аналого-цифровое преобразование - система сбора данных - компьютер. Поскольку ядерная электроника в последнее время развивается весьма интенсивно, автор посчитал целесообразным изложить данное пособие в виде весьма кратких тезисов, ориентирующих студентов в самостоятельной работе. Краткость изложения позволит впоследствии легко и часто "осовременивать", по мере необходимости, отдельные пункты. Своеобразным свидетельством интенсивного развития ядерной электроники является отсутствие учебников, охватывающих весь круг относящихся к этой области вопросов. Поэтому, безусловно, основной материал для овладения курсом студент должен получить на лекции. (Автор участвовал в создании ССД практически всех детекторов, сооруженных в ИЯФ, и примерно треть лекционного времени отводит на реальные примеры решений, иллюстрирующих излагаемый пункт курса). Дополнительный материал можно найти в трудах соответствующих совещаний и конференций (пример - Венская Wire Chamber Conference, проходящая один раз в 2-3 года), в соответствующих журналах (пример - Nuclear Instruments and Methods), в ежегодных справочниках ведущих западных фирм, занимающихся разработкой и выпуском ядерно-физической аппаратуры (пример - Le Croy).

Значительное место в курсе занимает применение методов и техники ядерно-физических экспериментов в прикладных областях науки и техники, связанных с регистрацией излучений - в медицине, дифракционных структурных исследованиях и т.п. Этот материал используется в основном как иллюстративный.

Следует отметить, что приоритет в распределении места, которое занимает тот или иной вопрос курса, отдан наиболее современным, специфическим или мало освещенным в литературе вопросам (примеры - электроника пропорциональных, дрейфовых, микростриповых газовых детекторов, триггер систем сбора данных и т.п.). Соответственно, сильно сокращены или совсем исключены из курса неспецифические для ядерной электроники вопросы, излагаемые в других курсах, или хорошо освещенные в литературе (примеры - шумы, спектрометрия, электронные тракты регистрации традиционных детекторов - сцинтилляционных счетчиков, черенковских счетчиков и т.п.).

2. Современный ядерно-физический эксперимент. Роль электроники.

Элементная база ядерной электроники.

1. Предмет ядерной электроники. Современный ядерно-физический эксперимент. Основные источники излучений - встречные пучки частиц, мишени, синхротронное излучение, космические лучи, изотопы, рентгеновские трубки, лазеры и т.п. Основные типы детекторов излучений - сцинтилляционные счетчики, черенковские счетчики, ионизационные камеры, искровые камеры, пропорциональные и дрейфовые структуры, микростриповые газовые камеры, полупроводниковые счетчики, структуры типа imaging plate и т.п. Место и роль электроники в эксперименте. Путь информации: детекторы излучений - аналоговая электроника-преобразование в цифру - цифровая электроника - системы сбора данных -ЭВМ (рис. 1).

Система сбора данных - электронная среда, состоящая из аппаратной (hardware) и программной (software) частей, которая предназначена для сбора и обработки данных, получаемых в ходе эксперимента. Триггер - часть системы сбора данных, предназначенная для быстрого выделения "полезных" событий и отбрасывания "фоновых".

2. Элементная база ядерной электроники. Интегральные схемы и микросборки - основа элементной базы. Микромодульная, толстопленочная, тонкопленочная, интегральная, гибридная технологии. Деление электроники детекторов на камерную (front-end) электронику и электронику аналого-цифрового преобразования и регистрации. Требования к камерной электронике диктуемые условиями работы вблизи и внутри регистрирующих структур: компактность, надежность, малое выделение тепла, немагнитное исполнение, радиационная стойкость. Возрастающая роль заказных микросборок, удовлетворяющих перечисленным требованиям. Технологии, которые позволяют в сжатые сроки получать из "полуфабрикатов" изделия, реализующие требуемую электрическую схему (ПЛМ, Quick chip technology).

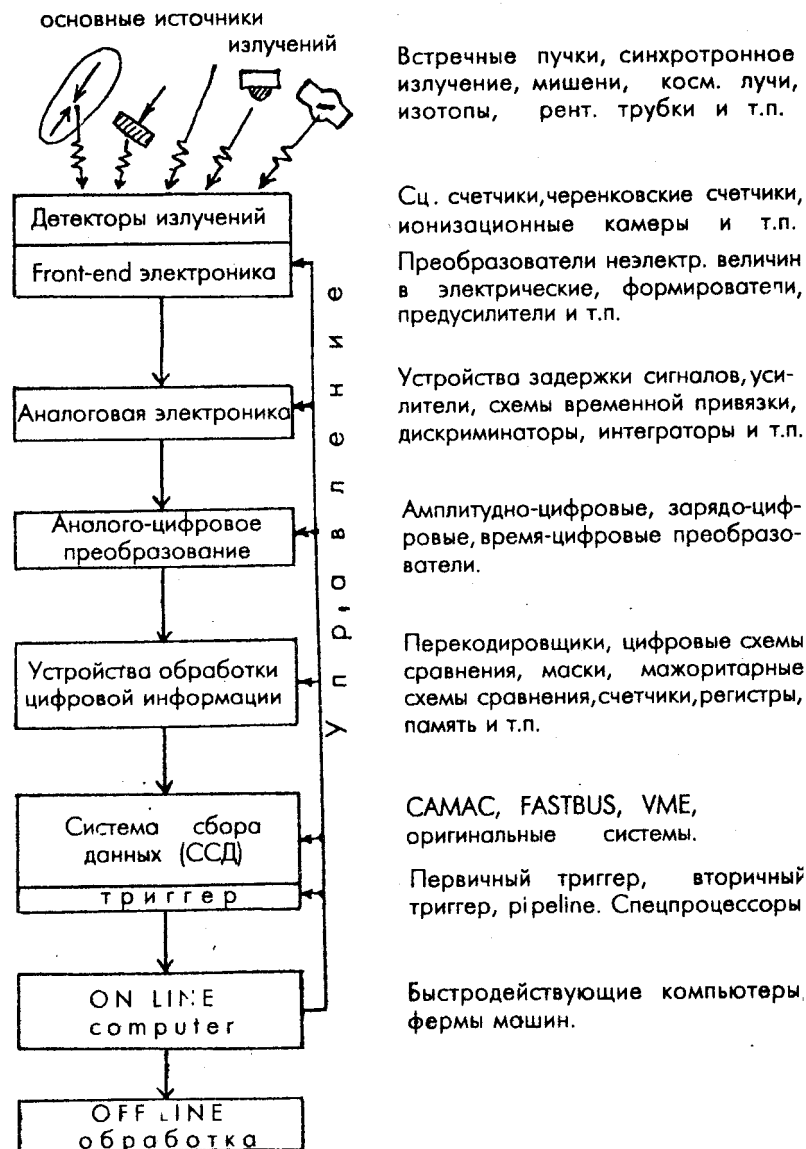


Рис. 1. Схема получения и обработки данных в ядерно-физическом эксперименте

3. Аналоговая электроника. Преобразование и обработка аналоговой информации.

1. Электрический импульс. Радиоимпульсы и видеоимпульсы. Видео-импульсы – основной способ передачи информации в ядерной электронике. Параметры видеоимпульсов - амплитуда, длительность переднего и заднего фронтов, вершины, хвоста. Длительность импульса. Периодическая и аperiodическая последовательности. Параметры периодической последовательности - частота, скважность, период следования импульсов. Примеры: импульсы "Фаза" для первичного триггера детектора КЕДР - периодическая последовательность, импульсы с анода пропорциональной камеры в цифровой рентгенографической установке - аperiodическая последовательность.

2. Передача аналоговых сигналов. Искажения сигналов при передаче. Согласованные линии связи. Однородные проводники - коаксиальные кабели, витые пары, полосковые линии. Достоинства и недостатки этих линий, сравнительные характеристики. Эквивалентная схема единицы длины коаксиального кабеля (рис.2). Ослабление β и фазовый сдвиг α . Продольное и поперечное затухание. Задержка на единицу длины, волновое сопротивление. Практические величины этих параметров. Пример: связь аналоговой электроники детекторов с электроникой аналого-цифрового преобразования в пультовой регистрации.

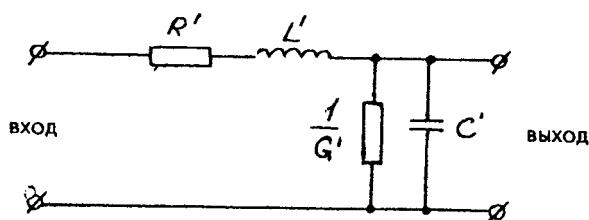


Рис. 2. Эквивалентная схема единицы длины коаксиального кабеля

3. Задержка аналоговых сигналов. Существующие способы задержки и характерные величины задержек. Линии задержки с распределенными параметрами - коаксиальный кабель, специальные кабели задержки. Решение проблемы переменной задержки. Тромбонная линия задержки, использование последовательного соединения кусков кабеля. Линии задержки с сосредоточенными параметрами (рис. 3). Структура, характеристики: задержка, число секций, волновое сопротивление; искажение сигнала при задержке. Частота среза. Ультразвуковые и магнитоотрицательные линии задержки.

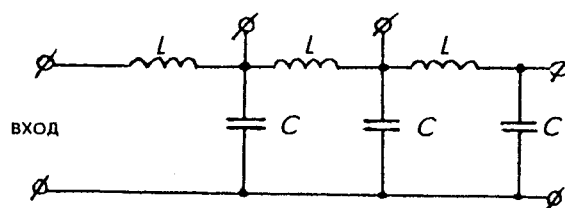


Рис. 3. Схема линии задержки с сосредоточенными параметрами

Произвольная задержка сигнала с помощью запоминания его формы. Выбор типа задержки в зависимости от технических требований и других условий (стоимость, компактность). Задержка сигналов в системах сбора данных. Пример: временная подгонка сигналов к импульсу триггера.

4. Коммутация аналоговых сигналов. Основные типы коммутаторов - механические, на биполярных и униполярных (полевых) транзисторах. Требования к коммутаторам и их параметры: сопротивление в

состояниях "включено" и "выключено", быстродействие, число срабатываний, связь цепей сигнала и управления и т.п. Герконы (рис. 4).

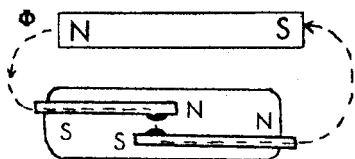


Рис. 4. Геркон

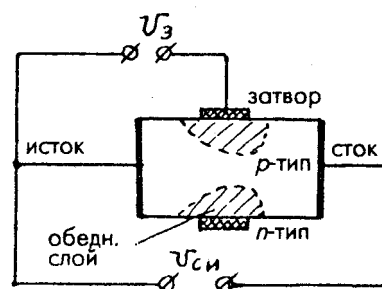


Рис. 5. Ключ на полевом транзисторе с р-п переходом

Коммутация с использованием инверсного включения транзисторов. Полевые приборы, принцип действия. Ключи на полевых транзисторах с р-п переходами (рис. 5). Полевые приборы МОП (со встроенным каналом, с индуцированным каналом). Применение разных типов аналоговых ключей в зависимости от технических требований и других условий. Место аналоговых коммутаторов в системах сбора данных (системы калибровок, тестирования и т.п.). Использование аналоговых ключей в УВХ (устройствах выборки и хранения).

5. Усилители. Основные типы усилителей: усилители постоянного тока, усилители переменного напряжения и тока, операционные усилители, дифференциальные усилители, повторители напряжения. Зарядо-чувствительные усилители. Параметры, характеризующие усилители. Примеры применения усилителей; съем сигналов в рентгеновском детекторе с линией задержки, тракт регистрации жидкокриптонового калориметра детектора КЕДР.

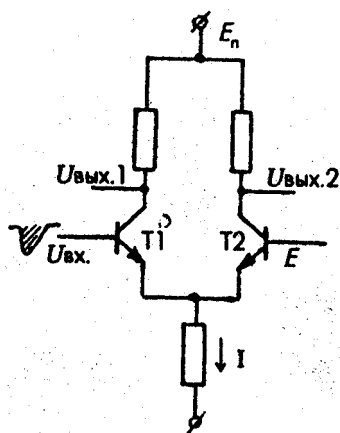


Рис. 6. Дифференциальная транзисторная пара.

6. Усилители-формирователи (УФ). Назначение. Компоненты УФ: усилитель и интегральный дискриминатор (или триггер Шмитта). Требования, предъявляемые к усилителям-формирователям. Параметры УФ: входное сопротивление, минимальный рабочий порог, уровень шума, быстродействие, изменение задержки при изменении величины входного сигнала, потребляемая мощность и т.п. Примеры применения УФ: в трактах регистрации дрейфовых камер, в двумерных детекторах рентгеновского излучения с цифровым съемом информации.

7. Амплитудные дискриминаторы (АД). Интегральные и дифференциальные АД. Линейные дискриминаторы, пороговые усилители. Характеристики дискриминаторов: чувствительность, стабильность и неопределенность порогов, динамический диапазон, интегральная нелинейность. Зависимость порога от длительности входных импульсов. Основной элемент АД - дифференциальная транзисторная пара (рис. 6). Функциональная схема дифференциального АД. Учет запаздывания срабатывания ДВУ по отношению к ДНУ (рис. 7). Место АД в системах сбора данных. Управление порогами. Контроль порогов.

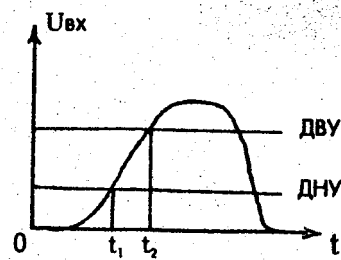


Рис. 7. Запаздывание сигнала ДВУ в дифференциальном дискриминаторе.

8. Устройства временной привязки (УВП). Основные способы построения УВП: привязка по фронту, способ пересечения нуля и метод следящего порога. Функциональные схемы этих способов, достоинства и недостатки, погрешности привязки. Вывод формулы для времени срабатывания УВП со следящим порогом (рис.8): $t = t_3 + \beta t_\phi$. Независимость времени срабатывания таких УВП от амплитуды входного сигнала при постоянстве его формы (t_ϕ). Целесообразность применения УВП разных типов в зависимости от конкретных условий (динамический диапазон сигналов, число каналов, требуемое временное разрешение и т.п.). Пример: применение УВП во времяпрелетной системе.

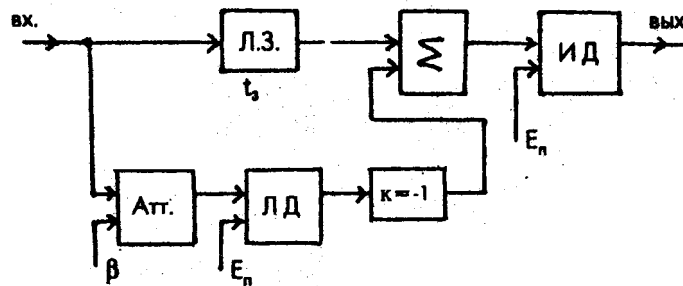


Рис. 8. Функциональная схема УВП со следящим порогом. ЛЗ - линия задержки, ЛД -линейный дискриминатор, ИД - интегральный дискриминатор

9. Схемы совпадений и антисовпадений. Параметры схем совпадений: максимальная частота следования импульсов, минимальная длительность входных импульсов задержка распространения сигнала и др. Основные компонента схем совпадений элемент «И» и формирователь стандартного выходного сигнала. Разрешающее время схем совпадений t_0 , вывод формулы $t_0 = t_1 + t_2 - 2t_{\text{форм.мин}}$. Функциональные схемы схем совпадений и антисовпадений. Место схем совпадений и антисовпадений в системах сбора данных. Пример: генерация импульса первичного триггера в больших детекторах; применение в хронотронах.

4. Представление, преобразование и обработка цифровой информации.

1. Представление цифровой информации. Цифровые коды - позиционный, десятичный, двоичный, восьмеричный, двоично-десятичный. Применение кодов на разных этапах получения, обработки и представления информации в системах сбора данных. Примеры: первичная информация о срабатывании проволочек в искровой камере - позиционный код, записанный в ферритовых сердечниках; использование двоичного кода при записи этой информации в память.

2. Основные серии цифровых ИС (ДТЛ, ТТЛ, ЭСЛ, МОП) и их сравнительные характеристики: быстродействие, нагрузочная способность; коэффициент объединения по входу, помехоустойчивость,

потребляемая мощность. Уровни электрических сигналов: NIM, TTL, ECL. Базовые элементы: И, ИЛИ. Применение в схеме серий ИС с разным быстродействием с целью уменьшения потребляемой мощности.

3. Простейшая цифровая схемотехника - RS-триггер, D-триггер (защелка), элемент задержки, формирователи импульсов в момент фронта, генераторы, одновибраторы (рис. 9, 10). Примеры схемного использования этих узлов: RS-триггера и D-триггера - для запоминания информации, одновибратора - в качестве выходного формирователя в дискриминаторах и схемах совпадений и т.п.

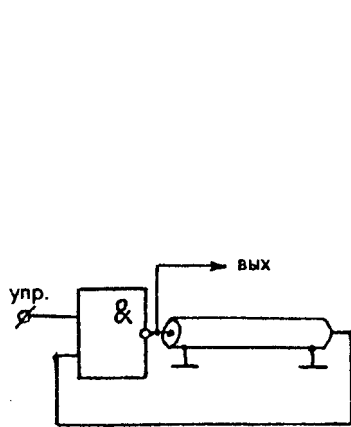


Рис. 9. Простейший управляемый генератор меандра

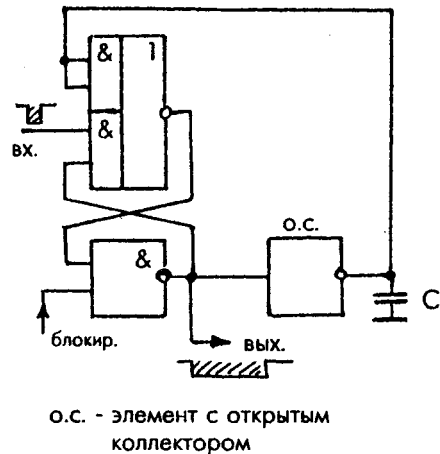


Рис. 10. Одновибратор с малым временем восстановления

4. Простейшие преобразователи кодов: шифраторы (позиционный код - двоичный код) и дешифраторы (двоичный код - позиционный код). Приоритетные шифраторы, ступенчатые дешифраторы. Схема сравнения двух двоичных чисел, определение их равенства. Цифровая маска. Схемы, применение в системах сбора данных. Примеры: применение приоритетного шифратора в FADC, цифровой маски в системе триггера.

5. JK-триггер, D-триггер. Обозначение на схемах. Назначение входов C, D, R, S, J, K, выходов Q и \bar{Q} . Таблица истинности JK-триггера, использование D-триггера в счетном режиме. Простейшие счетчики - двоичный асинхронный (на сложение и на вычитание), двоичный синхронный (на сложение и на вычитание), двоичный синхронный реверсивный. Сравнение быстродействия асинхронного и синхронного счетчиков (по счету и выводу информации). Время установления асинхронных счетчиков. Понятие о триггерном шуме (на выходе подключенного к счетчику дешифратора). Влияние и учет мертвого времени счетчика на подсчет статистически распределенных во времени импульсов. Счетчики с произвольным коэффициентом пересчета (рис. 11), Двоично-десятичная декада. Классификация пересчетных устройств.

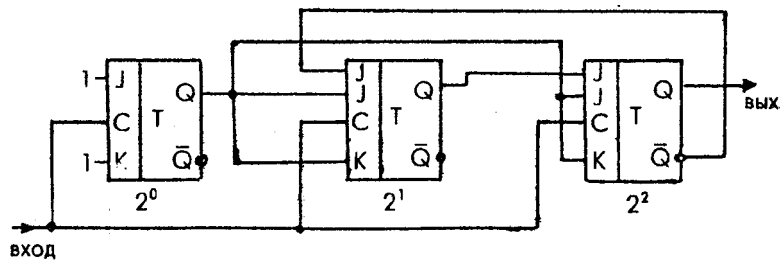


Рис. 11. Счетчик импульсов с коэффициентом пересчета K=6

Применение двоичных счетчиков в системах сбора данных. Пример применения: в однокоординатном измерении распределения интенсивности рентгеновского излучения с помощью линейки из полупроводниковых детекторов.

6. Регистры. Назначение регистров. Запоминающие регистры на RS-триггерах и ячейках "защелка". Запись, чтение и сброс информации в запоминающих регистрах. Сдвиговые регистры. Регистры на D- и JK-триггерах. Простые и реверсивные регистры. Ввод и вывод информации в сдвиговых регистрах. Функции сдвиговых регистров - сдвиг двоичных чисел, преобразование кодов (из последовательного в параллельный и наоборот), передача информации. Классификация регистров: по целевому назначению (запоминающие, сдвиговые), по направлению сдвига (простые, реверсивные), по способу ввода - вывода информации (последовательные, параллельно-последовательные, последовательно-параллельные). Примеры применения сдвиговых регистров: а) для записи многочастичных событий в ячейке дрейфовой камеры (последовательный регистр на тысячу ячеек); б) в трекайндерах (сдвиг данных к трафаретам треков).

7. Сумматоры. Сумматор единичных импульсов. Правило сложения двоичных чисел. Комбинационная таблица для сложения двух равновесных разрядов, вывод формул для суммы и переноса, построение по этим выражениям одноразрядного комбинационного сумматора (функциональная схема). Быстродействие такого сумматора, связанное с установлением выходных сигналов суммы и переноса (рис. 12). Быстродействие многоразрядного комбинационного сумматора. Ускорение переноса. Сумматоры со сквозным переносом (вывод формулы для единицы переноса), сумматоры с групповым переносом (рис. 13).

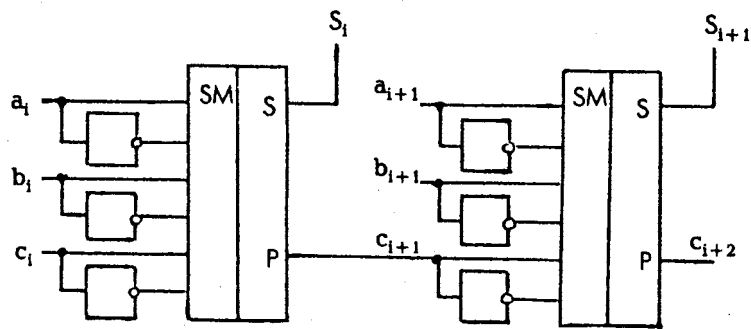


Рис. 12. Элемент комбинационного сумматора без ускорения переноса

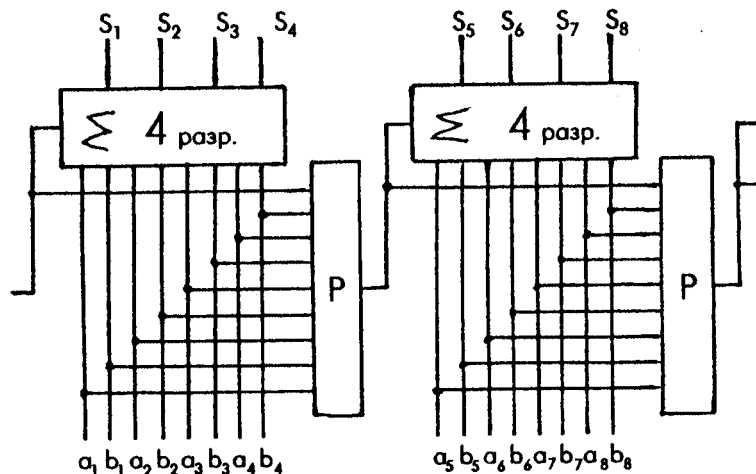


Рис. 13. Сумматор на 8 разрядов с групповым переносом

Сумматор накапливающего типа. Правило вычитания двоичных чисел. Комбинационная таблица для вычитания разряда вычитаемого из равновесного разряда уменьшаемого. Вывод формул для разности и заема, построение по этим выражениям одноразрядного комбинационного вычитателя. Многоразрядный

комбинационный вычитатель. Вычитание большего числа из меньшего. Дополнительный код на выходе вычитателя, признак дополнительного кода, преобразование в прямой код. Применение сумматоров в системах сбора данных. Примеры применения: а) в быстродействующих цифровых мажоритарных схемах совпадений; б) в спецпроцессоре системы сбора данных “КЛЮКВА” при решении задачи определения полного энерговыделения.

8. Множительные устройства. Правило перемножения двух двоичных чисел. Умножение с помощью одного сумматора (путем образования частичных произведений и последовательного их суммирования). Положение запятой в произведении при перемножении нецелых чисел. Ускоренное умножение путем увеличения числа сумматоров. Выигрыш в быстродействии (формула). Деление двоичных чисел. Правило деления методом с восстановлением остатка. Ускорение операции деления (табулирование, функция $1/x$). Примеры применения множителей и делителей в системах сбора данных: спецпроцессоры, блоки в АП-32, учет поправочных коэффициентов при передаче данных, вычисление координаты в МПК при съеме информации методом деления заряда.

9. Мажоритарные схемы совпадений. Назначение. Методы построения: аналоговый, комбинаторный, на базе комбинационных сумматоров (рис. 14). Достоинства и недостатки этих методов, рекомендуемые области применения. Примеры использования мажоритарной логики: а) в системах триггера детекторов; б) для контроля за достоверностью результата на выходе шифратора при кодировке номера сработавшего элемента (проволочки, счетчика).

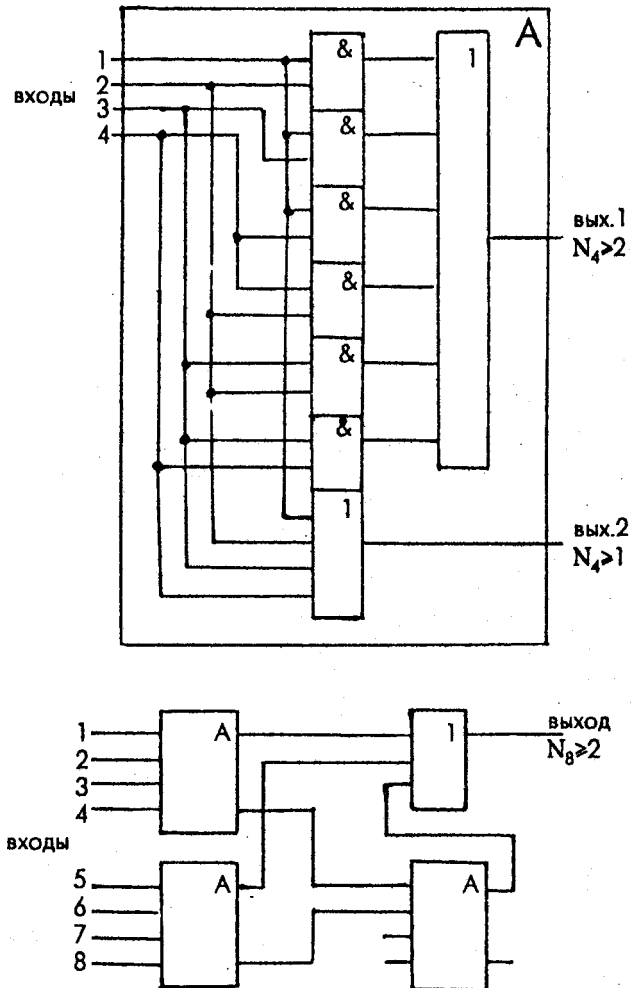


Рис. 14. Мажоритарная схема совпадений комбинаторного типа ($N_8 \geq 2$)

10. Передача цифровой информации. Параллельный и последовательный способы передачи. Передающие и приемные устройства. Типы помех при передаче, методы борьбы с помехами. Оптические линии связи. Контроль правильности передачи. Достоинства и недостатки параллельного и последовательного методов передачи (быстродействие, помехоустойчивость, схемно-кабельные затраты) Применение обоих способов в системах сбора данных. Примеры: а) связь крейт-контроллера САМАС К0606 с ЭВМ; б) быстрый ввод данных в ЭВМ по каналу прямого доступа в память или инкрементному каналу.

11. Коммутация потоков цифровой информации. Решение задачи при последовательном и параллельном способах передачи. Универсальная двунаправленная магистраль (n источников, k приемников). Частные случаи: n=1 (коммутатор), k=1 (мультиплексор). Примеры коммутации потоков цифровых данных в системах сбора и обработки информации: а) магистраль FASTBUS (универсальная магистраль); б) магистраль САМАС, шины W (коммутатор) в) магистраль САМАС, шины R (мультиплексор).

5. Аналого-цифровое преобразование.

1. Роль и место аналого-цифрового преобразования в системах сбора данных. Квантование непрерывной величины. Общая схема аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Преобразования формы информации в АЦП. Классификация АЦП: по принципу действия, по алгоритму функционирования, по виду входного сигнала, по техническим характеристикам. Характеристики АЦП: диапазон измеряемых величин, погрешность измерения (абсолютная, относительная, приведенная, основная и дополнительная), быстродействие (время преобразования, частота преобразования, время обмена, тактовая частота), входное сопротивление, помехозащищенность.

2. АЦП прямого преобразования (FADC). Принцип действия. Функциональная схема. Компоненты схемы и их назначение: источник опорного напряжения, резистивный делитель, компараторы, приоритетный шифратор, выходной регистр. Достоинства и недостатки АЦП прямого преобразования. Характеристики современных АЦП этого типа, применение. Пример: ТРС детектора АЛЕРН.

3. АЦП уравнивания. Функциональная схема. Компоненты схемы и их назначение: цифровой автомат, генератор тактовых импульсов, цифро-аналоговый преобразователь, нуль-орган (рис. 15). Алгоритмы развешивающего, следящего и поразрядного уравнивания. Достоинства и недостатки АЦП уравнивания. Характеристики современных АЦП этого типа, области применения.

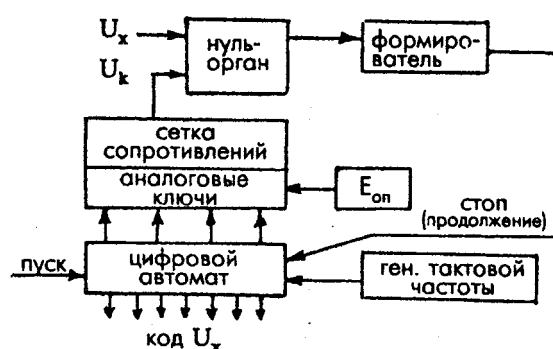


Рис. 15. АЦП уравнивания

4. АЦП время-импульсного типа. Функциональная схема. Компоненты схемы и их назначение: генератор пилообразного напряжения, генератор тактовых импульсов, нуль-орган, счетчик импульсов. Необходимость применения двух нуль-органов. Временная диаграмма работы (рис. 16). Достоинства и недостатки АЦП время-импульсного типа. Характеристики современных АЦП этого типа. Области применения.

5. АЦП интегрирующего типа. Функциональная схема. Компоненты схемы и их назначение; источник опорного напряжения, входной переключатель, интегратор, нуль-орган, генератор опорной частоты, ключ, счетчик импульсов. Временная диаграмма работы. Вывод формулы $N_x = U_x N_{\max} / E_{op}$. Достоинства и недостатки интегрирующих АЦП. Характеристики современных АЦП этого типа, применение.

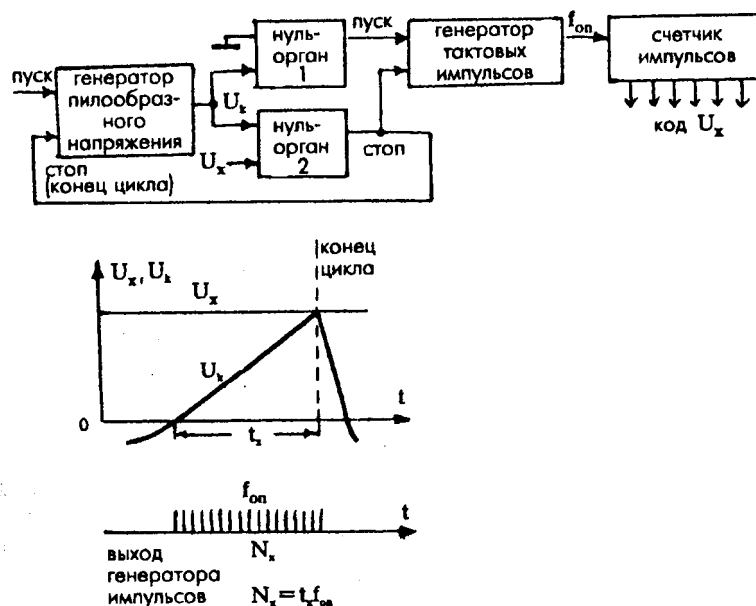


Рис. 16. АЦП время-импульсного

6. АЦП частотных сигналов (измерение частоты, периода, фазы, отношения частот). Функциональные схемы таких АЦП. Компоненты схем и их использование в каждом случае: счетчик импульсов, генератор опорной частоты, клапан, делитель частоты (счетчик периодов), формирователь временных интервалов. Вывод формул. Применение: частотомер, периодомер, фазометр.

7. Использование АЦП в системах сбора данных. Области применения АЦП разных типов, быстродействия, классов точности. Повышение эффективности использования АЦП (коммутаторы между источниками сигналов и АЦП). Полярные применения АЦП: ТРС детектора АЛЕРН (один канал - один АЦП) и система проверки источников низковольтного и высоковольтного питания детектора МД-1 (один АЦП на все каналы). Промежуточный вариант - система проверки источников питания детектора КЕДР ("компьютерный предохранитель"): один АЦП на стойку КЛЮКВА.

8. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Назначение. Компоненты ЦАП: входной регистр, аналоговые ключи, сетка резисторов, источник опорного напряжения. Схема ЦАП типа R-2R, формула выходного напряжения, достоинства ЦАП этого типа. Параметры современных ЦАП. Применение прецизионных ЦАП в системах сбора данных и устройствах управления ускорительно накопительными комплексами.

9. Измерение временных интервалов. Диапазоны и точности измерения времени, характерные для систем сбора данных в ядерно-физических экспериментах. Примеры: время-пролётные системы, дрейфовые камеры, пропорциональные камеры с измерением координаты вдоль анодной проволоочки с использованием линии задержки.

10. Измерение временных интервалов методом прямого счета. Принцип, функциональная схема. Компоненты схемы и их назначение. Генераторы стабильной частоты. Кварцевые генераторы, их достоинства и недостатки. Схемы умножения частоты. Генераторы на базе линий задержки, их особенности. Методы повышения стабильности генераторов с использованием линий задержки. Управляемые ("ждущие") генераторы. Погрешности измерения временных интервалов при использовании непрерывно работающих и "ждущих" генераторов. Пересчетные схемы, используемые в методе прямого счета. Метод повышения разрешения с использованием двух первых триггеров (рис. 17). Предельное временное разрешение метода, достижимое на современных компонентах. Применение: дрейфовые структуры с использованием "горячих" и "холодных" газов.

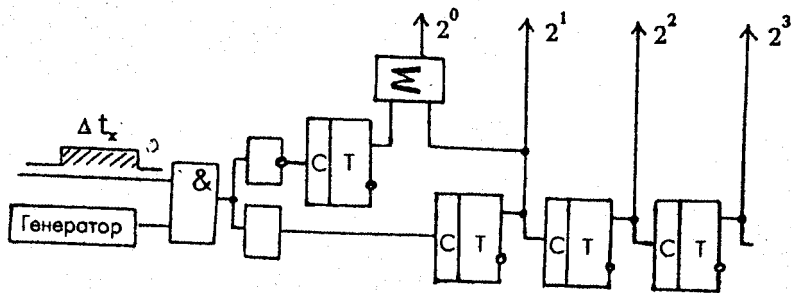


Рис. 17. Измерение времени методом прямого счета с использованием двух первых триггеров

11. Хроногрон. Принцип, функциональная схема. Компонента схемы, их назначение: RS-триггер, ждущий генератор, секционированная линия задержки, выходные ключи, триггеры памяти, счетчик периодов, Достоинства и недостатки этого метода измерения временных интервалов. Характерное временное разрешение. Применение в системах сбора данных. Пример: измерение координаты в линейном детекторе рентгеновского излучения на базе МПК с линией задержки.

12. Верньерный (нониусный) метод измерения временных интервалов. Принцип, функциональная схема. Компоненты схемы, их назначение: генераторы близких частот f_1 (старт-серия) и f_2 (стоп-серия), схема совпадений, счетчик периодов стоп-серий (рис. 18).

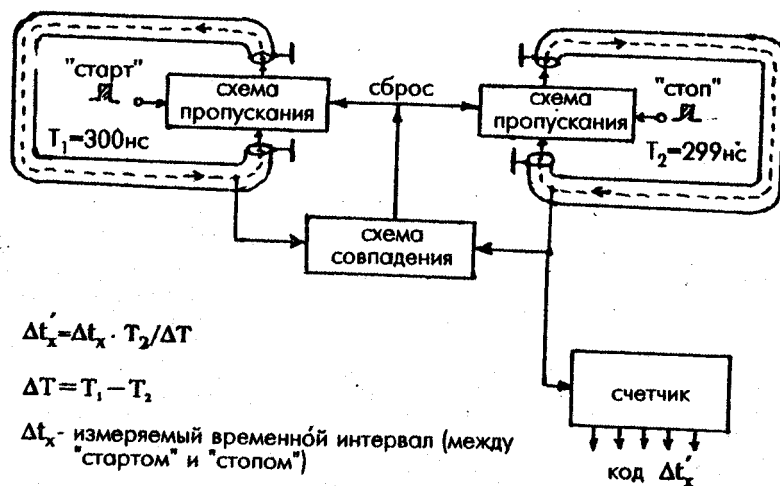


Рис. 18. Верньерный (нониусный) метод измерения времени

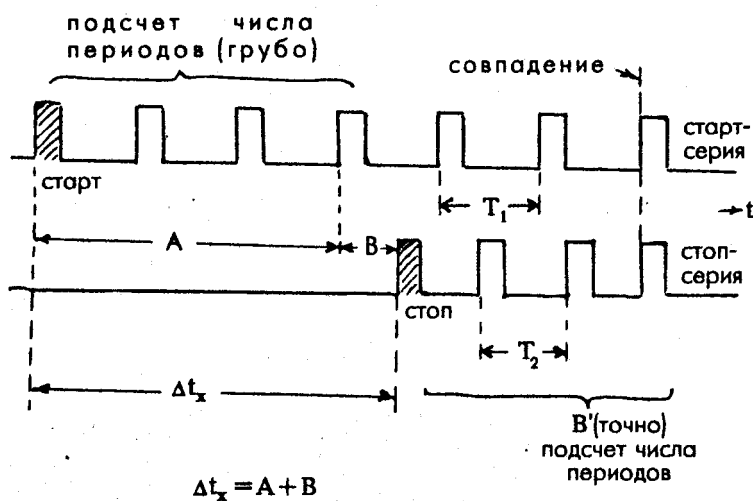


Рис. 19. Широкодиапазонный нолиусный измеритель времени

Достоинства и недостатки метода. Характерное временное разрешение. Расширение диапазона измерений путем предварительного подсчета периодов стартовой серии. Применение: использование в широкодиапазонном временном измерителе (рис. 19).

13. Преобразователи время-амплитуда (ВАП). Диапазон измеряемых величин. ВАП типа перекрытия, старт-стопного типа. Принцип, функциональные схемы. Компоненты схем, их назначение: для 1-го типа - времязадающие элементы, схема совпадения, интегратор; для 2-го типа - генератор постоянного тока, переключатель/накопительный элемент. Зависимость $U_{вых}$ от Δt_x для ВАП обоих типов, их достоинства и недостатки. Применение: время-пролетные системы. ВАП со стробированием. Принцип, функциональная схема. Компоненты схемы: генератор пилообразного напряжения, формирователь, линейный пропускатель. Применение: измерение коротких временных интервалов при триггере с общим стартом.

14. Временной экспандер. Принцип действия, величины измеряемых интервалов, функциональная схема. Компоненты схемы и их назначение: накопительный и зарядно-разрядные элементы, компаратор, генератор тактовой частоты, счетчик. Коэффициент растяжки. Циклограмма работы. Применение: измерение продольной координаты в дрейфовых трубках мюонной системы детектора КЕДР.

15. Широкодиапазонный временной измеритель. Принцип действия, назначение, функциональная схема, циклограмма работы. Компоненты схемы: кварцевый генератор, стартовый и стоповый экспандеры, счетчик периодов (рис. 20). Выражение для измеренного времени. Достоинства и недостатки широкодиапазонных измерителей времени. Области применения в системах сбора данных.

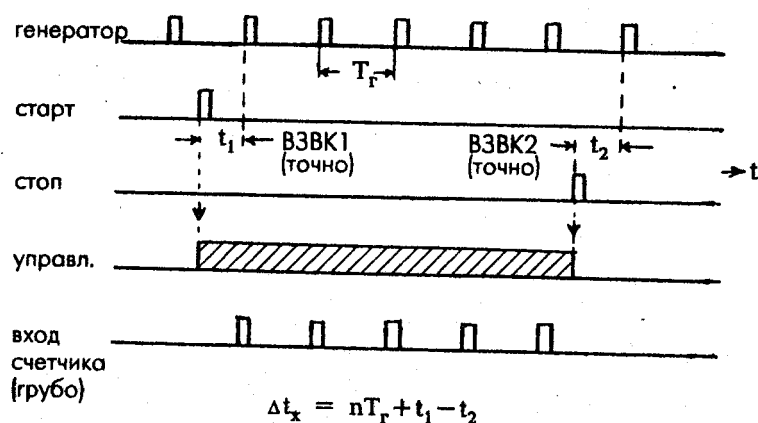


Рис. 20. Широкодиапазонный измеритель времени с использованием двух преобразователей ВЗВК (время-заряд-время-код)

16. Измерение зарядов и амплитуд импульсов. Особенности этих измерений в системах сбора данных, диапазоны измеряемых величин. Интегрирование зарядов. Пиковые детекторы. Метод Вилкинсона, достоинства и недостатки. Устройства выборки и хранения (УВХ). Измерение квазипостоянного напряжения. FADC, компенсационные методы. Применение АЦП и ЦАП в системах сбора данных: электроника, калориметров, методы charge division и center of gravity в координатных рентгеновских детекторах.

17. Измерение формы импульсов, регистрация аperiодических процессов сложной формы. Три основных метода решения задачи - FADC с быстрой памятью, аналоговая память с коммутаторами на входе и выходе, линейки ПЗС. Функциональные схемы. Достоинства и недостатки этих методов, их предельные характеристики (современный уровень) - быстродействие, точность, время вывода информации и т.п. Области применения каждого метода: pipeline, электроника регистрации ТРС камер, другие примеры.

6. Электронные тракты регистрации некоторых распространенных детектирующих устройств.

1. Электронный тракт регистрации ионизационных камер. Механизмы генерации сигнала, уровень сигнала. Динамический диапазон и необходимая точность измерений. Съем энергетической и координатной информации. Целесообразная схема тракта регистрации. Элементы тракта: усилители, аналоговая память (УВХ с аналоговыми ключами на входе и выходе), ЗЦП, память (рис. 21). Задача триггера (запуска) в ионизационной камере. Примеры: схема электроники двухкоординатного детектора для измерения (распределение дозы) проходящего протонного пучка в протонном сканере (терапия рака); электроника жидкокриптонового калориметра в детекторе КЕДР.

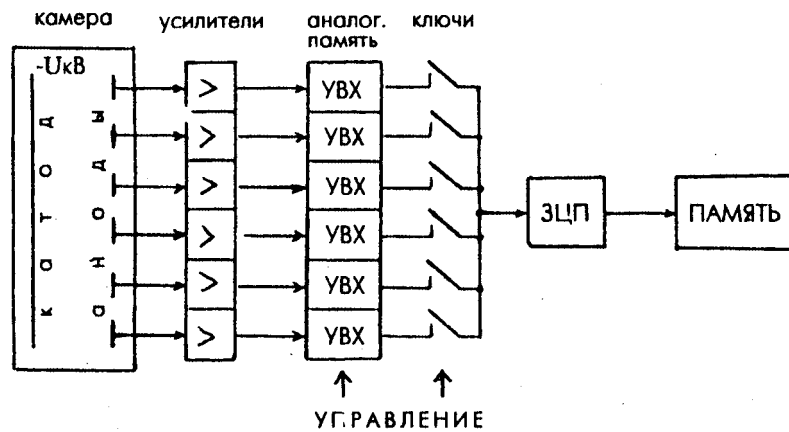


Рис. 21. Электроника ионизационных камер

2. Электронный тракт регистрации проволочных искровых камер (ПИК). Особенности работы ПИК, проблема триггера. Механизм генерации сигнала, уровень сигнала, эффективность (в т.ч. ко многим частицам), быстродействие. Два основных способа вывода информации с ПИК - с помощью магнитоотрицательных линий задержки и с помощью кольцевых ферритовых сердечников. Достоинства и недостатки каждого способа вывода. Применение ПИК в детекторах. Современные искровые камеры на основе полу проводящих стекол (счетчики Пестова). Принцип генерации сигнала, эффект самогашения, временное разрешение. Электронные тракты регистрации: с время-амплитудными преобразователями, с хронотронами. Достоинства и недостатки каждого способа измерения времен. Измерение двух координат: вдоль стрипов (по разнице времен прихода сигналов на концы стрипа) и поперёк стрипов (center of gravity method). Применение искровых счётчиков Пестова в экспериментах (проект время-пролётной системы детектора ALICE(CERN)).

3. Электроника многопроволочных пропорциональных камер (МПК) с цифровым съёмом информации. Механизм генерации сигнала. Распределение зарядов по электродам камеры. Измерение координаты в направлении поперек анодных проволочек. Электроника анодного тракта регистрации, (рис. 22). Требования:

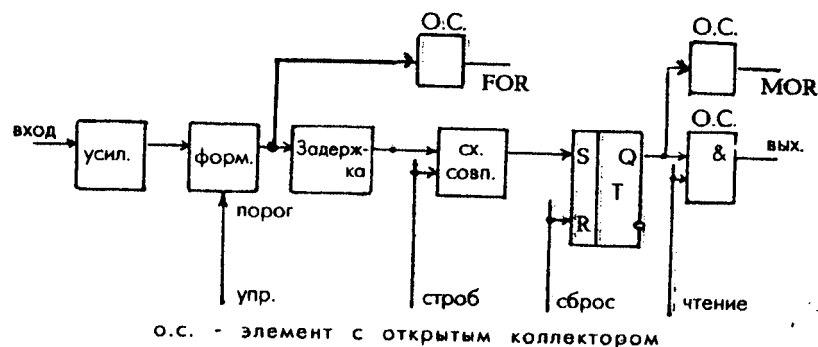


Рис. 22. Электроника тракта регистрации МПК с цифровым съёмом информации

чувствительность, быстродействие и др. Компоненты тракта: усилитель-формирователь, одновибратор задержки, схема совпадения с импульсом триггера, ячейка памяти (RS-триггер), выходной ключ чтения. Защитная цепь на входе. Сигналы FOR (Fast OR) и MOR (Memory OR), их назначение в системе сбора данных. Определение ионизационных потерь (использование аналоговых входов усилителей-формирователей или измерение сигналов с катодных плоскостей). Применение: координатная и ливневопробная системы детектора МД-1.

4. Электроника МПК со съемом информации с помощью линий задержки. Особенности конструкции камеры. Механизм генерации сигнала. Оценка величины сигнала, оптимальная погонная задержка. Компоненты тракта регистрации: дополнительная линия задержки, усилители, дискриминаторы, времяцифровой преобразователь (ВЦП). Применение хронотрона в качестве ВЦП. Метод без использования дополнительной линии задержки. Схемы отбора достоверных событий. Использование анодного сигнала. Критерии отбора событий (по временам t_1 и t_2 прихода сигналов на концы линии задержки). Измерение ионизационных потерь. Возможности метода: точность, быстродействие. Применение: использование в системе регистрации рассеянных электронов в детекторе МД-1, в схеме однокоординатного детектора рентгеновских квантов (рис. 23).

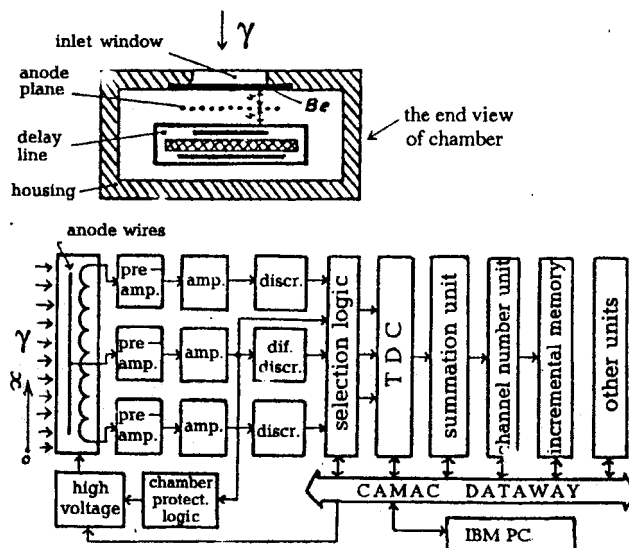


Рис. 23. Схема 1D X-ray детектора на базе МПК с линией задержки

5. Электроника МПК со съемом информации методом нахождения центра тяжести наведенных на катодные стрипы зарядов (center of gravity method). Конструкция камеры. Принцип определения координаты частицы. Структура электроники регистрации. Механизм генерации сигнала. Оценка величин

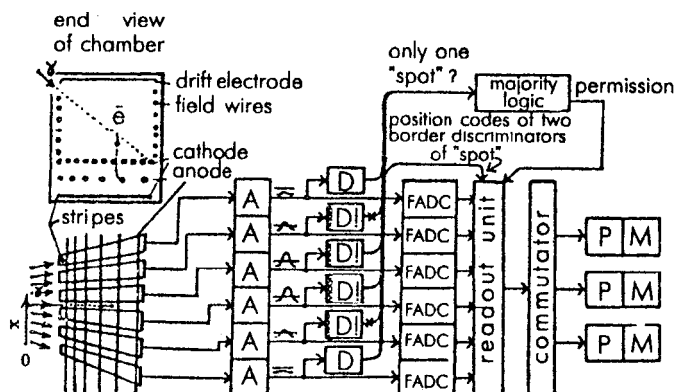


Рис. 24. Схема быстрого 1D X-ray детектора на базе МПК с выводом информации методом center of gravity. A - усилитель, D - дискриминатор, P - процессор, M - память

сигналов на стрипах по мере удаления от лавины. Компоненты электроники: усилители сигналов, снимаемых со стрипов, аналого-цифровые преобразователи, магистраль, процессор для вычисления координаты частицы, память. Критерии отбора событий (достоверности информации). Достоинства и недостатки способа, его характеристики: пространственное разрешение, быстродействие, возможность одновременной регистрации нескольких частиц. Применение: использование в двумерных детекторах рентгеновского излучения со сферическим дрейфовым промежутком, в схеме быстрого однокоординатного детектора рентгеновских квантов (рис. 24).

6. Электроника МПК со съемом информации методом деления заряда, наведенного на высокоомную анодную нить (charge division method). Конструкция камеры. Принцип определения координаты частицы. Механизм генерации сигналов, оценка величин сигналов на концах анодной нити. Структура электроники регистрации. Компоненты электроники: усилители с низким входным сопротивлением, аналого-цифровые преобразователи, процессор для вычисления координат, память. Достоинства и недостатки метода, его характеристики: пространственное разрешение, быстродействие, невозможность одновременной регистрации нескольких частиц с помощью одной анодной нити. Применение: использование для построения быстродействующих однокоординатных детекторов рентгеновского излучения.

7. Электроника дрейфовых камер. Структура камер. Электроды - анод, катод, полевые. Типы дрейфовых ячеек. Механизм образования сигнала. "Горячие" и "холодные" газы, характерные скорости движения заряда. Целесообразность применения метода прямого счета для измерения дрейфовой координаты. Возможность измерения второй координаты. Способы: с линией задержки, center of gravity, charge division (рис.25). Функциональная схема канала электроники для измерения дрейфовой координаты.

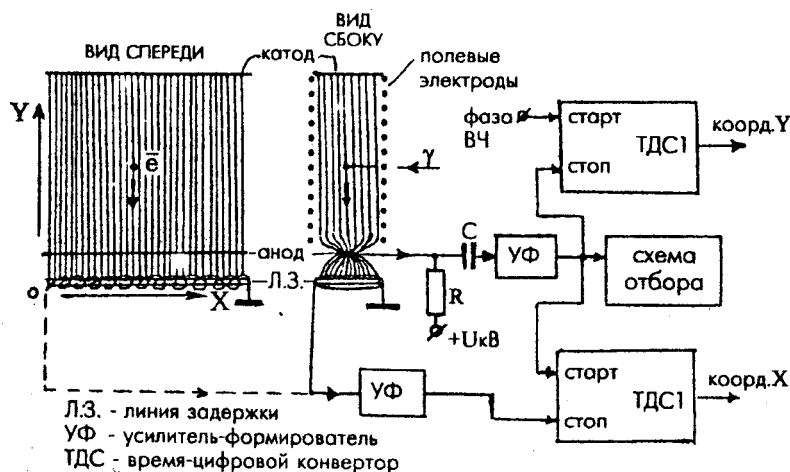


Рис. 25. Пример 2D X-ray детектора на базе дрейфовой камеры с использованием линии задержки для измерения второй координаты

Элементы канала: усилитель-формирователь, RS-триггер управления, генератор, счетчик импульсов. Генерация сигнала запуска (сцинтилляционные счетчики, фаза ВЧ). Пример: time projection chamber детектора ALEPH с катодным съемом информации. Принцип работы, схема электроники.

8. Электроника газовых микростриповых детекторов (GMSD). Структура газовых микростриповых детекторов. Элементы камер - подложка (substrate), анодные и катодные стрипы, дрейфовый промежуток. Характерные размеры. Конфигурация силовых линий электрического поля. Механизм генерации сигнала. Электроника вывода информации с GMSD - цифровая и аналоговая. Необходимость размещения электроники внутри камеры, в ее газовом объеме (минимизация расстояния стрип - усилитель, большое количество выводов). Допустимая рассеиваемая мощность, отвод тепла. Элементы цифровых трактов регистрации - усилитель, дискриминатор, счетчик импульсов, цифровая магистраль, память (рис. 26). Возможное применение (детекторы рентгеновского излучения). Элементы аналогового тракта регистрации (на примере схем RD-2, RD-20): усилитель, аналоговая память, входной и выходной коммутаторы, магистраль для передачи аналогового сигнала, аналого-цифровой преобразователь, память. Возможное применение (вершинный детектор в физике высоких энергий). Достоинства GMSD в сравнении с МПК.

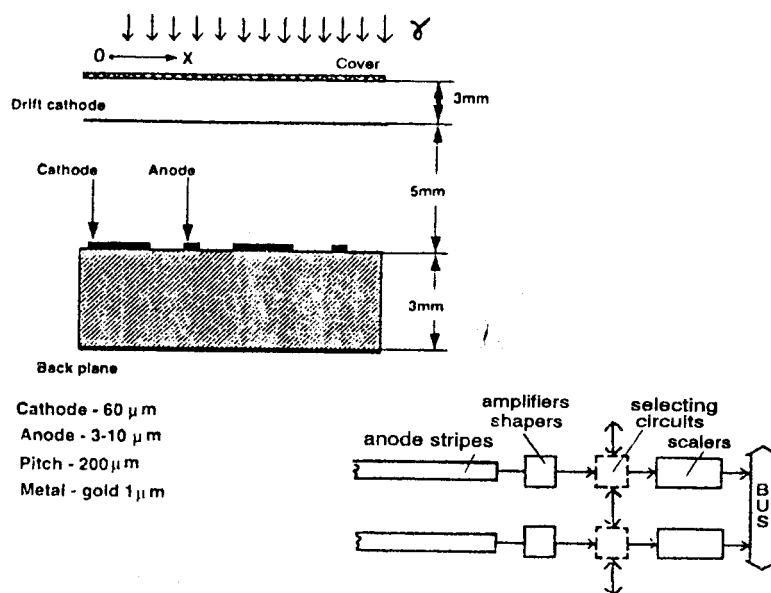


Рис. 26. Микростриповый газовый X-ray детектор с цифровым съемом информации

Параметры: пространственное и энергетическое разрешение, быстродействие. Возможность реализации двумерного съема информации. Проблемы, стоящие на пути к внедрению GMSD в практику физического эксперимента, связанные с подложкой (накопление заряда, старение, разрушение стрипов) и с электроникой (размеры, технология стыковки с камерой, отвод тепла, ремонт).

7. Стандарты в ядерной электронике как структурная база систем сбора данных.

1. Система сбора данных (ССД). Целесообразность построения ССД в основном из стандартных блоков. Понятие о стандартах в ССД - механическом, электрическом, логическом. История стандартов в ядерной электронике. Стандарт 60-х г.г. NIM как единство двух стандартов- механического и электрического. Конструкция крейта (bin), модули, питание. Недостатки стандарта NIM (отсутствие магистрали, ориентация на электронику 2-го поколения). Роль комитета ESONE в появлении стандарта SAMAC для электроники 3-го поколения.

2. Стандарт SAMAC - наиболее распространенный стандарт в современной ядерной электронике. Единство трех стандартов - механического, электрического, логического. Механика стандарта. Крейт, станции, модули, размещение блока питания, стойка, отвод тепла. Напряжения питания (основные и дополнительные), мощности, уровни электрических сигналов, допустимые нагрузки на входе и выходе блока. Магистраль, шины магистрали: назначение, направленность, количество (рис. 27). Цикл магистрали (общее время цикла, его фрагменты). Назначение строб сигналов S1 и S2 (рис. 28).

3. Контроллер Крейта (КК) SAMAC. Назначение КК. Основные функции контроллера: раздача команд NAF; раздача информации по шинам W; прием информации по шинам R; реакция на сигналы L, Q, X; генерация сигналов B, C, Z, S1, S2; организация циклов SAMAC и циклической работы. Типы КК: контроллер как простой интерфейс ЭВМ (КК пословного обмена); бескомпьютерные контроллеры (с жестко запаянной программой работы); КК смешанного типа (с "вшитыми" режимами работы); КК с памятью на NAF; контроллеры-ЭВМ. Достоинства и недостатки каждого типа КК. Области применения в системах сбора данных.

4. Модули SAMAC. Стандартные модули (широкого применения) и специфические для данной системы. Требования к модулям - по мощности, по сопряжению с магистралью (входные и выходные токи, отсутствие влияния на цикл магистрали), по быстродействию "протокольной" части и другие требования. Примеры стандартных цифровых блоков и их краткое описание - счетчики, таймеры, входные и выходные

регистры. САМАС - интерфейсы приборов и устройств. Роль САМАС при подключении устройств к ЭВМ (простога смены ЭВМ на другую).

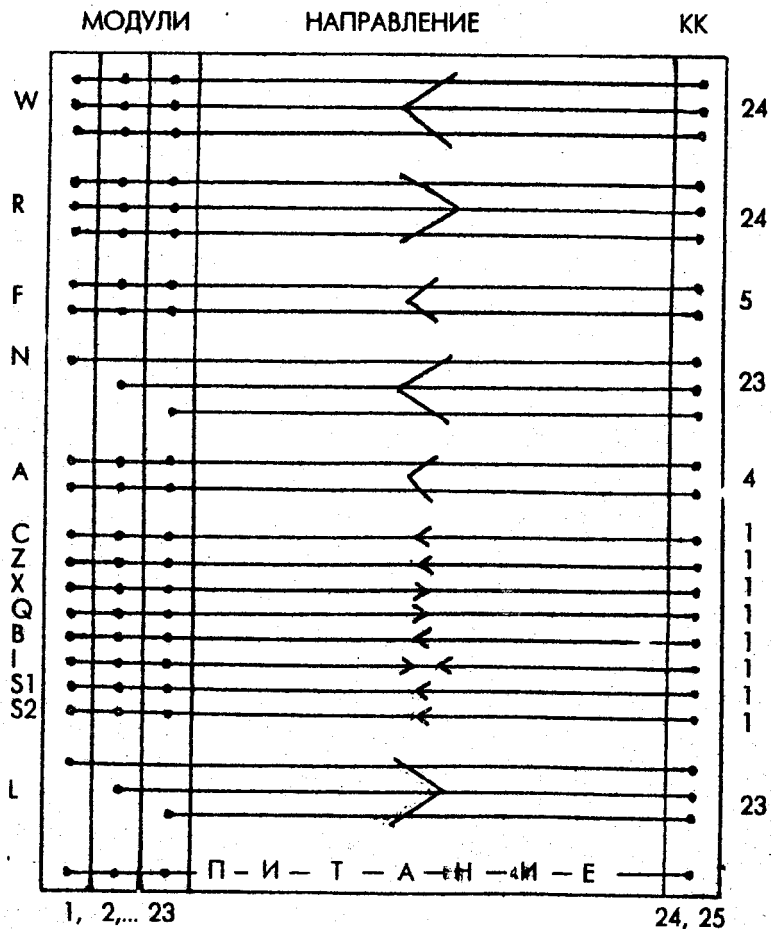


Рис. 27. Магистраль САМАС

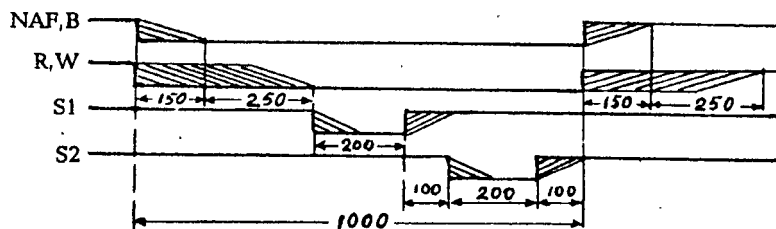


Рис. 28. Цикл САМАС

Аналоговые блоки САМАС. Примеры: усилители, аттенюаторы, линии задержки. Управление с магистрали, контроль параметров. Вспомогательные блоки САМАС - индикатор магистрали, ручной контроллер.

5. Современные стандарты - VME, MULTIBUS, FASTBUS. Краткая характеристика каждого стандарта - механика, мощность питания, уровни сигналов, разрядность и скорость обмена по магистрали, возможности межблочного обмена, назначение и современный реальный статус в ядерной, электронике.

8. ЭВМ в системах сбора данных. Ввод - вывод информации, режимы использования.

1. Роль и место ЭВМ в современном ядерно-физическом эксперименте. Структура ЭВМ, ее основные

компоненты. Представление чисел в ЭВМ - с фиксированной и плавающей запятой, достоинств и недостатки этих способов представления. Нормализация чисел с плавающей запятой, арифметические действия над числами с фиксированной и плавающей запятой. Программа, основные понятия. Условный переход, безусловный переход, обращение к подпрограмме, стек подпрограмм, прерывание, обработка прерываний. Ввод и вывод информации. Программный канал, канал прямого доступа в память, инкрементный канал. Быстродействие, применение этих способов ввода-вывода. Подключение внешних устройств. Интерфейс. Режимы использования ЭВМ - on line, off line. Требования к ЭВМ, применяемых для on line, off line обработки данных. Примеры использования: VAX в детекторе КЕДР, специальные компьютеры АП-20 и АП-32 в детекторах МД-1 и КМД-2.

9. Системы сбора данных (ССД). Структура ССД. Сбор информации, триггер, on line обработка данных. Типы систем.

1. Назначение ССД в экспериментах в физике высоких энергий. Краткая характеристика основных функций ССД:

- многоканальный (параллельный) сбор информации, поступающей неравномерно и с высокой интенсивностью;
- распараллеленное преобразование информации о событии к виду, удобному для его быстрой оценки и обработки;
- многоступенчатая, быстрая оценка событийной информации (задача триггера);
- многопроцессорная (параллельная) предмашинная обработка события ("сжатие" информации, вычитание пьедесталов и т.п.), цель такой обработки, разравнивание информации перед переписью в ЭВМ;
- перепись информации о событии в ЭВМ, on line обработка данных, машинный триггер.

2. Структура ССД. Роль и место стандарта в ССД. Требования к стандартам зависимости от их места в ССД. Основные элементы структуры ССД:

- камерная (front-end) электроника: предусилители, формирователи, экспандеры и т.п. Необходимый минимум электроники непосредственно на детекторе, требования к этой части ССД: размеры, материалы, рассеиваемая мощность, надежность) - радиационная стойкость и т.п.;
- линии связи между детекторами и пультовой регистрацией. Кабельные каналы. Применение коаксиальных кабелей, плоских кабелей, витых пар, оптоволоконных линий связи в зависимости от характера передаваемой информации, действующих помех, стоимости и других причин. Экранирование линий связи.

3. Сбор информации в ССД, предмашинная обработка данных. Многоканальный (параллельный) прием и хранение аналоговой информации. Устройства выборки и хранения (УВХ), аналоговые коммутаторы, аналого-цифровые преобразователи, память для полученной цифровой информации. Целесообразное соотношение количества УВХ и АЦП, суммарное мертвое время преобразования. Прием и обработка временной информации. Целесообразность применения различных типов ВЦП (прямого счета, время-ряд-время-код, хронотроны и т.п.). Функционально-блочная организация электроники в пультовой регистрации. Крейт с магистралью, блоки регистрации, контроллер крейта. Целесообразность применения стандартных или самодельных крейтов. Факторы, влияющие на выбор стандарта или учитываемые при построении самодельных крейтов: размер платы, допустимая рассеиваемая мощность, быстродействие магистрали крейта, стоимость и т.п. Интеллектуальный контроллер крейта, контроллер с жестко зашитыми модами работы. Предмашинная параллельная обработка события, аппаратные и программные средства. Разравнивание событий перед переписью в ЭВМ, уход от реального времени, следствия. Сопряжение электроники сбора и обработки с ЭВМ, перепись данных о событии в ЭВМ. Синхронизация работы ССД. Целесообразность использования для сопряжения с ЭВМ только стандартной аппаратуры. Иллюстрация всех вопросов, затронутых в этом пункте, на примере ССД "КЛЮКВА", используемой в детекторах ИЯФ (рис. 29).

4. Триггер ССД. Назначение системы триггера. Многоступенчатый отбор событий. Первичный триггер (ПТ): исходная информация, характерные задачи, функциональная организация, типичные времена. Генерация импульса ПТ (набор запусков, слагаемые каждого типа запуска, цифровые маски). Стробирование

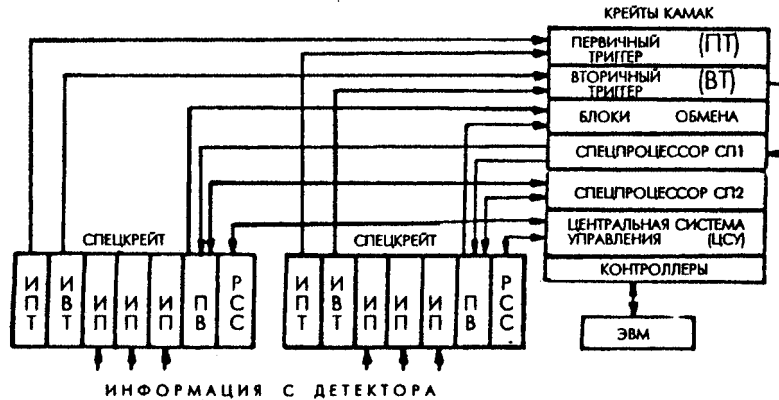


Рис 29. Блочная схема ССД ИЯФ "Клюква". ИПТ - информационные платы, ПВ - процессор вывода, ИПТ и ИВТ - интерфейсы ПТ и ВТ, РСС - разветвитель служебных сигналов

фазой ВЧ, работа без фазы (в режиме "КОСМИКА"). Проверка правильности работы ПТ. Примеры: трек-файндер первичного триггера детектора КМД-2, организация первичного триггера детектора КЕДР. Вторичный триггер (ВТ): исходная информация, характерные задачи, функциональная организация, типичные времена. Генерация импульса "решение ВТ" (набор "заказанных" решений, слагаемые каждого решения, цифровые маски). Допустимая входная нагрузка (связать с просчётами из-за мертвого времени ВТ). Разрешенная интенсивность положительных решений ВТ (связать с просчётами из-за мертвого времени ССД). Проверка правильности работы ВТ. Пример: вторичный триггер детектора КЕДР (рис. 30). Третичный (машинный) триггер: исходная информация, характерные задачи, реализация. Отличие от on line обработки события: анализу подвергается в основном только часть события, быстро определяются только несколько параметров, по которым выносится заключение о полезности данного события. Пример: третичный триггер детектора МД-1.

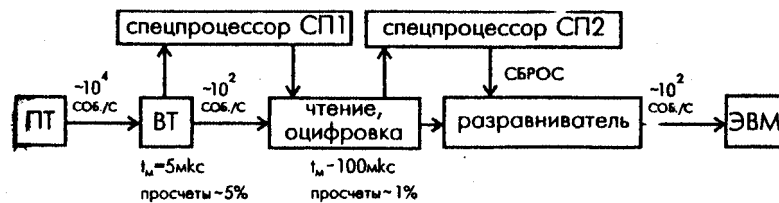


Рис. 30. ССД "Клюква". Быстродействие и просчёты.

5. Режимы работы ССД с "общим стартом" и "общим стопом". Краткая характеристика канала ВЦП с "общим стартом". Элементы канала: РЦП, коллективный "старт" от первичного триггера, индивидуальный "стоп" от обслуживаемого детектора, задержка в цепи каждого "стопа" для компенсации времени работы первичного триггера. Достоинства такой организации канала ВЦП: сравнительно простая схема, готовность к работе к моменту появления сигнала "старт". Недостаток - необходимость стабильного элемента задержки в каждом канале. Краткая характеристика канала ВЦП с "общим стоном". Элементы канала: ВЦП, индивидуальный старт от обслуживаемого детектора, общий "стоп" от первичного триггера, цепь автосброса в каждом канале, срабатывающая после истечения максимального времени работы ВЦП. Достоинство такой организации канала ВЦП: нет необходимости в элементе задержки в каждом канале. Недостатки: усложненная схема ВЦП (автосброс), вероятность занятости канала, например, от космической частицы, к моменту прихода "полезного" сигнала. Примеры: канал ВЦП дрейфовой камеры детектора КЕДР ("общий стоп"), канал ВЦП время-пролётной системы в этом же детекторе ("общий старт").

6. On line обработка событий. Постановка задачи. Основные параметры системы обработки: время переписи данных о событии, процессорное время на обработку события, надежность, возможность контроля и быстрого устранения неисправности, стоимость оборудования. Два основных пути решения задачи.

Первый путь - традиционный - использование в качестве on line системы быстродействующего компьютера. Достоинство способа - использование стандартного оборудования. Второй путь - использование фермы машин с разравнивателем FIFO и коммутатором на входе. Очередное событие записывается в "свободный" компьютер. Преимущества второго способа: применение более медленных вычислительных систем, высокая надежность (при выходе из строя одного компьютера просто соответственно снижается скорость обработки событий), надежный контроль процесса обработки (каждое, к примеру, тысячное событие пишется сразу во все компьютеры и результаты проверяются на идентичность). Примеры: ССД детектора КЕДР с использованием VAX в качестве on line компьютера; ССД детектора КМД-2 с применением фермы транспьютерных VME процессоров.

7. Альтернативный способ построения ССД на основе аналоговых сдвиговых регистров (pipeline системы). Ответвление, оцифровка и обработка триггерной информации, селекция по решению триггера двигающихся по аналоговым регистрам соответствующих событий. Преимущество такого способа; необходимость быстрой оцифровки только триггерной информации (отобранные события обрабатываются с существенно меньшей скоростью).

10. Заключение

Роль и место ядерной электроники в науке и технике. Круг вопросов, специфика.

Анализ вопросов и тем, упомянутых выше, показывает, что ядерная электроника затрагивает в той или иной степени весьма значительные области полупроводниковой техники, аналоговой и цифровой электроники, измерительной техники, вычислительной техники, электротехники. Особенно широкое поле деятельности для специалистов в той области физики элементарных частиц открывается (к сожалению) в России, где весьма трудно заказать "на стороне" необходимую аппаратуру, как это обычно делается в развитых странах. Действительно, большую часть систем сбора данных там можно собрать из выпускаемых фирмами блоков, а небольшую, специфическую часть заказать специально или произвести в собственных мастерских. В таких условиях специалист, отвечающий за электронику детекторов, должен хорошо представлять проблему в целом, продумать структуру ССД, оптимально произвести упомянутое выше разделение, выгодно купить надежную аппаратуру и разместить заказ на оригинальные блоки и устройства (или разработать и изготовить своими силами), а в дальнейшем произвести настройку и запуск системы. В наших же условиях раньше допуск на западный рынок был сильно затруднен. Теперь этот рынок доступен, но цены на блоки широкого применения (сотни и тысячи долларов за штуку) практически делают невозможными закупки специальной аппаратуры в необходимых количествах. (Правда, сейчас можно закупать в "дальнем зарубежье" комплектующие изделия, цены на них иногда ниже, чем на отечественные аналоги). Выход и раньше и теперь для нас один: разрабатывать и производить практически всю аппаратуру в собственных мастерских, для чего необходимо иметь достаточно сильные инженерные группы и производственные мощности.

Возвращаясь к кругу вопросов, которыми необходимо заниматься разработчикам систем регистрации для экспериментов в области физики высоких энергий, можно просто перечислить основные компоненты этих систем, чтобы показать, насколько широк этот круг.

1. Детекторы элементарных частиц

Необходимость детального знания этого вопроса может показаться спорной, т.к. этими устройствами должны заниматься физики-экспериментаторы. Однако инженер-разработчик электронной аппаратуры должен хорошо разбираться в работе детекторов, чтобы грамотно выбрать и спроектировать электронику регистрации. Кроме того, часто бывает трудно провести границу раздела между собственно детектором и электроникой съема информации, а иногда и весь детектор можно без особой натяжки отнести к электронному устройству (полупроводниковые детекторы, ПЗС и фотодиодные матрицы и др.).

2. Front-end электроника

Спектр этих устройств, расположенных вблизи детектирующих структур, весьма широк (см. соотв. раздел курса), а требования к ним часто очень высоки: высокая чувствительность, стабильность параметров, низкий уровень шумов, широкий динамический диапазон, идентичность параметров, высокая

надежность, радиационная стойкость, малые габариты, малое выделение тепла и т.п.

3. Аналого-цифровое преобразование

Здесь также нужно быть специалистом весьма широкого профиля, т.к. диапазон АЦП очень широк, а требования к ним предъявляются также высокие: измерение сверхкоротких интервалов времени (вплоть до субнаносекундного диапазона), сверхмалых зарядов, прецизионные измерения магнитных полей, измерение формы импульсов с высоким временным и амплитудным разрешением при однократных быстротекающих процессах и т.п.

4. Быстрая обработка цифровой информации перед записью в on line компьютер

Речь идет о предельно быстрой обработке данных, поступающих одновременно по тысячам (часто по десяткам тысяч) измерительных каналов. Здесь также необходимо быть универсалом, т.к. приходится часто балансировать между быстродействием, что тянет к аппаратному решению, и гибкостью систем, что располагает к программируемой аппаратуре. Стремление сократить мертвое время систем обработки привело к появлению стандартов типа FASTBUS с быстрой магистралью, интеллектуальных быстрых контроллеров, спецпроцессоров с аппаратно реализованными алгоритмами обработки, трекфайндеров разных типов и т.п. Примеры: контроллеры SAMAC с памятью NAF, блок вывода и спецпроцессоры ССД "КЛЮКВА", быстрый процессор для определения координат γ -квантов и их on-line отбора по энергии в двукоординатном детекторе рентгеновского излучения.

5. Создание высокопроизводительных компьютерных сетей для on line и off line обработки информации

Здесь, кроме широко применяемых серийных мощных вычислительных систем, следует упомянуть устройства, разрабатываемые инженерными группами ядерных центров: транспьютерные контроллеры, фермы однокристалльных или одноплатных процессоров и т.п. Примеры: ферма процессоров для on line обработки событий для детектора СНД, арифметический процессор АП-20 для off line обработки событий для детектора МД-1.

6. Силовая электроника

Генерация мощных постоянных токов для формирования однородных магнитных полей большого объема, создание прецизионных электростатических и электромагнитных отклоняющих и фокусирующих систем, разработка мощных низковольтных источников питания и многоканальных высоковольтных программно-управляемых источников и т.п.

Это далеко не полный перечень вопросов, которыми должны заниматься специалисты в области ядерной электроники, чтобы обеспечить разработку, создание и функционирование необходимой ядерно-физической аппаратуры. Причем многообразие этих вопросов, предельно жесткие требования к аппаратуре, а также творческая атмосфера активного сотрудничества с физиками-экспериментаторами и возможность свободного общения с коллегами из других ядерно-физических центров, - все это способствует появлению не только нетривиальных решений, но иногда приводит к созданию "прорывных" технологий (FADC, быстрая аналоговая память и др.). Конечно, эти достижения затем быстро распространяются на другие области науки и техники. Вообще необходимо заметить, что применение ядерно-физического инструментария, в том числе из арсенала ядерной электроники, в других (прикладных) областях часто бывает весьма полезным и, в свою очередь, вызывает "прорыв" и там. В качестве примера таких областей можно указать медико-биологические и рентгеноструктурные исследования. Здесь оказалось целесообразным в частности, применить ионизационные камеры разных типов для детектирования рентгеновских квантов (измерение их координат и энергии). Созданные на базе многопроволочных пропорциональных камер детекторы рентгеновского излучения, работающие в режиме прямого счета квантов, позволили в медицинской рентгенографии резко (в десятки и даже сотни раз) снизить дозы облучения пациентов, значительно улучшить диагностические возможности (за счет увеличения динамического диапазона и контрастности), упростить архивирование и создать ряд других удобств в работе врача-рентгенолога. Другой тип ионизационных камер - микростриповые газовые детекторы - позволил вплотную приблизиться к созданию низкодозного прецизионного маммографа, способного диагностировать предраковые образования размером ~50 мкм. Разработан реальный проект γ -камеры для регистрации излучения, испускаемого потоком, введенным в кровь человека; для детектирования рентгеновских квантов используется ксеноновая камера высокого давления. Этот детектор способен снимать своеобразное "кино" о распространении изотопа со скоростью 10.000 кадров в секунду.

Дополнительные впечатляющие примеры: ЯМР и компьютерные томографы, определение распределения элементов в различных структурах с помощью синхротронного излучения и многое другое.

В рентгеноструктурных исследованиях успешно используется целое семейство детекторов рентгеновского излучения, входящих в состав дифрактометров. Эти одно- и двумерные детекторы также используют для регистрации квантов пропорциональные камеры с различными методами съема информации (см. соотв. разд. курса). Применение таких детекторов позволило резко повысить эффективность научных исследований при измерении параметров кристаллических (или других регулярных) структур. Подобные устройства также оказались очень эффективными и в других областях науки и техники - в рентгеновской астрономии, при контроле багажа в аэропортах, диагностике сварных швов и т.п.

Приведенные примеры хорошо свидетельствуют о несомненной, даже сиюминутной, пользе фундаментальных наук, когда методы одной из них - физики элементарных частиц - могут быть эффективно применены для решения уже сегодняшних задач.