



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •  
• МОСКВА •  
• КРАСНОДАР •  
2016



В. Г. ДЕМЕНКОВ,  
П. В. ДЕМЕНКОВ

# НАЧАЛА ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

*Учебное пособие*



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •  
• МОСКВА • КРАСНОДАР •  
2016

ББК 22.383я73

Д 30

**Деменков В. Г., Деменков П. В.**

**Д 30** Начала электронных методов ядерной физики: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 384 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-1902-9**

Представлены основополагающие методы и электронные средства обработки сигналов детекторов ядерного излучения. Изложенные материалы связаны с физикой средних и низких энергий и отражают современное состояние экспериментальной базы и ее техническое обеспечение.

Для студентов направлений подготовки «Прикладные математика и физика», «Физика», «Радиофизика», «Ядерная энергетика и теплофизика», «Ядерная физика и технологии», «Техническая физика» и специалистов, эксплуатирующих технику измерения параметров ионизирующих излучений в ядерной физике и смежных ее областях науки и техники.

ББК 22.383я73

**Рецензенты:**

*О. А. ПЛАКСИН* — доктор физико-математических наук, руководитель отдела ИРМиТ ФГУП «ГНЦ РФ ФЭИ»;

*А. А. АБАКУМОВ* — доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электроники факультета «Кибернетика» Обнинского института атомной энергетики филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Обложка**

*Е. А. ВЛАСОВА*

© Издательство «Лань», 2016

© В. Г. Деменков, П. В. Деменков, 2016

© Издательство «Лань»,

художественное оформление, 2016



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Ядерно-физические исследования представляют собой целенаправленный поиск и выявление закономерностей в строении вещества. Их своеобразие состоит в том, что устанавливаются микроскопические свойства материалов на ядерном уровне. Эксперимент является ключевым звеном в получении информации нового уровня и формата. Полученные знания используются при уточнении теории или для выявления ее новых положений. Это расширяет сферу исследований и помогает скорректировать, равно как и детализировать их направление. В таком случае создаются условия для дальнейшего продвижения техники научных исследований, совершенствования планирования и организации эксперимента, включая поиск и применение новых методик измерений.

Совершенство электронной аппаратуры и средств вычислительной техники образуют автоматизированную систему накопления и обработки данных, получаемых в ходе эксперимента. Сложность таких систем, их состав, структура и варианты применения определяются уровнем решаемых экспериментальных задач. Весьма весомый вклад в сферу изучения ядерных превращений вносят электронные методы ядерной физики, приборы и техника для экспериментальных исследований. Не последняя роль на данном направлении принадлежит средствам измерения параметров ионизирующих излучений, включая ядерную электронику и ее наносекундную технику. Электронные средства этой техники весьма масштабно используются в изучении быстротекущих физических процессов.

Представляемые материалы состоят из четырех разделов, каждый из которых имеет дело с определенным направлением и базовыми положениями регистрации параметров ядерных превращений. В первом из них рассматриваются основные положения регистрации ионизирующих излучений, детекторы и их сигналы. Демонстрируются линейные методы обработки сигналов, связанные с утратой энергии частицей в детекторе, и амплитудой выделенного им сигнала. Приведены схемы и электронная техника получения и линейной обработки детекторных сигналов. Среди электронных средств данного назначения рассмотрены различные предусилители, спектрометрические и пороговые усилители, расширители сигналов, суммирующие усилители и усилители с задержкой и т. д., включая схемы линейного пропускания, восстановления постоянной составляющей исходного уровня, а также устройства инспекции наложений аналоговых сигналов и технику их мультиплексирования. Линейные методы обработки детекторных сигналов совместно с электронными средствами их реализации составляют основу для амплитудных измерений в спектрометрии ядерных излучений.

Во втором разделе обсуждаются шумы измерительного тракта и меры борьбы с ними. Рассматриваются нелинейные методы выделения и обработки детекторных сигналов, включая технику их ограничения, дискриминации и селекции. Демонстрируются схемы, выполняющие дискретную обработку сигналов путем их нормирования по амплитуде и длительности. При этом до некоторой степени утрачивается связь между потерями энергии в материале детектора и сигналом, получаемым на его выходе. В таком случае можно говорить лишь о факте регистрации частицы, происходящем при определенных условиях. Представлены методы и варианты технических решений реализации схем совпадений и антисовпадений. Этот вид электронной техники довольно масштабно используются при селекции и отборе событий, обеспечивая идентификацию эффекта либо подавление фона. Вместе с другими электронными средствами они входят в состав измерительных систем. Эти устройства, образуя логику отбора полез-

ных событий при регистрации, повышают эффективность и надежность измерений в целом.

В третьем разделе демонстрируются методы и техника счета событий. Зафиксированная информация позволяет судить об интенсивности источников излучения. Применяются как аналоговые, так и цифровые методы счета событий, причем последние могут регистрировать события с учетом живого или мертвого времени. Рассматривается наиболее распространенный метод исследования ядерных превращений — амплитудный анализ. Даны характерные особенности, основные параметры и техника его реализации. Обсуждаются методы аналого-цифрового преобразования, которые нашли наиболее широкое применение во всем многообразии измерительных каналов различных спектрометрических установок. Раскрывается суть временного анализа и его ключевые разновидности. Представлены электронные средства и совокупность схемотехнических решений, применяемые для измерений распределений интервалов времени в микросекундном и наносекундном диапазонах.

В четвертом разделе раскрываются базовые направления спектрометрии ядерных излучений, включая различные версии мультифакторного амплитудного и временного анализа. Обсуждаются вопросы и проблемы прецизионных и долговременных измерений характерные для каждой разновидности анализа, включая их техническое обеспечение. Демонстрируются электронная техника и средства контроля параметров измерительных трактов спектрометров, регистрирующих ядерные излучения. В довольно сжатой форме изложены вопросы стандартизации электронных средств для автоматизации ядерно-физических исследований на основе базовых стандартов магистрально-модульного принципа их построения (САМАС, ВЕКТОР, FASTBUS, VME и т. д.).

Предъявляемые материалы и рассмотренные вопросы, а также обсуждаемая совокупность проблем должны представлять интерес для студентов старших курсов физических специальностей разных вузов. Ими могут воспользоваться специалисты и инженерно-технический персонал,

эксплуатирующий электронные средства различных ядерно-физических установок и выполняющий измерения на их базе. Представленная информация может быть полезна специалистам, которые используют электронные методы ядерно-физических исследований в смежных областях науки и техники, а именно: в геологии, нефтеразведке, мониторинге окружающей среды, в контроле и диагностике деталей и материалов, в химии, биологии, археологии, медицине, включая космические исследования и т. п.

Основой изложенных здесь материалов послужил курс лекций, который в течение нескольких лет читается на ряде кафедр физико-энергетического факультета Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» Обнинского института атомной энергетики. Авторы не претендуют на полноту изложения обсуждаемых материалов, однако в них отражены и систематизированы основные положения электронных методов ядерной физики и технические средства ядерно-физического эксперимента. Подбор материала может быть не совсем оптимален, а в ряде случаев и не в меру детализирован, однако авторы с благодарностью примут все замечания по содержанию, структуре и характеру изложения материалов, представляемых в данной работе.

РАЗДЕЛ I

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА  
ЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ  
ДЕТЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ



## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В материалах данного раздела рассматриваются базовые методы регистрации ядерных излучений, а также некоторые проблемы и трудности, обусловленные реализацией этих процессов. Демонстрируются магистральные направления в изучении ионизирующих излучений, включая особенности измерений их параметров. Обсуждаются основные виды детекторов и их сигналы. Отмечается взаимосвязь параметров и режима работы детекторных устройств. Рассмотрены преобладающие факторы, вызывающие в них нарушения условий пропорциональности.

Проведена оценка параметров выходных сигналов газонаполненных, полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов и выполнен сопоставительный анализ их сигналов. Особо отмечено кардинальное преимущество полупроводниковых детекторов в точности измерения энергии ядерных излучений. Данный аспект связан с минимальными затратами энергии (около 3 эВ) на образование пары носителей заряда (электрон, дырка) в детекторах этого вида. По результатам сравнительного анализа сделаны выводы, позволяющие глубже понять основные проблемы регистрации ядерных превращений. Обсуждается функционирование типового варианта включения детектора и схема его замещения.

Раскрывается суть линейных методов обработки детекторных сигналов и своеобразие их усиления. Отмечены функции предусилителя и его разновидности. Приведены структура, характеристики и особенности зарядочувстви-

тельного предусилителя, включая меры предосторожности работы с ним. Представлены линейные звенья формирования детекторных сигналов, используемые в составе спектрометрического усилителя, его функциональная схема и основные характеристики.

Рассматриваются линейные устройства выделения и формирования детекторных сигналов. Их задержка, расширение, линейное суммирование и пропускание. Устройства восстановления постоянной составляющей в цепях передачи сигналов, а также их аналоговое мультиплексирование и применение этих устройств в линейной обработке сигналов детекторов ядерного излучения. Именно данная совокупность вопросов и ряда аспектов нашла отражение в содержании первого раздела.



ГЛАВА 1

**БАЗОВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
РЕГИСТРАЦИИ  
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Ионизирующие излучения являются результатом ядерных превращений. Основными из них принято считать ядерные реакции и радиоактивный распад. Продукты этих превращений в виде легких и тяжелых частиц, как заряженных, так и нейтральных, являются объектами изучения. Практический и научный интерес представляют результаты и последствия их взаимодействия, которые также становятся предметом исследований. При изучении таких превращений используются экспериментальные методы ядерной физики и физики деления, ионизационные и сцинтилляционные методы, спектрометрия, дозиметрия, радиометрия.

1.1.  
**ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
И ИХ ВИДЫ**

В практике повседневной жизни встречается внушительное разнообразие источников радиоактивного излучения. Их можно разделить на два основных вида: естественные и искусственные. Воздействуя на материалы, радиоактивное излучение проникает вовнутрь, вызывая в них ионизацию. В силу этого их называют еще источниками ми ионизирующего излучения. Естественные источники —

это излучение окружающей среды, а искусственные — результат целенаправленной деятельности человека.

Первым из них служит космическое излучение (Солнце, звезды, галактики и т. п.). Взаимодействуя с атмосферой Земли, это излучение образует большое количество вторичных частиц, весьма разных по виду. Первичное космическое излучение, представляющее научный интерес, исследуется с помощью аппаратуры, доставляемой ракетами, спутниками и другими космическими аппаратами за пределы земной атмосферы.

В свою очередь, вторичное излучение, связанное с космическим излучением у поверхности земли, регистрируется уже как фоновая его составляющая. Именно такой фон затрудняет поиск и исследование источников естественной радиоактивности слабой интенсивности. Естественная радиоактивность, обусловленная  $\alpha$ -,  $\beta$ - или  $\gamma$ -излучением, была открыта еще в 1896 г. Беккерелем в урановых рудах. Изучение такой радиоактивности ориентировано на поиск полезных ископаемых и оказывает неоценимые услуги в разведке залежей газа, нефти, полиметаллических руд и т. п.

Естественная радиоактивность используется для определения возраста минералов в геологии, находок в археологии, включая и другие сферы, например метеориты, лунный грунт и т. п. Определяя концентрацию изотопа углерода-14, имеющего период полураспада 5730 лет, можно судить о времени утраты жизнеспособности представителя флоры либо фауны, т. е. вида растения или животного мира. Следует заметить, что других методов такой направленности в распоряжении ученых пока нет.

Результатом жизнедеятельности человека, как уже отмечалось, являются искусственные источники ионизирующего излучения. Среди них отметим научно-исследовательские реакторы и ядерно-физические установки, реакторы атомных электростанций (АЭС) и ускорители заряженных частиц, нейтронные генераторы, изотопные установки и источники, радиоактивные отходы и т. д. Такое постоянно растущее количество искусственных источников радиоактивного излучения позволяет говорить уже

о загрязнении ими окружающей среды, и их объемы, естественно, увеличиваются. Данная тенденция и связанные с ней последствия вызывают обеспокоенность и озабоченность человечества.

Вместе с тем на практике весьма широко используется изотопный анализ. Его применяют в различных областях науки, в ряде отраслей промышленности, геологии, медицине и т. п. Проведение активационного анализа необходимо для металлургии и химии, не исключая некоторых направлений добывающей и пищевой промышленности. Важно отметить эффективное использование меченых атомов в разных областях науки и техники.

## 1.2. КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ИЗУЧЕНИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Разнообразие принципов преобразований является основой измерений и фиксации параметров ионизирующих излучений. В результате частных, но характерных и обобщенных видоизменений в веществе под действием ядерных излучений осуществляется их регистрация. Как уже известно, это может быть ионизация, люминесценция, конденсация, сцинтилляция, возникновение искрового разряда, нарушение кристаллической структуры, калориметрия и т. п. Процессы преобразования этих превращений идут в определенной последовательности и выполняются до тех пор, пока интересующий исследователя параметр ядерного излучения не будет представлен в необходимом виде и в установленной форме.

Между тем в ядерной физике можно выделить три основных направления, связанных с изучением параметров и характеристик ионизирующих излучений: дозиметрия, радиометрия и спектрометрия. Эти направления в решении своих задач используют практически идентичную технику в виде специальных электронных средств измерений. Однако они в существенной степени отличаются постановкой и сферой решаемых задач.

*Дозиметрия* решает задачи определения величин, характеризующих перенос, передачу и поглощение энергии излучения. С ее помощью решают проблемы контроля радиационной безопасности, воздействия излучения на окружающую среду, вопросы лучевой терапии, определения степени или дозы облучения и т. д. Это направление призвано способствовать применению ядерных технологий в различных сферах науки и техники с высочайшим уровнем безопасности их реализации.

*Радиометрия* решает задачи определения активности источников, создаваемых ими полей излучения, определения активности конкретного изотопа в различных средах, материалах и объектах. С ее помощью находят ответы на вопросы объемной и поверхностной концентрации радионуклидов. Отслеживается их миграция в пространстве и во времени, ведется оперативный контроль радиационной обстановки, включая применение меченых атомов в различных областях науки и техники.

*Спектрометрия* решает задачи измерения распределения частиц по энергии, их зарядам и массам в пространстве и во времени. Перечень ее методик, их варианты реализации необычайно широки и многогранны. Техника и электронные средства, призванные решать вопросы и задачи спектрометрии, наиболее сложные из всей совокупности экспериментальных методов ядерной физики. Это одно из самых дорогостоящих, высокочувствительных и наиболее сложных направлений прикладной ядерной физики.

В каждом из направлений, несмотря на различие задач, методы их решения в ряде случаев тесно переплетаются. Области соприкосновения лежат в сфере использования методик измерений, применяемых в них технических средств. Нередко здесь же присутствуют и способы обработки полученных результатов исследований. Это наиболее характерно и достаточно четко прослеживается в двух последних направлениях.

Тем не менее следует признать, что задачи спектрометрии более масштабны, а уровень их сложности существенно выше. Действительно выдвигаемые требования при этом становятся более жесткими. Такую ситуацию можно

объяснить тем, что при спектрометрии нередко регистрируется и фиксируется весьма значительный набор параметров исследуемого ядерного процесса. Это является необходимым условием при доскональном изучении и установлении характера их взаимосвязи. Данной совокупностью измеряемых при этом параметров может быть энергия, угол разлета компонентов, интенсивность взаимодействия, вид излучений, одновременность их поступления и т. п.

### 1.3. ТРУДНОСТИ В ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ЯДЕРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Одной из характерных особенностей измерения параметров ионизирующих излучений является то, что в зафиксированных данных обязательно присутствует вклад сторонних эффектов. Их вносит фоновая составляющая ионизирующих излучений. В ряде случаев даже применение специальных мер не гарантирует благоприятный исход в достижении результата. Действительно, фон является весьма обременительным фактором в изучении и регистрации параметров ионизирующих излучений.

Такая ситуация имеет место, если интенсивность стороннего, т. е. фонового, излучения в значительной мере превышает интенсивность, которая обусловлена самим исследуемым ядерным процессом. Следует заметить, что фоновая обстановка, как показывает практика измерений, формируется главным образом за счет естественных источников ионизирующих излучений. В их составе не последнее место занимает все многообразие космических излучений.

В ряде случаев фоновая составляющая явно обусловлена самим экспериментом. При этом эффект и фон в ходе измерений регистрируются одновременно. В такой ситуации остро встает вопрос о корректном учете вклада фоновой составляющей. Радикальным решением данной задачи может служить дополнительное, т. е. обособленное,

измерение фона при тех же условиях и в той же самой геометрии эксперимента.

Это успешно решает возникшую проблему. Действительно, если отдельно измеренную составляющую фона затем вычитают из данных, зарегистрированных в ходе эксперимента, то полученные результаты, в свою очередь, будут непосредственно связаны с изучаемым ядерным процессом. На практике при регистрации параметров ионизирующих излучений для снижения вклада фоновой составляющей применяют и с успехом используют самые разнообразные подходы.

Эффективным решением проблемы принято считать защиту детекторных устройств с помощью специальных материалов, которые хорошо поглощают фоновое излучение. Нередко используют комбинированную защиту в виде набора различных материалов. Их непосредственно объединяют и оформляют в единую конструкцию, например в виде цилиндрического контейнера. Изучаемое излучение поступает на детектор уже через коллиматор, т. е. специальное отверстие в защите. Такое сооружение позволяет эффективно защитить детекторное устройство от внешних излучений разного вида.

Наряду с вариантами конструкционного подхода к борьбе с проявлениями фона нередко применяют различные методические решения с использованием соответствующих электронных средств. В первую очередь это связано с применением методов совпадений и антисовпадений для отбора событий при экспериментальных исследованиях. Эти методы, как и электронные средства, реализуемые в виде схем совпадений и антисовпадений, являются действенным инструментом в снижении фоновых составляющих при регистрации. Применение электронных средств данного вида обеспечивает вполне приемлемые результаты в измерении параметров изучаемых ядерных процессов. Повышается эффективность регистрации и улучшается отношение «эффект — фон» в десятки и сотни раз, а иногда и выше.

Не последнее место на фронтах борьбы с негативными проявлениями фоновых составляющих занимают нели-

нейные методы обработки детекторных сигналов. Различные варианты амплитудной дискриминации, которые относятся к нелинейным методам, являются весьма эффективным средством борьбы с фоном. Такие методы, как электронная техника их реализации, считаются одной из разновидностей радикальных средств решения проблемы снижения вклада фоновых составляющих в результаты измерений.

Применение всего разнообразия электронной техники отбора событий позволяет успешно преодолеть трудности, обусловленные проявлениями различных фоновых ситуаций. Существуют и другие подходы к данной проблеме борьбы с фоном. В известной мере корректное решение вопросов фона при организации и проведении исследований, которое зачастую весьма неординарно, а иногда и достаточно специфично, нередко служит одним из критериев оценки зрелости и мастерства экспериментатора.

#### 1.4. ИОНИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Все многообразие природных субстанций реагирует на воздействие радиационного излучения. Характер их взаимодействия зависит от состава вещества и вида излучения. Реакция материалов окружающей среды при таком воздействии тоже будет различна. Физические процессы, происходящие в них, будут отличаться и зависеть, если можно так выразиться, от субъекта воздействия — поступила заряженная или нейтральная частица. Рассмотрим наиболее общие стороны этих процессов.

Однако прежде чем выяснять эти аспекты, следует напомнить, что вся совокупность ионизирующих излучений может быть разделена на две основные группы. Одна из них является квантовым электромагнитным ионизирующим излучением ( $\gamma$ -излучение, рентгеновское и т. п.), а другая — корпускулярным, состоящим из частиц ( $\alpha$ -частицы, протоны,  $\beta$ -частицы, нейтроны и т. д.), и тоже считается радиационным излучением. При взаимодействии

излучения со структурой различных материалов обычно происходит ряд элементарных актов, результаты которых положены в основу регистрации всех радиационных излучений и составляют ее неотъемлемую часть. Известно, что заряженная частица при движении в этих веществах производит ионизацию материала, что вызывает появление в нем носителей зарядов обоих знаков.

В газовых, жидких и твердых средах это электроны и ионы, которые соответственно будут заряжены отрицательно и положительно. Такая разновидность носителей зарядов образуется за счет нарушения в структуре материала химических связей. В полупроводниковых материалах данными носителями зарядов служат соответственно электроны и дырки. Процесс регистрации ядерных излучений, связанный с образованием носителей зарядов разных знаков, называется ионизационным методом.

Гамма-кванты, нейтроны и ряд других частиц являются, в принципе, электрически нейтральными и в силу этого не могут непосредственно производить ионизацию. Однако их взаимодействие со средой вызывает образование и появление заряженных частиц, которые, в свою очередь, уже могут осуществлять ионизацию среды. В этом случае ядерные излучения такого вида являются косвенно ионизирующими. Нетрудно понять, что решение задачи регистрации заключается в подборе состава среды, где преобладает природа данного физического процесса.

В целях регистрации на последующих этапах осуществляется разделение зарядов с помощью электрического или магнитного поля. Такие поля создаются в специальных устройствах, которые получили название детекторы. В этих устройствах с помощью поля, осуществляя перемещение зарядов, а также их сбор на электродах, преобразуют результаты ионизации в электрический сигнал. Устройства такого назначения в измерительной технике называются первичными преобразователями или датчиками. В ядерной физике все многообразие таких устройств сохранили свое название — детекторы. Стало быть, детектором является прибор специализированного назначения,

обеспечивающий регистрацию ядерных превращений в различных формах радиационных излучений.

Ионизационный метод положен в основу работы разных видов газонаполненных детекторов — это ионизационные камеры, пропорциональные счетчики, счетчики Гейгера — Мюллера. Полупроводниковый детектор тоже можно считать камерой, но с твердым наполнителем. В последнее время наблюдается тенденция роста в использовании газонаполненных камер в измерениях. Этому способствуют новые материалы, новые конструкции камер (многослойные, плоские, полусферические, с несколькими сетками и т. п.). Заметим, что камера является одним из детекторов, где исследуемый делящийся материал или другой источник излучения можно разместить внутри самого детекторного устройства.

### 1.5. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД — ОСНОВА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Наряду с ионизацией в практике регистрации радиоактивных излучений широко используется люминесцентный метод. Он основан на измерении уровня интенсивности световых вспышек, возникающих в веществе. Их появление связано с переходом структуры вещества из возбужденного состояния, вызванного радиационным воздействием, в основное.

Вещества, обладающие способностью испускать свет при воздействии ионизационных излучений, называются фосфорами или люминофорами. Они могут быть газообразные, жидкие или иметь кристаллическую форму. Процесс испускания ими фотонов света под действием ионизирующего излучения называется сцинтилляцией. Все материалы как искусственного, так и естественного происхождения, обладающие такой способностью, именуется, в свою очередь, сцинтилляторами.

Регистрация сцинтилляций ведется с помощью разных устройств и структур, преобразующих вспышку света в

электрический сигнал. Наибольшее распространение и применение среди них получило специальное электронное устройство, названное фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Эти устройства превращают световые кванты, испускаемые сцинтиллятором, в электрический сигнал. Они, разные по конструкции, назначению и габаритам, иногда соединяются со сцинтиллятором через промежуточный прозрачный материал, называемый световодом.

В структуре ФЭУ, состоящего из фотокатода, диодной системы и анода, сигнал снимают обычно с анода. В основу работы ФЭУ положено явление фотоэффекта. Кванты света, возникшие в сцинтилляторе при воздействии радиоактивного излучения, через прозрачное окошко попадают на фотокатод ФЭУ и выбивают из него фотоэлектроны. С помощью электрического поля ФЭУ их направляют на первый диод, где число электронов возрастает за счет малой работы выхода материала самого диода.

Электрическое поле в ФЭУ создается резистивным делителем и внешним источником напряжения. Оно транспортирует к аноду по диодной системе электроны, число которых возрастает после каждого диода. Количество диодов в ФЭУ может быть более десятка, и число электронов, достигающих анода, превышает в  $10^5$ – $10^7$  и более раз число электронов, попавших на первый диод. Этим объясняется высокий коэффициент усиления ФЭУ.

Совокупность сцинтиллятора и ФЭУ образует сцинтилляционный детектор. Размеры сцинтиллятора могут быть весьма значительны. Это особенно характерно для жидких сцинтилляторов. Их размеры, а точнее, объем нередко составляет сотни литров и более, а просматривать его могут уже десятки и сотни ФЭУ. В практике регистрации радиоактивных излучений известны факты применения фотодиода вместо ФЭУ. Это позволяет получить достаточно компактный детектор такого типа. Для него был бы не нужен высоковольтный и стабильный источник питания, который необходим для работы ФЭУ. Однако в действительности применение данной структуры (фотодиод и сцинтиллятор) все еще сдерживается худшим отношением сигнала к шуму.

## 1.6. ДЕТЕКТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА И ИХ ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ

Основным параметром радиоактивного излучения в целом ряде случаев является его интенсивность. При такой ситуации детектор, позволяющий определить число событий в единицу времени, называют просто счетчиком. Данную характеристику источника излучения можно получить практически с помощью любого известного нам детекторного устройства. Известны газонаполненные счетчики (пропорциональные и Гейгера — Мюллера), а также сцинтилляционные и полупроводниковые счетчики, включая целый ряд других аналогичных устройств.

Не вызывает сомнений тот факт, что наряду с наиболее распространенными элементарными актами взаимодействия (ионизация и люминесценция) ядерные излучения можно регистрировать за счет целого ряда других видов взаимодействий. В их составе следует отметить эффект Вавилова — Черенкова, который связан со свечением вещества за счет световой волны, образующейся при движении в нем высокоэнергетической частицы.

Это свечение регистрируют с помощью фотоумножителя. Такая структура называется счетчиком Черенкова. Рабочим веществом в нем служат жидкости и твердые тела, которые должны быть прозрачными. С его помощью можно зарегистрировать, например, протоны с энергией более 400 МэВ. Следует заметить, что счетчик обладает высоким временным разрешением, не хуже  $10^{-9}$  с, которое определяется в основном только параметрами ФЭУ.

Уместно упомянуть ряд других структур, а именно: калориметрические, зарядовые, химические и трековые детекторы. Последние из них называются еще радиodefектоционные, так как регистрация частицы идет путем образования дефектов в специальных материалах в виде трека. По виду среды, реагирующей на радиоактивное излучение, они могут быть твердые, жидкие и газообразные. Более того, название каждого из них определяет то разнообразие эффектов, которые положены в основу их работы.

Обратим внимание на еще один, особый вид детекторов, получивший название позиционно-чувствительные детекторы. Наряду с регистрацией ядерного излучения и его основных параметров (интенсивность, энергия и т. п.) они дают информацию о координате поступления частиц в детектор. Их еще называют координатно-чувствительные детекторы, которые облегчают измерение угловых распределений продуктов ядерных взаимодействий. Они тоже используют элементарные акты взаимодействия ядерного излучения со средой (ионизация и люминесценция). Их применение повышает эффективность работы магнитных спектрометров, успешно решая многие проблемы физики высоких энергий.

### 1.7. ИЗУЧЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Основой техники измерений в экспериментальных методах ядерной физики служат целые группы специальных электронных средств. Для каждого эксперимента их обычно объединяют в особую структуру, которую называют измерительной системой. *Измерительная система* — це-леобусловленная совокупность электронных средств, предназначенных для получения информации о процессах или объектах посредством измерений требуемых параметров, накопления результатов и получаемых данных, их обработки и представления в установленной форме.

В измерении параметров ядерных превращений применяется весьма внушительный объем различной электронной техники. Используется практически весь арсенал методов линейной и нелинейной обработки сигналов — это усиление, селекция, т. е. отбор по времени и амплитуде, преобразование в код, счет событий, накопление и представление данных, их обработка и хранение.

Состав электронных средств зависит и определяется в основном кругом задач и объемом данных, которые необходимы для достижения поставленной цели. Именно эти аспекты в измерении радиоактивных излучений служат

критерием целесообразности и зависят прежде всего от перечня регистрируемых параметров. Фиксируемые параметры (амплитуда, время, угол разлета, интенсивность и т. п.) определяют и устанавливают, в свою очередь, характер и вид проводимых измерений.

Не обсуждая на данном этапе подробно варианты применения электронных средств в практике ядерно-физического эксперимента, отметим базовые виды и версии осуществления измерений. В первую очередь назовем счетные методы и технику их реализации. Как показывает практика измерений, в составе систем накопления и обработки данных присутствует несколько счетных каналов. В сложных экспериментах их число возрастает до нескольких десятков и более. В решении широкого круга различных измерительных задач в ядерной физике и технике далеко не последнее место отводится амплитудному анализу и технике его обеспечения.

Достаточно широко используется временной анализ, где регистрируется распределение интервалов времени. В качестве специфики и особенности применения такого анализа нужно отметить два направления, обусловленные областью измерений. Одна связана с техникой измерения интервалов времени микросекундного диапазона. Другая использует в измерениях электронные средства и технику наносекундного диапазона.

Отметим характерные особенности измерений в ядерной физике:

- случайный характер поступления событий;
- существенный уровень помех по шинам питания, заземления при передаче сигналов и т. д.;
- значительная протяженность кабельных линий транспортировки детекторных сигналов;
- присутствие и наличие фона, в ряде случаев весьма значительного уровня;
- высокая интенсивность поступления событий по измерительным каналам (нередко до  $10^8$ );
- просчеты событий и наложение сигналов детектора;
- необходимость энергетической калибровки шкалы измерительного канала;

- стабильность положения монолиний в регистрируемом спектре и ее обеспечение.

Данная специфика создает определенные трудности в измерении параметров ионизирующих излучений. Следует заметить, что это далеко не полный перечень вопросов и задач, с необходимостью решения которых сталкиваются специалисты. Однако даже такой весьма лимитированный список проблем дает возможность оценить совокупность основных требований, которые предъявляются экспериментальными методами ядерной физики к электронным средствам их обеспечения.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Ядерные превращения — основные формы, их продукты и характер проявления.
2. Источники радиоактивного излучения и их основные разновидности.
3. Базовые направления в изучении основных факторов ионизирующих излучений.
4. Негативный фактор, сопровождающий регистрацию ядерных излучений и суть его проявления.
5. Что такое фоновая составляющая и как можно ее исключить из результатов измерений?
6. Суть ионизационного метода регистрации радиационных излучений. В каких детекторах его используют?
7. Объясните, почему полупроводниковый детектор можно считать ионизационной камерой с твердым наполнителем?
8. Суть люминесценции. В каком детекторном устройстве она используется?
9. Структура сцинтилляционного детектора, его составные части и их назначение.
10. Какие виды детекторов еще используются в практике измерений?
11. Что такое измерительная система и ее вклад в изучение ионизирующих излучений?



## ГЛАВА 2

# ДЕТЕКТОРЫ И ИХ СИГНАЛЫ

Наличие в окружающей среде радиоактивного излучения можно обнаружить только с помощью специальных устройств. Они называются детекторами. Детектор ядерного излучения является техническим средством, преобразующим энергию радиоактивных излучений в другие ее формы, обеспечивая получение сигналов измерительной информации.

С метрологической точки зрения структура такого вида относится к категории первичного измерительного преобразователя. В различных областях науки и техники его именуют еще датчиком, индикатором, сенсором и т. д. Однако для ядерной физики при измерении характеристик и определении параметров ионизирующего излучения используется термин «детектор».

### 2.1. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРНЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ ВИДЫ

В любой ситуации детекторным устройством можно считать структуру, на вход которой поступают частицы, а на выходе ее появляются сигналы. Для разных детекторов характерна разнообразная форма выходных сигналов в виде импульсов тока, вспышек света, пузырьков пара, капелек жидкости и т. п. Развитие и совершенствование

техники данного назначения играет существенную роль в расширении сферы применения ядерных технологий в различных областях промышленного производства.

Процесс преобразования в детекторах энергии ионизирующего излучения в сигналы носит информативный характер. Объем информации, который можно получить из анализа разных видов выходных детекторных сигналов, даже одной лишь электрической формы, имеет существенный разброс. Наибольший объем информации несет импульс тока, выделяемый в пропорциональных дискретных детекторах. В них одним из установленных фактов считают, что если детектор функционирует в линейном импульсном режиме, то потери частицей энергии всегда будут пропорциональны амплитуде выходного сигнала.

Дискретные непропорциональные детекторы уже не дают информации ни об энергии зарегистрированных частиц, ни об их виде. Они функционируют в нелинейном импульсном режиме. В этом случае почти полностью утрачена связь выходного импульса с потерями энергии зарегистрированной частицы. На выходе таких детекторов в основном выделяются идентичные сигналы фиксированной формы и амплитуды.

С помощью аналоговых, работающих в токовом режиме детекторов, как считают некоторые специалисты, обеспечивается весьма небольшой объем информации о параметрах и характере излучения. При этом выходной сигнал, непрерывный по форме, усреднен по времени, и его изменения обычно связаны просто с увеличением числа частиц, поступающих в детектор. Именно такая ситуация характерна для непрерывного режима работы детектора, который еще известен как токовый режим. Однако данный параметр нередко трансформируют в цифровой код с помощью преобразования «ток — частота». Это дает возможность достаточно эффективно контролировать состояние физической установки и управлять ее работой.

По виду выходного сигнала вся совокупность детекторов, фиксирующих радиоактивное излучение, разграничивается на три основные группы. К одной из них относятся детекторы, для которых характерен пропорциональный

линейно-импульсный режим работы. В противоположность ей другая группа детекторов функционирует в непропорциональном нелинейном импульсном режиме. Наконец, для последней группы детекторов характерен непрерывный по форме, т. е. токовый, режим работы.

## 2.2. ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМА РАБОТЫ ДЕТЕКТОРОВ

Необходимо посмотреть и понять, какие же параметры излучений можно зафиксировать каждой из этих детекторных групп? Прежде всего все они дают информацию о наличии радиоактивного излучения, а значит, однозначно предупреждают об опасности. С их помощью также можно получить информацию об интенсивности излучения. Правда, последняя группа выдает ее с некоторым запаздыванием, но других возможностей, по всей видимости, у нее нет. Запаздывание связано с установлением нового уровня тока при изменении интенсивности излучения.

Две другие группы дают более весомые результаты. В самом деле, с помощью второй группы, помимо наличия излучения и его интенсивности, можно получить пространственную и временную информацию. Это позволяет по крайней мере определить момент времени поступления частицы в детектор, а также обнаружить местонахождение источника излучения. Поиск источника упрощается, если детектор и система регистрации транспортабельны.

Однако более мощным потенциалом обладает первая группа. Помимо упомянутых выше возможностей, с ее помощью можно получить также информацию об энергии частицы, ее виде и т. п. Это стало возможно благодаря практически линейной зависимости выходной амплитуды сигнала детектора от потери в нем энергии частицей. Кроме того, следует отметить тенденцию роста объема информации, которая обусловлена возможностью применения более эффективных методов обработки детекторных сигналов.

Действительно, если детектор функционирует в пропорциональном линейно-импульсном режиме, то его выходной сигнал можно реализовать для получения информации разной формы. Предоставляется весьма широкий набор вариантов использования параметров сигнала. Можно использовать амплитуду сигнала, время его появления, форму сигнала, нарастание его фронта, динамику спада сигнала и т. п. Степень учета таких факторов определяется в первую очередь целями эксперимента и уровнем поставленных и решаемых задач. Не вызывает сомнений факт, что чем сложнее эксперимент, тем большее число параметров требуется учитывать. В таком случае наблюдается существенный рост применяемых средств электронной техники.

### 2.3. НАРУШЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ В ДЕТЕКТОРЕ

Следует обратить внимание на нарушение пропорциональности в работе детектора при линейно-импульсном режиме. Такие нарушения связывают с неопределенностями на различных стадиях преобразования «энергия — амплитуда». Первая ее фаза относится к процессам, происходящим в самом веществе детектора. Вторая фаза характерна для этапа получения и формирования импульса тока. Его амплитуда пропорциональна заряду, который выделился на выходе детектора.

Отметим некоторые из особенностей этих процессов. В детекторе имеет место ряд факторов, которые обуславливают неопределенности и нарушение пропорциональности. Среди них фрагментарная, неполная потеря энергии частицей материала детектора, неоднородность его рабочего объема, статистический характер взаимодействия, передачи и преобразования энергии. Здесь же наблюдаются флуктуации и нестабильность параметров детектора, связанные с изменениями температуры, напряжения питания и т. п. В каждом виде детектора преобладает

тот или иной аспект. Зная это и выполняя мероприятия по их нейтрализации, можно в значительной мере повысить точность измерений параметров излучения.

Флуктуации заряда, возникающие в объеме детектора, ведут к неоднозначности его преобразования и выделения в виде амплитуды сигнала. Для измерения величины заряда интегрируют ток на его выходе. Полученная величина тока или напряжения будет мерой заряда, а значит, и мерой энергии, потерянной частицей в объеме детектора. Наряду с изменениями тока, влияющими на точность выделения амплитуды сигналов, необходимо учитывать и вклад различных шумовых составляющих, которые обуславливают искажение получаемых результатов измерений.

Следует заметить, что для оптимального выделения сигнала, как показывает анализ, необходимо решать весьма противоречивые задачи. Для снижения наложений длительность выходных импульсов необходимо уменьшить. С другой стороны, для полноты сбора заряда и снижения вклада некоторых шумовых составляющих длительность выходных сигналов следует увеличить, обеспечивая таким образом более полновесный сбор заряда. Неполное его собиране приводит к нарушению пропорциональности между зарядом и амплитудой сигнала. Кроме того, неполный сбор носителей заряда уменьшает амплитуду и ухудшает отношение сигнал — шум.

## 2.4. ОЦЕНКА СИГНАЛОВ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Регистрация ядерных излучений связана, как уже отмечалось, с образованием пар носителей заряда. Различные виды детекторных устройств в существенной мере различаются по уровню потерь энергии на образование пары электрон — ион (газонаполненные камеры, пропорциональные счетчики и т. п.) или электрон — дырка (полупроводниковые детекторы). Затраты энергии на обра-

зование одной пары носителей заряда в среднем составляют:

- полупроводниковые детекторы (~ 3 эВ);
- газонаполненные детекторы (~ 30 эВ);
- сцинтилляционные детекторы (~ 300 эВ и более).

Представленные параметры в значительной мере упрощают сравнение детекторных устройств между собой. Нетрудно увидеть главное преимущество полупроводниковых детекторов в точности измерения энергии ядерных излучений. Они в 10 раз лучше газонаполненных и почти в 100 раз точнее сцинтилляционных детекторов.

Для ионизационных детекторов (газонаполненных или полупроводниковых) можно считать, что заряд  $Q$ , образованный частицей, попавшей в детектор, равен

$$Q = q_{\text{э}} \cdot \frac{E}{\hat{w}},$$

где  $q_{\text{э}}$  — заряд электрона, равный  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $E$  — энергия частицы, потерянная в детекторе (в электронвольтах);  $\hat{w}$  — средняя энергия образования пары носителей заряда.

Амплитуда  $A$  сигнала на нагрузке  $R_{\text{н}}$  и эквивалентной емкости  $C_{\text{ЭКВ}}$ , подключенной параллельно резистору  $R_{\text{н}}$ , в режиме полного сбора носителей заряда будет равна

$$A = \left( \frac{1}{C_{\text{ЭКВ}}} \right) \cdot \int_0^{\infty} i(t) \cdot dt = \frac{Q}{C_{\text{ЭКВ}}} = q_{\text{э}} \cdot \frac{E}{\hat{w} \cdot C_{\text{ЭКВ}}},$$

где  $Q$  — заряд, собранный в детекторе, в кулонах;  $C_{\text{ЭКВ}}$  — совокупная емкость элементов цепи, включенных на выходе детектора, т. е. эквивалентная ее емкость в фарадах.

Итак, ток детектора  $i_{\text{д}}$  определится как

$$i_{\text{д}} = Q/t_i,$$

где  $t_i$  — время сбирания заряда, с.

Используя эти положения, оценим и сравним амплитуды сигналов, которые можно получить на выходе основных детекторов. Вначале обратимся к одному из самых первых и наиболее распространенных газовых детекторов,

широко применяемых на заре исследований ядерных превращений, — ионизационной камере.

Характерно, что в ней при регистрации частицы с энергией в 1 МэВ образуется заряд  $\sim 5 \cdot 10^{-15}$  Кл. Амплитуда тока при сборе электронной его составляющей за время  $1 \cdot 10^{-6}$  с, т. е. за одну микросекунду, достигает  $5 \cdot 10^{-9}$  А. При эквивалентной емкости входной цепи  $C_{\text{ЭКВ}} \approx 50$  пФ амплитуда выходного сигнала с этого детектора составит  $\sim 1 \cdot 10^{-4}$  В, т. е. около 0,1 милливольт. Это весьма невысокая величина параметра, которая получена на выходе ионизационной камеры. В таком случае ее сигналы без усиления вряд ли можно использовать в дальнейших процессах их обработки.

## 2.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ И ОЦЕНКА ИХ СИГНАЛОВ

Сначала обратимся к полупроводниковому детектору и сосредоточим внимание на его параметрах. Допустим, имеется детектор небольшого размера, предназначенный для регистрации рентгеновского излучения или заряженных частиц малой энергии. Емкость его находится в пределах единиц пикофарад. Время сбора носителей зарядов составляет  $\sim 10^{-8}$  с. Рентгеновский квант с энергией 10 кэВ дает заряд величиной  $\sim 5,3 \cdot 10^{-16}$  Кл. При этом ток не будет превышать значение  $\sim 5 \cdot 10^{-8}$  А, что обеспечит на емкости детектора в 1 пФ сигнал, амплитуда которого будет  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  В, т. е. около 0,5 мВ.

Для регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий от единиц килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт необходим полупроводниковый детектор большего размера. Его емкость будет составлять несколько десятков пикофарад. Заряд в нем соберется за время  $\sim 1 \cdot 10^{-7}$  с. При регистрации им частицы с энергией 1 МэВ получим заряд величиной  $\sim 5,3 \cdot 10^{-14}$  Кл. Ток в этой ситуации будет  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  А, что обеспечит на емкости  $C_{\text{ЭКВ}} \approx 100$  пФ сигнал с амплитудой  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  В, т. е. тоже  $\sim 0,5$  мВ.

В заключение рассмотрим еще одну разновидность детекторных устройств, известную как сцинтилляционный счетчик, состоящий из кристалла NaJ(Tl) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Допустим, ФЭУ имеет коэффициент усиления  $M = 10^6$ . При регистрации гамма-квантов амплитуду сигнала на выходе ФЭУ можно оценить соотношением

$$A = M \cdot E \cdot \frac{q_{\text{Э}}}{\hat{\omega} \cdot C_{\text{ЭКВ}}},$$

где  $M$  — коэффициент усиления ФЭУ;  $E$  — энергия гамма-кванта или частицы в электронвольтах;  $q_{\text{Э}}$  — заряд электрона;  $\hat{\omega}$  — средняя энергия, расходуемая на генерацию сцинтилляционной вспышки;  $C_{\text{ЭКВ}}$  — эквивалентная емкость входной цепи.

Если  $C_{\text{ЭКВ}} = 20$  пФ, то при  $E = 1$  МэВ амплитуда на выходе данного детектора будет составлять  $\sim 2$  В.

Итак, сцинтилляционный детектор является единственным из всего разнообразия устройств детектирования, выходной сигнал которого можно обрабатывать и использовать без усиления. Детектор не обладает высоким энергетическим разрешением при амплитудном анализе, но его широко применяют для временного анализа. Временное разрешение, получаемое сцинтилляционным детектором, остается вне конкуренции по отношению к остальным детекторам. Более того, его можно использовать в токовом режиме.

## 2.6. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ

Выполнена оценка амплитуды сигналов, возникающей на выходе основных детекторных устройств, при воздействии на них ядерного излучения. Получены результаты, которые дают весьма полезную и важную информацию, позволяющую судить о характере и параметрах такого излучения. Прежде всего следует отметить, что амплитуда

выходных сигналов любого из детекторов независимо от его вида практически не различается. Более того, без усиления использовать такие сигналы невозможно. Исключение может составить лишь сцинтилляционный детектор. В таком случае необходимо сделать следующие довольно-таки принципиальные выводы.

1. Амплитуда выходного сигнала каждого из детекторов, за исключением, может быть, лишь сцинтилляционного, недостаточна для корректного функционирования различных формирующих электронных устройств и схем.

2. Хотя детекторы различаются по принципу действия, все они выдают сравнительно «слабые» сигналы, которые необходимо усиливать, а в ряде случаев и формировать по амплитуде и длительности.

3. Совокупная емкость элементов цепи  $C_{ЭКВ}$ , включенная на выходе детектора, т. е. эквивалентная ее емкость, в существенной мере влияет на амплитуду сигнала, выделяемого на нагрузке  $R_H$ .

4. Поскольку практически у каждого из детекторных устройств выходные сигналы необходимо усиливать, то структура применяемых устройств усиления должна учитывать специфические особенности каждого детектора.

5. Амплитудно-частотные и временные характеристики усилительных устройств и схем определяются в основном временем сбора носителей заряда.

6. Подключаемые к детектору и используемые устройства усиления не должны способствовать росту шумовой составляющей детекторного сигнала.

В дальнейшем эти замечания и доводы необходимо учитывать при работе с конкретными детекторными устройствами. В то же время важно понять, что это весьма неполный перечень проблем, с которыми придется иметь дело при выделении информации о параметрах ядерных взаимодействий с помощью детекторов. Нерегулярный, случайный характер поступления детекторных сигналов будет тоже создавать дополнительные проблемы их регистрации, вызываемые разными вариантами наложений таких сигналов.

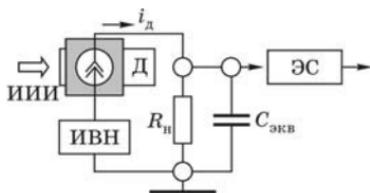
## 2.7. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДЕТЕКТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Информация, получаемая с детектора ионизирующего излучения в виде сигнала, обусловлена энергетическими потерями частиц, попавшими в него. Такие утраты энергии связаны с образованием в материале детектора носителей заряда. Для их перемещения и сбора необходимо обеспечить электрическое поле, которое создает источник питания высокого напряжения. Создаваемая им напряженность электрического поля перемещает носители зарядов в среде детектора к его выводам, наводя во внешней электрической цепи ток.

Детектор включен в цепь последовательно с источником высокого напряжения ИВН и сопротивлением нагрузки  $R_H$  (рис. 1). Параллельно резистору подключена эквивалентная емкость  $C_{ЭКВ}$ . Необходимо отметить, что сопротивление внешней цепи, а в нашем случае это  $R_H$ , существенно меньше внутреннего сопротивления детектора  $R_D$ , т. е.  $R_D \gg R_H$ .

При такой ситуации с полным основанием можно считать, что изменение величины нагрузки практически не влияет на ток, протекающий в данной цепи. Из чего можно заключить, что для внешней электрической цепи детектор необходимо рассматривать как источник тока, обладающий большим внутренним сопротивлением. При этом детектор считают генератором тока, создающим токовый сигнал во внешней цепи.

На сопротивлении нагрузки  $R_H$  в течение длительности импульса тока  $\tau_i$  выделяется сигнал. Величина его амплитуды, форма, длительность и другие параметры сигнала определяются главным образом процессами, происходящими в материале детектора. В силу этого электрическую



**Рис. 1**  
Типовая схема включения  
детектора:

Д — детектор; ИВН — источник высокого напряжения; ИИИ — источник ионизирующего излучения; ЭС — электронная схема.

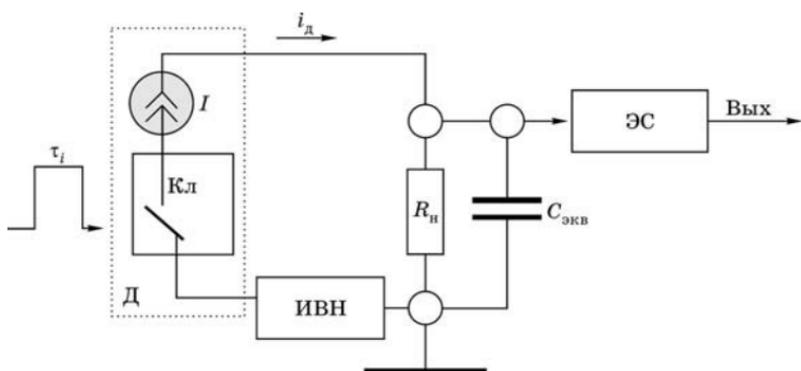


Рис. 2

Эквивалентная схема замещения детектора:

Д — детектор; ИВН — источник высокого напряжения; Кл — ключ; ЭС — электронная схема.

эквивалентную схему замещения детектора можно представить в виде ключа Кл и источника тока  $I$ , которые соединены последовательно (рис. 2).

Данную схему можно использовать при анализе процессов выделения, формирования и передачи сигналов потенциально от любого из детекторных устройств. Ток детектора  $i_d$  через ключ Кл, замыкаемый на промежуток времени  $\tau_i$ , равный длительности импульса тока, поступает во внешнюю цепь, подключенную к детектору. Цепь состоит из резистора нагрузки  $R_n$  и эквивалентной емкости  $C_{\text{ЭКВ}}$ , подсоединенной параллельно данному резистору.

В свою очередь, эквивалентная емкость  $C_{\text{ЭКВ}}$ , которую нередко отождествляют и представляют в виде входной емкости подключенной последующей схемы, обусловлена суммой следующих емкостных компонентов:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C_{\text{Д}} + C_{\text{М}} + C_{\text{П}},$$

где  $C_{\text{Д}}$  — емкость детектора;  $C_{\text{М}}$  — емкость монтажа детектора и электронной схемы;  $C_{\text{П}}$  — паразитная емкость всех элементов (резисторов, конденсаторов и т. п.) схемы.

Действительно, эта емкость вместе с сопротивлением нагрузки образует интегрирующую  $RC$ -цепочку. Конденсатор, находящийся в ее составе, заряжается импульсом

тока детектора. Постоянная времени  $\tau$  для такой цепочки будет равна

$$\tau = R_H \cdot C_{\text{ЭКВ}}.$$

Нетрудно понять, что от параметров данной интегрирующей  $RC$ -цепочки зависит ряд принципиальных аспектов. Прежде всего ее величина в существенной мере обуславливает точность измерения энергии зарегистрированной детектором частицы. Данный аспект имеет первостепенное значение для амплитудного анализа. С другой стороны, точность в определении момента регистрации детектором частицы крайне важна для временного анализа.

## 2.8. ФАКТОР ВРЕМЕНИ В ПАРАМЕТРАХ ВХОДНОЙ ЦЕПИ, ПОДКЛЮЧЕННОЙ К ДЕТЕКТОРУ

Во всех процессах, сопровождающих регистрацию ионизирующих излучений, проявляется фактор времени. Он связан с моментом поступления частицы в детектор, временем взаимодействия с его материалом, этапом собирания носителей заряда, характером изменения токовых составляющих и т. п. Во всяком случае, временные аспекты призваны играть весьма значимую роль в процессах оптимального выделения детекторных сигналов. Данный момент крайне важен, независимо от целевого использования всего разнообразия детекторных структур.

Если обратиться к эквивалентной схеме замещения детектора, которая представлена на рисунке 2, то нетрудно понять, что  $C_{\text{ЭКВ}}$  можно считать входной емкостью  $C_{\text{ВХ}}$ , которая обусловлена последующей электронной схемой. Ее постоянная времени  $\tau_{\text{ВХ}}$  как элементарной интегрирующей цепочки будет равна

$$\tau_{\text{ВХ}} = R_H \cdot C_{\text{ВХ}}.$$

Важно отметить, что величина  $\tau_{\text{ВХ}}$ , называемая постоянной входной, является весьма весомым и значимым параметром. При всех ситуациях, связанных с получением

информации с детекторных устройств, данный параметр определяет прежде всего среднюю допустимую интенсивность поступающих событий, которая, естественно, должна быть зарегистрирована.

При необходимости выделения максимальной величины параметра на нагрузке, т. е. достижения наибольшего значения амплитуды сигнала, постоянную времени  $\tau_{\text{ВХ}}$  выбирают существенно больше длительности импульса тока  $\tau_i$ , т. е.  $\tau_{\text{ВХ}} \gg \tau_i$ . Такое соотношение обычно используется при регистрации результатов ядерных превращений с достаточно низкой интенсивностью (как правило, не более сотни импульсов в секунду).

В свою очередь, минимальная амплитуда сигнала будет получена, если постоянная времени  $\tau_{\text{ВХ}}$  выбрана из условия  $\tau_{\text{ВХ}} \ll \tau_i$ . При этом параметр  $\tau_{\text{ВХ}}$  устанавливают значительно меньше длительности импульса тока  $\tau_i$  детектора. Проблему решают существенным уменьшением номинала резистора нагрузки  $R_{\text{Н}}$  и по возможности снижением величины входной емкости  $C_{\text{ВХ}}$ . Иногда это может привести к снижению шумовой составляющей сигнала детектора, так как при его формировании используется всего лишь ток, связанный с быстрыми носителями заряда.

Таким примером может служить ионизационная камера, в которой возникший импульс тока образуется исключительно одними электронами. Данная величина постоянной времени  $\tau_{\text{ВХ}}$  используется при изучении параметров ионизирующих излучений высокой интенсивности. В отдельных случаях она может достигать вплоть до  $10^8$  импульсов в секунду. Между этими двумя крайними ситуациями выбора постоянной времени входной цепи весьма часто останавливаются на соотношении  $\tau_{\text{ВХ}} \approx \tau_i$ .

Данное значение временного параметра определяется, как правило, средней скоростью поступления сигналов с применяемого детекторного устройства. На практике такая величина постоянной времени обычно используется при решении задач спектрометрии, которые тесно связаны как с амплитудным, так и с временным анализом. Более того, выбирая и устанавливая величину нагрузки  $R_{\text{Н}}$ , стремятся обеспечить минимальное значение емкости  $C_{\text{ВХ}}$ .

Средняя интенсивность поступления событий при такой ситуации должна находиться в пределах нескольких тысяч импульсов в секунду.

Представленные рекомендации по выбору постоянной времени интегрирования лишней раз демонстрируют необходимость и важность учета временного параметра при изучении и регистрации характеристик ядерных взаимодействий. С этой реальностью приходится считаться, независимо от вида детекторного устройства, применяемого в измерениях. Обращает на себя внимание весомость проблемы обеспечения и получения минимальной величины входной емкости  $C_{вх}$ . В большинстве случаев, как показывает практика, ее решают комплексно. Однако основополагающими критериями таких решений были и остаются рациональная конструкция детектора и оптимальное размещение элементов его электронной схемы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое устройство служит для обнаружения радиоактивного излучения?
2. Что представляет собой детектор с точки зрения измерительной техники?
3. Назовите основные направления в разделении детекторов по виду выходных сигналов.
4. Какая группа детекторов дает наибольший объем информации и за счет чего это происходит?
5. Назовите факторы, ведущие к нарушению режима пропорциональности работы детектора.
6. Приведите средний уровень затрат энергии на образование пары носителей заряда основных видов детекторных устройств.
7. Преимущество полупроводникового детектора. Чем оно обусловлено?
8. Что можно сказать о величине выходного сигнала газонаполненного детектора в виде ионизационной камеры?
9. Сравните выходные сигналы с ионизационной камеры, полупроводникового детектора и сцинтилляционного счетчика.
10. Какими достоинствами обладает сцинтилляционный счетчик по сравнению с другими детекторами?
11. Для чего предназначен источник высокого напряжения в схеме включения детектора?

## ЛИНЕЙНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРОВ

Сигналы практически каждого из детекторов ядерного излучения, за исключением лишь сцинтилляционного, как показал анализ, в дальнейшем использовать невозможно. Их необходимо усиливать, так как величина сигнала, т. е. его амплитуда, недостаточна для работы последующих электронных схем. При этом неважно, линейные или нелинейные методы обработки сигналов будут использованы в электронных структурах.

Следует заметить, что оба метода занимают ключевые позиции в решении задач, связанных с регистрацией ядерных излучений. Линейная (аналоговая) форма обработки сигналов обуславливает сохранение линейной зависимости и связи между входом и выходом устройства. Нелинейная (дискретная) форма обработки сигналов ведет к утрате такой связи между его входом и выходом. В этом случае выходной сигнал фиксирует лишь факт выполнения принятого или установленного условия.

### 3.1. СВОЕОБРАЗИЕ УСИЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ

Наиболее распространенным видом линейной обработки сигналов было и остается их усиление. Оно определяется отношением амплитуд выходного сигнала к входному и называется коэффициентом усиления. В спектро-

метрии его величина составляет несколько тысяч и более. Важно обеспечить ему высокую линейность в широком частотном диапазоне. Регистрация излучений низких энергий затруднена, так как амплитуда сигналов детектора соизмерима с уровнем его шумов, что создает еще ряд проблем.

Другим негативным моментом принято считать воздействие и регистрацию высокоэнергетических частиц фонового излучения. Это ведет к образованию в детекторе сигналов экстремальных параметров (большая амплитуда и длительность). Они вызывают перегрузку устройств усиления, увеличивая нелинейные искажения выходных сигналов. Регистрация таких частиц нередко ведет даже к временной утрате (т. е. потере) ими усилительных свойств. Восстановление работоспособности после перегрузки должно происходить за минимально возможное время.

Обе проблемы, с одной стороны, минимальный уровень входного сигнала, а с другой — его экстремальное значение, требуют большого динамического диапазона усиления. При линейной обработке детекторных сигналов это создает ряд дополнительных и весьма обременительных проблем. Более того, они усугубляются целым набором аспектов, весьма характерных для регистрации ионизирующих излучений, о чем уже упоминалось ранее.

Нерегулярный, случайный характер их поступления вызывает флуктуации нулевого выходного уровня усилительного устройства. Это ведет к погрешностям измерений и проявляется в виде искажений регистрируемого энергетического спектра излучений. Искажения спектра наблюдаются также при наложениях выходных сигналов в устройствах усиления. Последний момент весьма характерен при высокой интенсивности излучения, регистрируемого детектором.

Для уменьшения уровня наводок и помех, получения высокого разрешения, снижения степени затухания сигнала, а также получения высокого отношения сигнал/шум и т. д. усилитель с детектором соединяют обычно радиочастотным коаксиальным кабелем, например типа РК-50. Однако его емкость, равная 100 пФ/м, существенно влияет

на амплитуду сигнала, выделяемого с детектора. Полупроводниковый детектор емкостью 5–10 пФ уменьшает амплитуду сигнала в 1,5 раза, если его соединить с усилителем кабелем длиной всего лишь 30 см.

Также помним, что детектор располагается в измерительном зале ускорителя или реактора, где радиационная обстановка представляет опасность для физика, ведущего измерения. В ходе измерений весьма часто возникает необходимость скорректировать параметры регистрации: увеличить или уменьшить коэффициент усиления, изменить полосу пропускания, снижая или увеличивая постоянные дифференцирования или интегрирования в усилителе. При таких ситуациях в ходе эксперимента необходимо оперативное вмешательство в измерительный процесс, а значит, требуется доступ к органам управления параметрами измерений.

Радикальным решением в данном случае будет разделение усилительного устройства на две части. Одна из них, с явным минимумом органов управления, размещается в зале в непосредственной близости от детектора и называется предусилителем. Другая его часть располагается за биологической защитой на значительном расстоянии от детектора. Она содержит необходимый набор органов изменения и установки его параметров и относится к категории основного усилителя. Структура измерительного канала в таком случае имеет вид, представленный на рисунке 3.

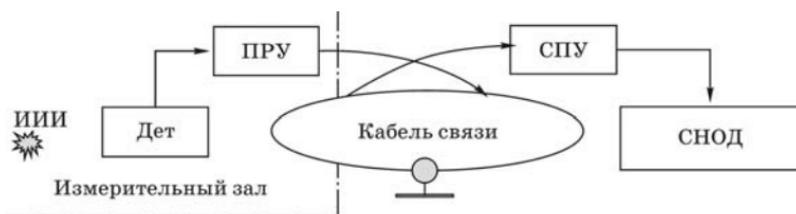


Рис. 3

Структура измерительного канала:

Дет — детектор; ИИИ — источник ионизирующего излучения; ПРУ — предусилитель; СПУ — спектрометрический усилитель; СНОД — система накопления и обработки данных.

Первую часть усилительной структуры измерительного канала определяют следующим образом. Предусилитель — это функциональный электронный модуль, размещаемый между детектором и основным усилителем, обеспечивающий начальное, предварительное усиление сигналов для последующей их передачи по кабелю связи. Обычно используют коаксиальный радиочастотный кабель (типа РК), и его длина нередко достигает сотни метров.

Другая часть, которую специалисты стали называть спектрометрическим усилителем, считается основной. Это особая разновидность линейных, широкополосных, с достаточно высокой стабильностью параметров усилительных структур. Она широко применяется для прецизионных амплитудных измерениях характеристик ядерного излучения. Их специфические особенности и основные параметры будут рассмотрены далее.

### 3.2. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ И ЕГО РАЗНОВИДНОСТИ

Предусилитель является одной из основных разновидностей входных устройств с исключительно линейной характеристикой преобразования детекторных сигналов. Его главной отличительной особенностью служит высокая линейность коэффициента усиления, а также долговременная его стабильность. Более того, значение этого параметра не должно меняться или зависеть от увеличения средней частоты поступления сигналов. Устройству данного типа необходимо иметь хорошее отношение сигналов к шуму. Такая структура не должна вносить искажений в усиление сигналов с крутым фронтом и относительно медленным их спадом. На параметры выходных сигналов не должны влиять ни случайный характер их поступления, ни спорадическое изменение их амплитуды.

Вместе с тем электронное средство такого вида можно отнести к разряду устройств, которые осуществляют согласование импедансов. Действительно, необходимо увязать высокое сопротивление детектора как генератора тока

и достаточно низкое входное сопротивление спектрометрического усилителя. Таким образом, предусилитель решает еще одну крайне важную проблему — обеспечение условий для корректного согласования и передачи сигнала детектора по кабелю связи с минимальными потерями.

Особенность этих электронных средств состоит в том, что практика их применения в эксперименте увязана, как правило, с видом входной величины. В этом качестве могут выступать ток, напряжение или заряд. Каждый из этих параметров будет определять вид предусилителя. Если это предусилитель напряжения, то выходной параметр  $U_{\text{ВЫХ}}$  будет пропорционален входному  $U_{\text{ВХ}}$ . Оба параметра являются напряжением, т. е.

$$U_{\text{ВЫХ}} = k_u \cdot U_{\text{ВХ}},$$

где  $k_u$  — коэффициент усиления по напряжению. В таком случае, как вытекает из анализа структур данного вида, его входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  много больше сопротивления источника сигнала  $R_{\text{ИСТ}}$ , т. е.  $R_{\text{ВХ}} \gg R_{\text{ИСТ}}$ . Выходное сопротивление устройства усиления  $R_{\text{ВЫХ}}$  много меньше сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н}}$ , т. е.  $R_{\text{ВЫХ}} \ll R_{\text{Н}}$ .

В случае если входным  $I_{\text{ВХ}}$  и выходным параметром  $I_{\text{ВЫХ}}$  является ток, то принято считать, что это предусилитель тока. Оба эти параметра связаны соотношением

$$I_{\text{ВЫХ}} = k_i \cdot I_{\text{ВХ}},$$

где  $k_i$  — коэффициент усиления по току. Для токового усилителя, как показывает анализ, его входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  всегда много меньше источника сигнала  $R_{\text{ИСТ}}$ , т. е.  $R_{\text{ВХ}} \ll R_{\text{ИСТ}}$ . В свою очередь, выходное сопротивление усилителя  $R_{\text{ВЫХ}}$  естественно будет много больше сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н}}$ , т. е.  $R_{\text{ВЫХ}} \gg R_{\text{Н}}$ .

Именно эти структуры усилительных устройств (до появления полупроводниковых детекторов) доминировали и благополучно решали вопросы усиления детекторных сигналов. Введение различных видов обратных связей в таких усилительных каскадах успешно и целенаправленно

обеспечивало приемлемую стабильность усиления в целом. Во всех детекторах нестабильности их емкости, приводящей к изменениям амплитуды детекторных сигналов, еще не были столь критичны. Однако, как показала практика применения полупроводниковых детекторов, их емкость в значительной мере определяется и зависит от приложенного напряжения, которое весьма тесно связано с их чувствительным объемом.

Проявление данного факта, связанного с такой зависимостью, крайне неблагоприятно отразилось на параметрах полупроводникового детектора. Вспомним, что в нем для образования пары носителей зарядов нужно всего  $\sim 3$  эВ потери энергии частицей. Такая высокая энергетическая чувствительность требует минимального уровня шумов в последующих электронных схемах. В данной ситуации эта важнейшая характеристика детектора стала, по сути дела, заложницей образовавшейся зависимости. Возникла острая необходимость в электронных схемах усиления, где такие негативные аспекты были бы просто нейтрализованы.

Решение этой проблемы было найдено в создании и использовании усилительной техники особой ориентации. В ее схемотехнических решениях приняли меры, исключаяющие влияние емкости детектора на величину выходного сигнала. Таким устройством стал зарядочувствительный предусилитель. Основу его входной части составляет схема предварительного усиления, которая охвачена отрицательной обратной связью по заряду.

В этом случае сигнал на выходе схемы не зависит от изменения емкости детектора, возникающего при изменениях напряжения его смещения. Входное сопротивление предусилителя  $R_{вх}$  много больше сопротивления  $R_{ист}$  источника сигнала, т. е.  $R_{вх} \gg R_{ист}$ . Выходное сопротивление устройства  $R_{вых}$  много меньше сопротивления нагрузки  $R_{н}$ , т. е.  $R_{вых} \ll R_{н}$ . В связи с расширением сферы применения таких устройств, по сравнению с предусилителями тока или напряжения, будет целесообразно рассмотреть его несколько подробнее.

### 3.3. ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ, СТРУКТУРА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

Основой зарядочувствительного предусилителя служит линейный усилитель с отрицательной обратной связью по заряду. Такая связь создается небольшим по величине конденсатором  $C_{oc}$  (несколько единиц пикофарад), который соединяет вход и выход усилителя (рис. 4). Амплитуда  $U_{вых}$  выходного сигнала при такой обратной связи определяется в основном зарядом  $Q$ , образованным в детекторе зарегистрированной частицей. Она равна  $U_{вых} \approx -Q/C_{oc}$  и не зависит от емкости детектора, а лишь определяется величиной емкости  $C_{oc}$  обратной связи, где знак «-» связан с видом этой связи.

Емкость обратной связи должна иметь хорошую стабильность и низкий ТКЕ (температурный коэффициент емкости). В предусилителе такого типа параллельно емкости  $C_{oc}$  подключается резистор  $R_{oc}$ . Он тоже создает обратную связь, но уже по постоянному току. Таким образом, резистор  $R_{oc}$  фактически является нагрузкой детектора и в значительной мере повышает стабильность работы зарядочувствительного предусилителя.

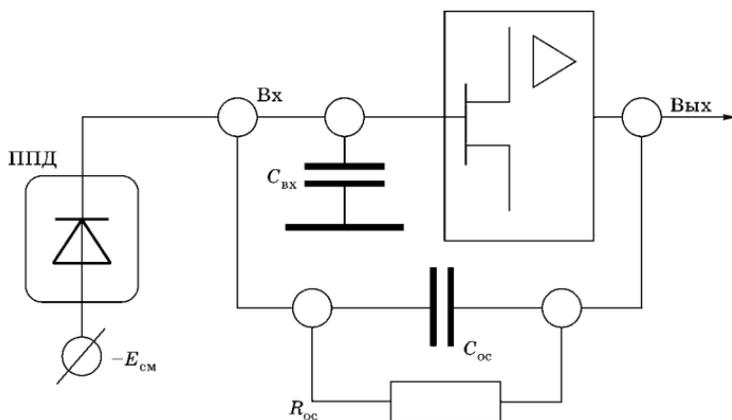


Рис. 4

Схема зарядочувствительного предусилителя (ЗЧП):

ППД — полупроводниковый детектор;  $C_{вх}$  — эквивалентная входная емкость, равная  $C_{вх} = (C_{д} + C_{вх.ус.})$ .

Именно этот резистор  $R_{oc}$  вместе с емкостью обратной связи  $C_{oc}$  определяет постоянную времени ( $\tau_{вх} = R_{oc}C_{oc}$ ) восстановления потенциала на входе зарядочувствительного предусилителя после регистрации детектором заряженной частицы. Характерно, что данный фактор нередко принимают во внимание, останавливаясь на выборе варианта предусилителя. Необходимо заметить, что представленная версия усилителя с конденсатором в цепи обратной связи образует классическую схему интегратора.

Для ознакомления с рядом особенностей зарядочувствительного предусилителя рассмотрим его типовую функциональную схему, представленную на рисунке 5. В составе такой схемы можно выделить усилительный каскад с элементами отрицательной обратной связи ( $R_{oc}$  и  $C_{oc}$ ) по заряду и входные цепи, подсоединенные к входам 1–3. Выход зарядочувствительной секции через схему компенсации полюса нулем СК подключен к двум выходным каскадам усиления  $E$  и  $T$ . Обе схемы этих каскадов являются линейными усилительными структурами, причем каждая из них должна выполнять определенные функции.

Один из них  $E$ , со ступенчато регулируемыи, т. е. коммутируемыи, коэффициентами усиления  $k_1$  и  $k_2$  (обычно  $k_1 = 10$ ;  $k_2 = 100$ ), выделяет выходной сигнал, амплитуда которого пропорциональна потерям частицами энергии в детекторе. Этот линейный выход (вых. 1) в дальнейшем соединяется с входом спектрометрического усилителя

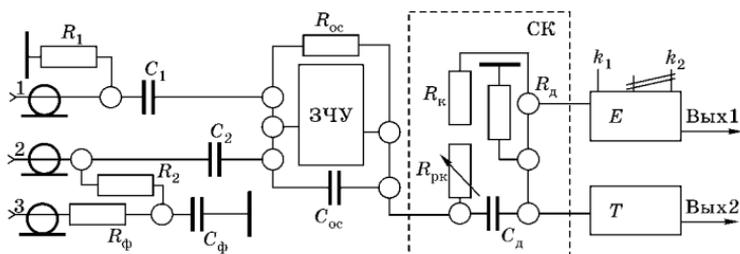


Рис. 5

Схема зарядочувствительного предусилителя:

$E$  — усилительный каскад, связанный с энергией; ЗЧУ — зарядочувствительный усилитель; СК — схема компенсации полюса нулем;  $C_d R_d$  — дифференцирующая цепочка;  $T$  — усилительный каскад, связанный со временем;  $R_{рк}$  — регулировка меры компенсации.

амплитудного измерительного тракта. Вариант использования ступенчатой регулировки усиления повышает гибкость управления коэффициентом усиления тракта, облегчая решение проблем амплитудного анализа.

Другой выходной каскад усиления  $T$  своими сигналами связан со временем, которое фиксирует момент попадания частиц в детектор. Его выход (вых. 2), ассоциируемый со временем, называется быстрым выходом предусилителя. Этот сигнал, тоже линейный, используется уже в логике отбора событий или при решении проблем временного анализа. Оба выхода предусилителя имеют небольшое выходное сопротивление ( $R_{\text{вых}} < 1 \text{ Ом}$ ) и работают главным образом на коаксиальные кабели связи значительной длины.

Их согласование осуществляется последовательными резисторами (на рис. 5 не показаны), которые включаются до выходных разъемов предусилителя. По величине они должны соответствовать и быть равны волновому сопротивлению кабеля связи. В таком случае, приобретая предусилитель, необходимо обратить внимание на его выходные разъемы, которые должны иметь волновое сопротивление, как и применяемые кабели связи (50, 75 или 93 Ом).

С выходными усилителями зарядочувствительный каскад соединяется через схему компенсации СК полюса нулем. Ею служит дифференцирующая цепочка  $C_d R_d$ , параллельно которой включены два последовательно подключенных резистора  $R_{\text{рк}}$  и  $R_{\text{к}}$ . Плавно изменяя величину одного



Рис. 6  
Форма сигнала со схемой компенсации и без нее

из них  $R_{\text{рк}}$ , добиваются, чтобы на входы обоих усилителей  $E$  и  $T$  поступали сигналы без выбросов противоположной полярности, что характерно для цепочек типа  $C_d R_d$  (рис. 6). Подбирая величину сопротивления  $R_{\text{рк}}$ , устраняют этот выброс, что

ведет к повышению энергетического разрешения. Его величина считается одним из самых главных параметров измерений. Она служит основным критерием качества амплитудного анализа.

Рассмотрим назначение каждого из входов данного предусилителя. На вход 1 обычно подается контрольный сигнал с амплитудой 1 В и фронтом 2–3 нс, имеющий достаточно длинный спад в несколько сот наносекунд. На емкости  $C_1 = 1$  пФ это будет эквивалентно 1 пКл/В, что создает условия для проверки функционирования измерительного канала и всех его составляющих. Резистор  $R_1$  (50 или 93 Ом) обеспечивает согласование входа для контрольного сигнала.

Вход 3 (высоковольтный разъем) служит для подачи напряжения смещения на детектор. Резистор  $R_\phi$  ( $R_\phi = 10$  МОм) и высоковольтная (до 3 кВ) емкость  $C_\phi$  ( $C_\phi = 3,3$ –10 нФ) образуют Г-образный сглаживающий RC-фильтр. С него через высокоомный резистор  $R_2$  и такой же разъем (вход 2) высокое напряжение с источника питания поступает на детектор. Параметры резистора  $R_2$  обычно лежат в пределах от 100 МОм до нескольких гигаом.

Несложно понять, что вход 2 в устройстве обеспечивает выполнение двух функций: с одной стороны, осуществляет прием детекторных сигналов, а с другой — служит для передачи высокого напряжения на детектор. В таком случае развязывающий конденсатор  $C_2$  тоже является высоковольтным, но небольшой емкости (единицы пикофарад) и передает сигналы детектора на зарядочувствительный каскад предусилителя. Разъем, подключенный к входу 2, является не только высоковольтным, но и высокочастотным, так как фронты входных сигналов достаточно незначительной длительности, равной нескольким наносекундам.

### 3.4.

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ И МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ РАБОТЫ С НИМИ

Предусилители этого вида получили широкое распространение и применение в практике эксперимента. Зарядочувствительную схему усиления можно использовать фактически с любым пропорциональным детектором: газонаполненным (ионизационная камера, пропорциональный

счетчик), сцинтилляционным или полупроводниковым. Входная цепь и каскад усиления с емкостью в петле обратной связи являются той структурой, где учитывается специфика и сфера применения данного предусилителя.

Именно эти факторы определили интерес целого ряда известных иностранных фирм ядерного приборостроения к разработке и организации производства такой электронной техники. Выпускается не менее десятка разновидностей этих усилителей, и номенклатура их растет. По крайней мере для полупроводниковых детекторов известны и существуют три варианта таких предусилителей: один для малых, тонких  $p-n$ -переходов, другой для больших со структурой типа  $p-i-n$  и, наконец, третий HP (high purity) Ge на основе сверхчистого германия.

Входным элементом всех вариантов зарядочувствительных каскадов в таких предусилителях обычно служит малошумящий, нередко специально отобранный, полевой транзистор. Именно этот транзистор и его параметры определяют главным образом шумовые характеристики предусилителя, а значит, и его предельное разрешение по энергии, которое может быть обеспечено данной структурой детектора. Как показывает практика, полевые транзисторы на входе таких каскадов усиления крайне чувствительны к перегрузкам, которые обусловлены главным образом входными сигналами значительной амплитуды.

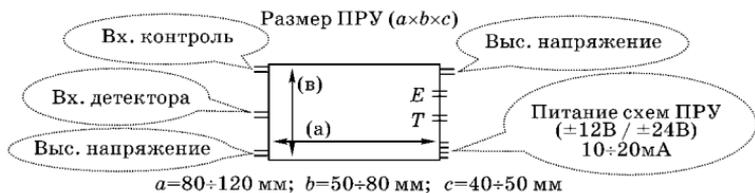
Это чревато тем, что такие сигналы создают условия и вызывают локальный перегрев перехода транзистора. Данное явление ведет к возникновению в транзисторе токов утечки, а также к их значительному росту. Примечательно, что ситуация не меняется, если даже причина давно исчезла. В таком случае говорят, что транзистор был «подогрет», а возникший эффект проявляется и остается в виде «непонятного» ухудшения разрешения. Следует заметить, что не меньшую опасность представляет мгновенное снятие или подача питания на детектор, а также короткое его замыкание или пробой. Результатом всех этих процессов является почти 100% -ная утрата работоспособности предусилителя, вызванная разрушением полевого транзистора на входе устройства.

Наряду с резистивно-емкостной обратной связью в зарядочувствительных каскадах используется еще и опто-электронная связь. Исключая резистор обратной связи как один из источников шумов и нестабильностей, в петлю обратной связи вводится светодиод. Его излучение воздействует на светочувствительную область входного полевого транзистора (затвор — канал), которая выполняет функцию резистора обратной связи.

Невзирая на многочисленные варианты предусилительных устройств такого типа, можно отметить их основные размеры. Они представлены на рисунке 7. Это типовые габариты и назначение основных разъемов, что позволяет получить общее представление о таких устройствах. Вход КОНТРОЛЬ используется также для подачи реперных сигналов, необходимых для стабилизации параметров спектрометрического тракта.

Важно отметить, что зарядочувствительный предусилитель, безусловно, относится к категории весьма «хрупких» электронных структур, которые требуют к себе предельно аккуратного и достаточно вдумчивого отношения. Все подключения, а также и отключения входных и выходных кабелей следует производить только лишь при выключенном питании и снятии высокого напряжения с детектора. После снятия высокого напряжения с детектора необходима пауза 2–3 мин перед выключением питания предусилителя.

Все коммутационные операции с кабелями связи, т. е. их отключение или подключение, выполнять, сделав



**Рис. 7**  
Ориентировочные габариты предусилителя  
и назначение его разъемов:

$E$  — выход, связанный с энергией, служит для подключения спектрометрического усилителя;  $T$  — выход, служащий для передачи временной отметки.

паузу от момента выключения питания предусилителя. Прежде чем прикоснуться к его корпусу, через резистор 100–300 кОм «разрядитесь», дотронувшись им до земляной шины, т. е. снимите с себя статическое напряжение. Подавать на детектор высокое напряжение, а также снимать его надо весьма плавно, без резких скачков. Скорость изменения напряжения не должна превышать 200 В/мин.

Все выдержки во времени связаны с большими номиналами ограничительных резисторов, т. е. их величинами, а также емкостями фильтров и наличием разделительных конденсаторов во входных цепях. Следует помнить, что любая коммутация без снятия всех напряжений с зарядочувствительного предусилителя ведет, как правило, к выходу его из строя, т. е. к утрате устройства. Восстановление его работоспособности — достаточно сложная задача, и достижение при этом высоких параметров будет весьма проблематично.

### 3.5. СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ — ОСНОВНОЕ ЗВЕНО АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА

Электронные средства данного назначения являются основой амплитудных измерительных каналов в составе спектрометров ионизирующего излучения. С их помощью регистрируется распределение детекторных сигналов в виде амплитудного спектра. Выделенный предусилителем сигнал детекторного устройства по кабельной линии связи передается и поступает на основной усилитель для последующего этапа его линейной обработки (см. рис. 3). Такая значимая операция выполняется устройствами, причисленными специалистами к особой категории усилителей. Она получила название спектрометрические усилители.

Такие электронные структуры относятся к основным устройствам усиления. Они ориентированы на решение широкого круга экспериментальных задач в ядерной физике, включая ее многочисленные смежные области. Важно заметить, что спектрометрические усилители не должны

зависеть от вида детекторных устройств, в составе измерительных каналов которых они используются. Данная индифферентность в первую очередь предполагает, что спектрометрический усилитель призван обеспечить надлежащий уровень параметров всех без исключения пропорциональных детекторов.

В этих детекторах, как известно, имеет место линейная зависимость амплитуды сигналов, которая получается в результате потери энергии частицами при их регистрации. Среди основных задач, решаемых с помощью данной разновидности электронной техники, необходимо выделить следующие:

- дальнейшее усиление сигнала в диапазоне 0–10 В;
- дополнительное формирование сигналов детектора;
- повышение и улучшение отношения сигнал/шум.

Индифферентность в определенной мере должна проявляться и к диапазону энергий регистрируемых частиц. Она обеспечивается и реализуется главным образом ступенчатой регулировкой усиления, за счет применения аттенюаторов, т. е. делителей напряжения на входе усилителя. Поскольку усилители данного вида являются по своей структуре многокаскадными, то при ослаблении входных сигналов создаются условия для снижения степени перегрузки его последних каскадов.

Однако при высокой степени усиления шум резисторов делителя напряжения вносит значительный вклад в общую шумовую составляющую канала регистрации. В дальнейшем такой делитель был исключен из измерительной цепи. Действительно, в последних моделях спектрометрических усилителей функцию аттенюатора выполняет уже операционный усилитель с дискретным характером изменения в нем обратной связи. Это позволило в значительной мере снизить шумовую составляющую измерительной цепи и повысить отношение сигнал/шум в электронных структурах данного вида.

Входные цепи спектрометрического усилителя, как и первый каскад его усиления, должны быть малощумящими, чтобы не снижать и не ухудшать энергетическое разрешение. Это крайне важно, так как коэффициент усиления

в нем регулируется в достаточно широких пределах: от 1 и почти до  $10^4$ . Вместе с тем каскадам усиления нужно иметь весьма существенный динамический диапазон. Кроме того, эти каскады должны отличаться весьма «корректным» поведением во время перегрузок. В таких ситуациях усилитель должен обладать малым временем восстановления своей работоспособности.

Более того, в режимах перегрузки данное электронное средство должно иметь минимальные изменения своего исходного нулевого уровня и обладать при этом способностью достаточно быстрого его восстановления. Необходимо отметить крайне жесткие требования, которые предъявляются и накладываются на линейность и долговременную стабильность коэффициента усиления. Высокое разрешение аналого-цифровых преобразователей (12–14 двоичных разрядов) в системах накопления и обработки данных (см. рис. 3) требует таких же значений их параметров. Необходимо обеспечить линейность лучше, чем  $1 \cdot 10^{-4}$ , а стабильность — не хуже  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Наряду с представленными и рассмотренными некоторыми из параметров следует обратить внимание на тот факт, что усилители этого вида должны обладать широкой полосой пропускания. Это необходимо для корректного воспроизведения сигналов детектора во всем диапазоне частот. В ряде случаев их верхний диапазон доходит до  $1 \cdot 10^9$  Гц. Полоса пропускания усилителей должна регулироваться, чтобы имелась возможность оптимизации отношения сигнал/шум. Характерно, что оптимизация полосы пропускания обеспечивается схемами линейного формирования.

Само собой разумеется, что нельзя упускать из виду требование независимости усиления в широких пределах изменения интенсивности поступления событий по входу усилителя. Диапазон изменений интенсивности лежит в пределах от нескольких герц до десятков мегагерц. Случайный характер появления событий с детекторных устройств, что является, по сути, главной формой их проявления, еще больше усугубляет ситуацию и заведомо создает опреде-

ленные трудности при их регистрации. Данные обстоятельства необходимо учитывать, определяя состав электронных средств при компоновке измерительных каналов спектрометров ядерного излучения.

### 3.6. ЛИНЕЙНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ПРИ УСИЛЕНИИ

В основу линейного формирования положены схемы, состоящие из совокупности резистивных и реактивных элементов электрических цепей. Наиболее распространенными из них стали  $RC$ - и  $CR$ -цепочки. Первая называется интегрирующей цепочкой, а вторая — дифференцирующей цепочкой. Обе цепочки относятся к категории пассивных элементов или звеньев электронных схем.

Дифференцирующую  $C_d R_d$ -цепочку, изображенную на рисунке 8а, можно рассматривать в общем случае как фильтр, ослабляющий компоненту низкочастотного воздействия и пропускающий только его высокочастотную составляющую. Одним из таких типовых примеров может служить разделительный конденсатор, изолирующий усилительный каскад (допустим, на биполярном транзисторе) по постоянному току. Соотношение параметров между входом и выходом данной цепочки показывает, что основной ее характеристикой является постоянная времени  $\tau$ . Она равна  $\tau = RC$  и дает величину спада исходного сигнала по экспоненте до уровня  $0,37A_0$ .

В свою очередь, интегрирующую  $R_n C_n$ -цепочку (рис. 8б) можно квалифицировать как фильтр, ослабляющий высокочастотную компоненту. Фильтр данного вида практи-

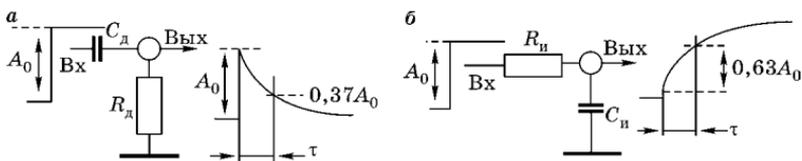


Рис. 8  
Дифференцирующая (а) и интегрирующая (б) цепочки

чески не затрагивает низкочастотную компоненту сигнала. Примером реализации такой функции может служить конденсатор каскада усиления на биполярном транзисторе с общим эмиттером, шунтирующий резистор обратной связи в цепи эмиттера. Отношение между входом и выходом этой  $R_{и}C_{и}$ -цепочки также характеризуется постоянной времени  $\tau$ . Она тоже равна  $\tau = R_{и}C_{и}$  и определяет время нарастания выходного сигнала до уровня  $0,63A_0$ , где  $A_0$  — амплитуда ступенчатого воздействия.

Рассмотрим некоторые варианты формирования детекторных сигналов с помощью таких цепочек. Однако прежде всего нужно отметить следующие моменты. Эффект линейного формирования сигналов имеет место только лишь при совместном использовании обеих цепочек. Действительно, дифференцирующая  $C_{д}R_{д}$ -цепочка определяет длительность спада амплитуды сигнала. В свою очередь, интегрирующая  $R_{и}C_{и}$ -цепочка влияет и задает параметры его фронта, т. е. нарастание сигнала.

Рассмотрим наиболее распространенный вариант схемотехнической модификации по применению таких цепочек. Она состоит из усилительного каскада, на входе которого включена дифференцирующая цепочка, а к выходу подключена соответственно интегрирующая цепочка. Постоянные времени  $\tau$  для обеих цепочек будут одинаковы и равны  $\tau = C_{д}R_{д} = R_{и}C_{и}$ . Считаем, что входной сигнал имеет форму ступенчатого воздействия (рис. 9).

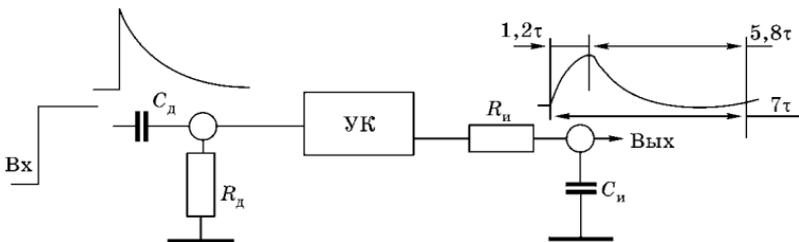


Рис. 9

Схема линейного формирования с однократным дифференцированием и интегрированием:

$C_{д}R_{д}$  — дифференцирующая цепочка;  $R_{и}C_{и}$  — интегрирующая цепочка; УК — усилительный каскад.

В этом случае параметры выходного сигнала после формирования будут иметь вид, представленный на рисунке 9. Фронт сигнала составляет  $\sim 1,2\tau$ , а его спад равен  $\sim 5,8\tau$ . Таким образом, весь сигнал на выходе полностью закончится спустя  $\sim 7\tau$ . Данный метод формирования аналоговых сигналов известен как однократное дифференцирование и интегрирование.

Не составляет труда понять, что в усилителе, выбирая и устанавливая независимо постоянные времени интегрирования и дифференцирования, можно корректировать и изменять полосу пропускания в достаточно широких пределах. В таком случае становится возможным задавать и целенаправленно изменять частотные характеристики усилительного тракта спектрометрической установки. Варьируя и подбирая параметры таких цепочек, создают условия для оптимального формирования сигналов.

Это обеспечивает, с одной стороны, возможность подбора и установки корректного соотношения сигнал/шум, а с другой стороны, достижения и получения весьма высокого разрешения всего спектрометрического тракта в целом. Необходимо заметить, что разрешение можно контролировать в ходе измерений как ширину на полувысоте регистрируемых пиков в амплитудном спектре, которые связаны с регистрацией моноэнергетических частиц.

Если каждую из формирующих цепочек такого типа отделять друг от друга линейным каскадом усиления, то можно реализовывать разнообразные варианты линейного формирования. Именно в таком виде применяется двойное дифференцирование или используется двойное интегрирование. Так, например, при двойном дифференцировании к выходу интегрирующей цепочки (рис. 9) через усилительный каскад просто подключается еще одна дифференцирующая цепочка. Величину постоянной времени для нее можно выбрать либо равной первой цепочке, либо больше или меньше ее.

Если постоянную времени второй дифференцирующей цепочки уменьшить относительно первой, то, подобрав ее величину, можно добиться почти биполярной формы выходного сигнала. Данная форма сигнала не будет оказывать

влияния на состояние нулевой линии при высоких нагрузках. Проходя через разделительный конденсатор, сигнал такой формы практически не оставляет на нем заряда. В такой ситуации без каких-либо дополнительных схем создаются условия и устраняются флуктуации исходного нулевого уровня спектрометрического тракта.

В заключение следует заметить, что с появлением высококачественных операционных усилителей (ОУ) успешно была решена целая совокупность вопросов и проблем в этой области. Прежде всего такие усилители стали основными каскадами усиления в самих спектрометрических усилителях, кроме того, ОУ вошли в различные структуры активных фильтров. В их составе широко используются комбинированные и независимые времязадающие цепочки разных видов, которые включены в петлю обратной связи самих ОУ. Применение активных фильтров в составе спектрометрических усилителей позволило в существенной мере повысить энергетическое разрешение спектрометров.

### 3.7. ЛИНЕЙНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ

Наряду с дифференцирующими и интегрирующими цепочками типа  $CR$  и  $RC$  в практике линейного формирования аналоговых сигналов достаточно масштабно используются структуры на основе линий задержки (ЛЗ). Применение таких линий обеспечивает запаздывание входных сигналов, т. е. осуществляется их задержка во времени, без изменения самой формы сигнала. Они относятся к категории линейных пассивных элементов.

Считается, что проблемы амплитудного анализа, связанные с разными вариантами линейной обработки сигналов, лежат главным образом в микросекундной области. В этом диапазоне частот и времени находятся основные экспериментальные задачи, обусловленные проблемами ядерной физикой низких и средних энергий. С данным диапазоном будут связаны методы линейной обработки

детекторных сигналов, среди которых отметим усиление, линейное формирование, задержку, а также другие изменения их параметров электронными средствами такой направленности.

Известно, что наиболее широкополосным устройством задержки является коаксиальный радиочастотный кабель. Для него характерны погонная индуктивность  $L$  и погонная емкость  $C$ . Эти параметры соответствуют кабелю метровой длины и, в свою очередь, связаны с его волновым сопротивлением  $\rho$ . Волновое сопротивление коаксиального кабеля равно

$$\rho = \sqrt{L/C}.$$

Величина этого параметра для различных кабелей такого вида лежит в пределах  $\rho = 50\text{--}150$  Ом. Средняя задержка  $\tau_{\text{зр}}$  распространения сигнала в них составляет около 5 нс/м.

Ясно, что задержки на основе коаксиальных кабелей из-за габаритов практически неприменимы для амплитудного анализа. В самом деле, для микросекундной задержки нужно  $\sim 200$  м кабеля. Хотя существуют специальные кабели, длина которых при микросекундной задержке сигнала всего несколько метров, размеры остались главным препятствием их применения. Решением вопроса стали искусственные ЛЗ (ИЛЗ) с приемлемыми габаритами. Их основу составляют  $LC$ -цепочки, залитые компаундом, размером  $[(12 \times 50 \times 5) - (20 \times 120 \times 5)]$  мм и выводами от каждой цепочки или их группы.

В состав ИЛЗ входят одинаковые последовательно соединенные  $LC$ -звенья Г-образного типа. Такая же структура служит основой других звеньев типа П и Т, которые также используются в ИЛЗ. Каждое Г-образное звено состоит из катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$ . Между собой они включены последовательно. Начало катушки следующего звена соединяется с концом катушки предыдущего звена. Точка их соединения через конденсатор подключена к общей шине. Такой набор последовательно включенных индуктивных элементов, где точки

общего их соединения через конденсаторы подключены к общей шине, образует характерную структуру, которая получила название искусственная линия задержки с сосредоточенными параметрами.

В искусственной линии задержки такого вида число звеньев лежит в пределах от 5 до 20. Задержка  $\tau$  каждого из них равна

$$\tau \approx \sqrt{LC},$$

где  $L$  — индуктивность, Гн;  $C$  — емкость, Ф. Следовательно, задержка звена  $\tau$  измеряется в секундах. Величина задержки этих линий, выпускаемых на производстве, лежит в пределах от 0,2 до 2,0 мкс. Их волновое сопротивление будет 1200, 600 и 300 Ом соответственно.

Рассмотрим технические средства, служащие для получения и выделения сигналов с помощью ИЛЗ. Формирование однополярного сигнала выполняется схемой, состав и структура которой представлены на рисунке 10а. Временные диаграммы, изображенные на рисунке 10б, поясняют ее функционирование. Показаны временные соотношения между сигналами, которые возникают в различных точках схемы при работе устройства формирования.

Устройство содержит два практически идентичных каскада НК и ИК. Их различие состоит лишь в том, что один каскад неинвертирующий (НК), а другой — инвертирующий (ИК). Его выход через последовательно включенный резистор согласования  $R_c$  и элемент ИЛЗ величины  $\Delta t$  соединяется с одним из входов суммирующего усилителя  $\Sigma_{yc}$ . Другой вход этого усилителя подключен к выходу неинвертирующего каскада НК. Рассмотренная

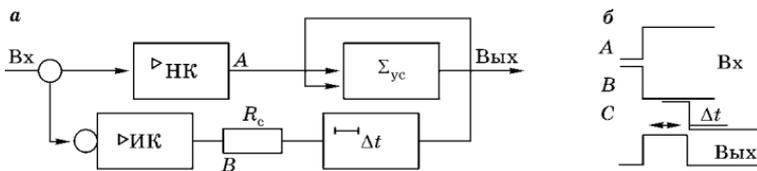


Рис. 10

Схема формирования однополярных сигналов (а) и временные диаграммы его работы (б):

ИК — инвертирующий каскад;  $\Delta t$  — искусственная линия задержки; НК — неинвертирующий каскад;  $\Sigma_{yc}$  — суммирующий каскад.

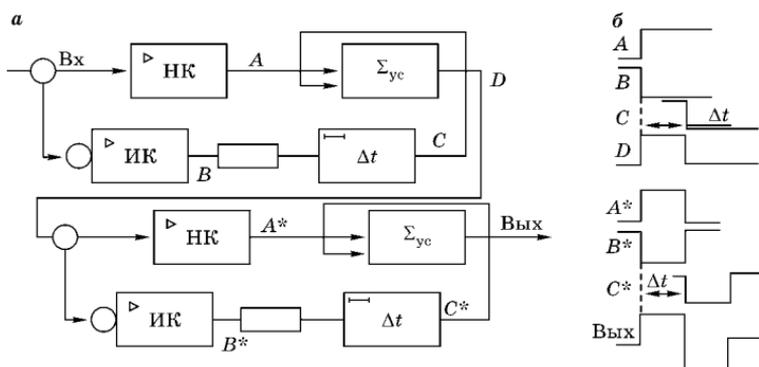
схема относится к категории линейных устройств формирования однополярных сигналов (ЛУФОС).

Сигнал на выходе выделяется сразу после поступления его с выхода схемы НК. Он удерживается в течение времени  $\Delta t$  до появления задержанного инвертированного сигнала на другом входе суммирующего усилителя. В результате сложения двух одинаковых, но противоположных по полярности сигналов на выходе суммирующего каскада фиксируется нулевой результат. Действительно, в результате операции суммирования на выходе такого линейного формирующего устройства получают выходной сигнал фиксированной длительности величиной  $\Delta t$ . Кроме этого, его амплитуда будет однозначно связана с амплитудой входного сигнала.

### 3.8. ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ БИПОЛЯРНЫХ СИГНАЛОВ

В практике измерений широко используется еще один вариант линейной обработки детекторных сигналов, известный как метод формирования биполярных сигналов с помощью ИЛЗ. Для формирования биполярного линейного сигнала можно использовать еще одну аналогичную схему ЛУФОС, подключенную последовательно с первой. В результате такой комбинации образуется новое устройство линейного формирования биполярного сигнала. На его выходе выделяется сигнал данной формы, но его длительность равна  $2\Delta t$ . Схема и временные диаграммы, поясняющие функционирование формирующего устройства, представлены на рисунке 11.

Следует заметить, что одна из основных задач, которую приходится решать разработчикам таких схемотехнических решений, заключается в корректном согласовании волновых сопротивлений используемых ИЛЗ в составе таких схем. Учитывая достаточно значительную величину их задержки, отмеченную несколько ранее, следует обозначить еще один аспект. Наряду с последовательным вариантом согласования (как показано на обоих рисунках) широко используется параллельное согласование, но уже



**Рис. 11**  
Схема формирования биполярных сигналов (а)  
и временные диаграммы ее работы (б):

ИК — инвертирующий каскад;  $\Delta t$  — искусственная линия задержки; НК — неинвертирующий каскад;  $\Sigma_{\text{yc}}$  — суммирующий каскад.

на конце искусственной линии задержки. Для амплитудного анализа с выхода биполярного устройства формирования первой всегда приходит положительная составляющая сигнала.

Способы формирования с помощью линий задержки как однополярных, так и биполярных сигналов весьма широко применяются в ядерной электронике. Электронные средства данного назначения масштабно используются в спектрометрии в составе амплитудного анализа. Это обусловлено в первую очередь тем, что линейное формирование сигналов такого вида позволяет достаточно корректно решать проблемы измерений при высокой интенсивности поступления детекторных сигналов.

### 3.9. СТРУКТУРА, СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Линейные усилители данного назначения масштабно применяются в измерениях параметров ионизирующих излучений при амплитудном анализе. Как уже отмечалось, особенность таких электронных устройств состоит в том, что их основной параметр в виде коэффициента усиления должен выбираться и устанавливаться в пределах

от единиц до нескольких тысяч. Обеспечить столь высокие значения параметра при весьма внушительном диапазоне изменения его величины возможно при условии, что усилитель будет многокаскадным.

Такая структура спектрометрического усилителя создает условия для достижения высоких параметров. С этой целью в каждом усилительном каскаде широко применяются различные варианты отрицательной обратной связи (ООС). Широко используется как «местная» ООС в усилительных каскадах, так и общая ООС. Такая связь служит гарантией получения и достижения высоких параметров как в самих усилительных каскадах, так и всего спектрометрического усилителя в целом. Это относится прежде всего к коэффициенту усиления, его стабильности, линейности, включая при этом низкое выходное сопротивление оконечных, выходных каскадов усилителя.

Рассмотрим обобщенную функциональную схему типового спектрометрического усилителя (СПУ). Это позволит более четко понять и объяснить ряд положений, связанных с использованием электронных средств данного назначения. Его схема приведена на рисунке 12.

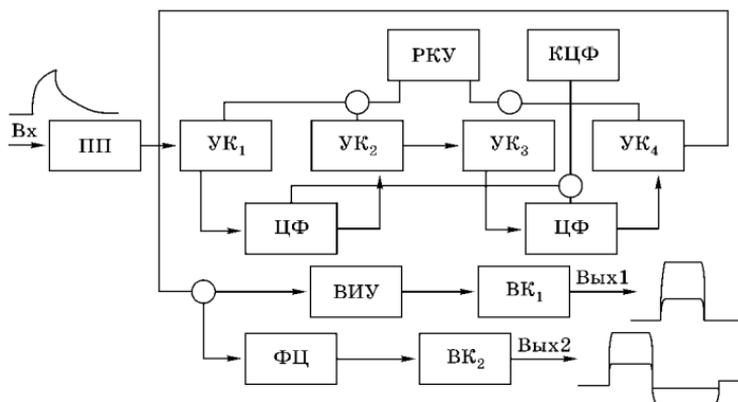


Рис. 12

Функциональная схема спектрометрического усилителя:

ВИУ — схема восстановления исходного уровня; ВК<sub>1</sub> — выходной каскад формирования и усиления однополярного сигнала; ВК<sub>2</sub> — выходной каскад усиления биполярного сигнала; КЦФ — схема коммутации цепей формирования; ПП — переключатель полярности входного сигнала; РКУ — регулятор коэффициента усиления; УК<sub>1</sub>–УК<sub>4</sub> — усилительные каскады; ФЦ — формирующие цепи биполярного сигнала; ЦФ — цепи формирования сигналов.

Переключатель полярности (ПП) входного сигнала расширяет возможности СПУ, позволяя подачу сигналов как положительных, так и отрицательных. Сигналы, поступающие с предусилителей, не являются оптимальными по форме для амплитудного анализа. Они имеют быстрый фронт и достаточно медленный спад. Этот аспект, обусловленный формой сигнала, является причиной наложений, что ведет к перегрузке канала измерения.

В схемотехнике СПУ используются различные цепи формирования (ЦФ), разделенные усилительными каскадами. В ЦФ применяются дифференцирующие и интегрирующие цепочки. Эти пассивные элементы сохраняют линейность, устраняют медленный спад, создавая необходимый уровень на выходе СПУ. В схемах ЦФ используются схемы компенсации полюса нулем, двойного интегрирования и дифференцирования, активные фильтры, схемы формирования на искусственных линиях задержки с сосредоточенными параметрами и т. д.

Подбором формирующих цепочек добиваются улучшения соотношения сигнал/шум. Дифференцирующие  $CR$ -цепочки ограничивают диапазон частот снизу, снижая вклад низкочастотных составляющих. Интегрирующие  $RC$ -цепочки урезают диапазон частот сверху, снижая вклад высокочастотных составляющих. Эти формирующие цепи, являясь частотными фильтрами, обеспечивают оптимальное отношение сигнал/шум, уменьшая вклад обеих его составляющих.

Для получения максимальной амплитуды сигнала постоянную времени дифференцирования выбирают больше времени нарастания фронта входного сигнала. С точки зрения «наложения» импульсов их длительность должна быть минимальной, но это не соответствует надлежащей фильтрации с точки зрения шума. Использование биполярных выходных сигналов тоже не является оптимальным по шумовой составляющей, но успешно решает проблему устойчивости выходного уровня СПУ при емкостных связях. В этих целях в состав усилителей дополнительно вводят схемы восстановления исходного уровня (ВИУ).

Выбор параметров формирования на практике является компромиссом между всей совокупностью проблем. В СПУ характеристики интегрирования и дифференцирования можно подбирать независимо друг от друга, и их оптимальное значение определяют и устанавливают экспериментально. Получают характерный параметр, называемый оптимальным временем формирования (ОВФ). Именно это время  $\tau_{\text{овф}}$  рекомендуется специалистами для практического использования с различными пропорциональными детекторами.

Для детекторов следующих видов рекомендовано:

- сцинтилляционные с кристаллом Na(J)  $\tau_{\text{овф}} \sim 0,5-1,5$  мкс;
- газовые, пропорциональные счетчики  $\tau_{\text{овф}} \sim 0,5-5,0$  мкс;
- барьерные полупроводниковые детекторы  $\tau_{\text{овф}} \sim 1,0-2,0$  мкс;
- полупроводниковые Ge(Li)-детекторы  $\tau_{\text{овф}} \sim 1,0-5,0$  мкс.

Проблема высокой стабильности параметров СПУ обеспечивается высокими характеристиками элементной базы в составе схем УК, ЦФ, делителях и т. д. Конденсаторы, резисторы, линейные интегральные схемы и другие компоненты в СПУ должны слабо зависеть от изменения как внутренних, так и внешних факторов. Достижение высоких параметров измерительных трактов спектрометров энергий при амплитудном анализе связывают с применением аналоговых процессоров. Однако СПУ не утратили своих позиций в практике измерений основных параметров ядерных превращений. В таком случае будет уместно рассмотреть основные характеристики стандартного СПУ, демонстрирующие весьма высокий уровень параметров техники усиления данного вида (табл. 1).

Усилители данного назначения используются при амплитудном анализе, увеличивая входные сигналы в диапазоне от нескольких милливольт до 10 В. Имея высокую линейность, хорошее отношение сигнал/шум, оптимальное формирование с требуемым уровнем фильтрации, они обеспечивают высокое энергетическое разрешение измерительного тракта. При высоких скоростях счета событий для снижения наложений, искажающих регистрируемые спектры, длительность их выходных сигналов должна

Таблица 1

Параметр	Значение
Полярность входных сигналов	–
Входное сопротивление	Ом
Коэффициент усиления:	
регулировка ступенчато	3000
регулировка плавно	0
Уровень шума на выходе	5,0 мкВ
Интегральная нелинейность	5%
Постоянные интегрирования	0,1–10 мкс
Постоянные дифференцирования	0,1–10 мкс
Множитель для обеих постоянных	2; 5
Выходное сопротивление	Ом
Линейный диапазон выходных сигналов	0–10 В
Стабильность	$< \pm 50$ мкВ/°С
Форма выходного сигнала, включая биполярный сигнал	+; –

быть минимальной, что ведет к ухудшению разрешения. Современные спектрометрические усилители при нагрузках вплоть до  $10\,000\text{ с}^{-1}$  не снижают разрешения тракта, при  $90\,000\text{ с}^{-1}$  происходит лишь небольшое его ухудшение.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Базовые методы обработки детекторных сигналов и цель их реализации.
2. Почему существуют проблемы непосредственного использования детекторных сигналов?
3. Назначение предусилителя, его дислокация в измерительном тракте. Какие задачи решаются с его помощью?
4. Основные виды усилительных устройств, применяемых в экспериментальных исследованиях ядерной физики.

5. В чем состоит особенность зарядочувствительного предусилителя (ЗЧП)?
6. Составные части типовой структуры ЗЧП и сфера его применения.
7. Какие меры предосторожности необходимо соблюдать при работе с ЗЧП?
8. Что такое спектрометрический усилитель (СПУ), его назначение? Какие задачи решаются с его помощью?
9. К какой категории устройств можно отнести СПУ, в чем состоит его индифферентность и как она проявляется?
10. В чем состоит суть методов линейного формирования сигналов детектора?
11. Линейные формирующие цепочки (ЛФЦ), их разновидности и форма сигналов при типовом воздействии.



## ГЛАВА 4

# ЛИНЕЙНЫЕ СХЕМЫ И ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ОТБОРА ДЕТЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ

Электронные средства данного назначения в существенной мере расширяют сферу применения линейных методов обработки детекторных сигналов. При использовании такой разновидности техники в ее выходных сигналах сохраняется информация о потерях частицами энергии в детекторном устройстве. Утрата энергии, как уже отмечалось, связана с амплитудой выходного сигнала детектора. В амплитуде всех выходных сигналов, которые выделяются устройствами данного назначения, в той или иной форме содержится информация о величине этих потерь.

### 4.1. Пороговая техника усиления сигналов

В практике амплитудного анализа наряду с различными видами предусилителей, а также спектрометрических усилителей широко используются электронные средства линейного преобразования и обработки детекторных сигналов. Эта электронная техника существенно расширяет сферу применения амплитудного анализа и методов измерений на его основе. Такая тенденция остается характерной для различных фундаментальных и прикладных исследований в ядерной физике и смежных областях.

Особое место среди электронных средств данного назначения занимает пороговая техника усиления детекторных сигналов. Данный вариант техники усиления обладает примечательной особенностью — для всех сигналов, амплитуда которых ниже установленного уровня  $U_{п}$ , коэффициент

усиления  $k$  устройства равен нулю. В этой ситуации, если  $A_{\text{вх}} < U_{\text{п}}$ , выходного сигнала не будет, т. е.  $A_{\text{вых}} = 0$ .

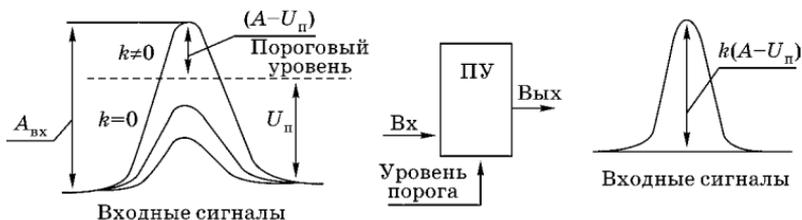
Превышение входным сигналом установленного уровня  $U_{\text{п}}$ , который называется пороговым уровнем, вызывает появление выходного сигнала. Его величина, т. е. амплитуда, равна

$$A_{\text{вых}} = k \cdot (A_{\text{вх}} - U_{\text{п}}),$$

где  $k$  — коэффициент усиления;  $(A_{\text{вх}} - U_{\text{п}})$  — сигнал превышения входной амплитудой заданного и установленного уровня порога.

При этом необходимо отметить, что в устройствах данного вида, помимо изменения величины порогового уровня  $U_{\text{п}}$ , независимо можно регулировать и величину коэффициента усиления  $k$ . Функционирование такого усилительного устройства представлено на рисунке 13 в виде временных диаграмм.

В электронных методах ядерной физики устройства такого типа получили наименование пороговые усилители (ПУ). Невзирая на признание и различные сферы применения, название данного электронного устройства окончательно не установилось. Наряду с пороговым усилителем в статьях и монографиях его нередко именуют несколько иначе: усилитель окна, стретчер, линейный дискриминатор, экспандер и т. п. Характерно, что несмотря на различия в названии этих устройств, они практически не отличаются друг от друга по реализуемым ими функциям. Тем не менее будем считать данное устройство все-таки пороговым усилителем.



**Рис. 13**  
Соотношение между входными и выходными сигналами порогового усилителя

Его функциональную основу составляют диодные пороговые ограничители, как правило, последовательного типа, размещенные на входе усилительного устройства. Хотя величину порога задавать и изменять несложно, к серьезному недостатку схемы следует отнести нелинейность передачи сигнала вблизи порога. Эта проблема обусловлена нелинейностью вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода на участке перехода его из закрытого состояния в открытое.

Решением возникшей проблемы на определенном этапе развития этих схем стало использование в составе ограничителя усиленного диода. Его включили в цепь обратной связи усилителя, что значительно уменьшило протяженность нелинейного участка ВАХ диода. Образованное устройство получило название усиленный диод. Схема ограничения с таким диодом, который выполняет на входе усилителя роль порогового элемента, достаточно широко применяется на практике в составе измерительных модулей данного назначения.

Высокие результаты были получены при использовании в качестве порогового элемента токового коммутатора или токовой переключающей схемы. Сама схема входного ограничительного каскада несколько усложнилась. В нее ввели источник тока и преобразователь входного сигнала типа «напряжение — ток», но коммутаторами остались диоды. Входной каскад порогового усилителя на основе такой схемы представлен на рисунке 14.

Преобразователь «напряжение — ток»  $U/I$  трансформирует входной сигнал в виде напряжения в эквивалент-

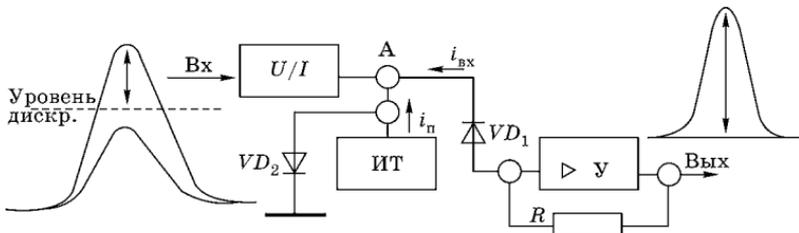


Рис. 14

Вариант схемы входного каскада порогового усилителя:

ИТ — источник тока; У — усилитель;  $U/I$  — преобразователь «напряжение — ток».

ный импульс тока. Источник тока ИТ задает величину порогового тока  $i_{\text{п}}$ , которая равнозначна пороговому уровню, т. е. уровню дискриминации. В исходном состоянии этот ток  $i_{\text{п}}$  протекает через другой диод  $VD_2$ , а диод  $VD_1$  находится в закрытом состоянии.

При поступлении входного сигнала появляется входной ток  $i_{\text{вх}}$ , который будет уменьшать ток через диод  $VD_2$ . Далее, при  $i_{\text{вх}} \geq i_{\text{п}}$ , ток в точке А (рис. 14) меняет направление и течет уже в усилитель У через открытый диод  $VD_1$ . Переключение токов происходит без изменения разности потенциалов обоих диодов  $VD_1$  и  $VD_2$ . При этом в схеме отсутствуют всякие переходные процессы, связанные с перезарядом ее паразитных емкостей.

Данная ситуация, в свою очередь, способствует передаче входного сигнала с достаточно приемлемым быстродействием. Выходной усилитель У обеспечивает необходимый коэффициент усиления для части входного сигнала, которая превышает установленный уровень порога. Поскольку уровень дискриминации в представленной схеме ограничения задается в виде тока, то ее нередко называют еще токовым дискриминатором.

Пороговые усилители в амплитудном измерительном канале размещают и обычно включаются сразу за спектрометрическим усилителем. Их применение решает две основные задачи. Во-первых, экспандирование (растяжение) части спектра, которая может быть представлена и рассмотрена более детально. Во-вторых, снижение мертвого времени регистрации, т. е. повышение ее скорости.

## 4.2. ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА УСИЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ИХ ОДНОВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКЕ

В экспериментальных исследованиях нередко возникает ситуация, когда необходимо согласование соотношения между сигналами по времени. При этом выделяют и фиксируют какой-либо признак в виде сигнала, чтобы осуществлять регистрацию или ее запрет, если условия эксперимента не выполняются. В этом случае для принятия

решения необходимо время, которое обычно получают путем задержки регистрируемого сигнала. Данную функцию выполняют электронные средства, получившие название усилители линейной задержки сигналов, которые будут рассмотрены далее.

Своеобразие такой электронной техники состоит в сохранении линейного коэффициента передачи сигнала с ее входа на выход. Кроме того, задержка поступающих сигналов, определяемая лишь целями эксперимента, должна регулироваться и изменяться исходя из условий решаемой измерительной задачи. Диапазон перемены величины задержки, который обеспечивает большую часть измерений, обычно составляет несколько микросекунд.

В качестве задержки в составе этих электронных устройств используются искусственные линии задержки (ИЛЗ), о которых уже говорилось ранее. Они обеспечивают достаточную стабильность во времени. Вместе с тем, обладая довольно-таки высоким волновым сопротивлением, что характерно для линий задержки с сосредоточенными параметрами (несколько сот Ом), их включение имеет некоторые особенности.

Во-первых, все они должны быть согласованы. Выводы ИЛЗ должны быть нагружены, т. е. подключены к характеристическому волновому сопротивлению, чтобы избежать отражений сигналов. Во-вторых, задержка одной ИЛЗ, как правило, не превышает двух микросекунд, поэтому в этих целях используют обычно несколько ИЛЗ, включенных последовательно. Связь между ними осуществляется, как правило, через промежуточные каскады усиления.

Сигналы на выход с этих ЛЗ передают через усилительный каскад с низким выходным сопротивлением. Величина задержки выходных сигналов в этих усилителях изменяется ступенчато, с фиксированным шагом. Число таких ступеней или шагов ранее не превышало 3–5, в последних разработках доходит до десятка и более. Схема усилителя такого назначения приведена на рисунке 15.

С помощью устройства ПП (переключатель полярности) выбирают и устанавливают необходимый ее вид с уче-

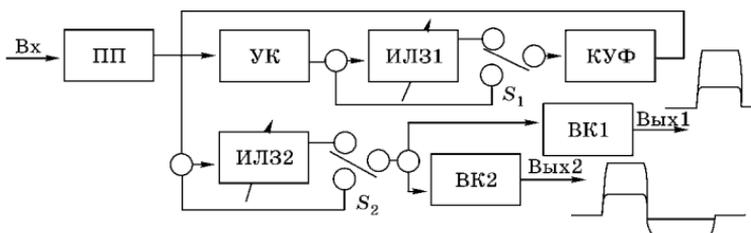


Рис. 15

Схема усилителя с линейной дискретно изменяемой задержкой выходного сигнала:

ВК — выходной каскад; ИЛЗ — искусственная линия задержки; КУФ — каскад усиления и формирования; ПП — переключатель полярности входного сигнала; УК — усилительный каскад; S — переключатель.

том входных сигналов. Две группы, а иногда и более, регулируемых ИЛЗ1 и ИЛЗ2 увеличивают диапазон изменения задержки выходных сигналов, обеспечивая большую гибкость выбора ее величины. Усилительные каскады (УК, КУФ, ВК1 и ВК2) позволяют подобрать и установить нужный коэффициент усиления. Его можно изменять в пределах от единиц до нескольких сот и более, включая еще и плавную его регулировку. Устройства коммутации, установки и выбора величины коэффициента усиления на рисунке 15 не показаны.

Два переключателя  $S_1$  и  $S_2$ , если они находятся в нижнем положении, позволяют получать выходные сигналы усилителя практически без задержки. Верхнее положение обоих переключателей (рис. 15) обеспечивает изменение задержки выходных сигналов усилителя от минимума до максимума. Использование двух независимых каскадов ВК1 и ВК2 в составе таких структур делает возможным получение выходных сигналов обоих видов. Один из них, а именно ВК1, усиливает и выделяет выходные сигналы положительной полярности. Другой выходной каскад ВК2 формирует биполярные выходные сигналы, применяемые в спектрометрии.

Выходные сигналы усилителя имеют традиционную, общепринятую форму. Это характерно практически для всех усилителей, осуществляющих линейную дискретно изменяемую задержку выходных сигналов. Помимо этого, данные структуры выполняют еще функцию формирующих

устройств. Более того, эти устройства можно использовать для задержки не только аналоговых, но и логических сигналов. Данный факт, помимо целевого назначения таких устройств, нередко используется фирмами-производителями этих структур в рекламных целях.

Сфера применения данной усилительной техники в амплитудном анализе весьма многогранна. Ее используют для суммирования аналоговых сигналов. Без нее крайне трудно, а иногда и невозможно решать вопросы линейного отбора событий в эксперименте. Реализация задержки не только аналоговых, но и логических сигналов расширяет область применения этой техники. Она отчасти используется для организации режимов совпадений и антисовпадений при амплитудном анализе. Схемы совпадений микросекундного диапазона работают лишь с сигналами положительной полярности. Усилительная техника такого назначения выпускается рядом зарубежных фирм. Диапазон задержки входных сигналов можно изменять в пределах от 0 до 4,0 мкс.

### 4.3. РАСПИРИТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ С ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ

Сигналы детекторов хотя и различаются по виду и форме, но все они весьма малы по амплитуде. Устройства усиления, увеличивая их значение, должны решать такую задачу с минимальным уровнем искажений формы детекторных сигналов. Однако, как показывает практика измерений, форма этих сигналов не отвечает критерию оптимальности при их регистрации. Импульсы детекторов обычно имеют быстрый фронт и медленный спад разных экспонент, а иногда эти сигналы имеют колоколовидную форму. Это создает проблемы оптимальной их обработки при спектрометрии ионизирующих излучений на основе амплитудного анализа.

Упомянутые формы импульсов, как правило, ведут к ухудшению параметров регистрируемых амплитудных

спектров. В них наблюдается главным образом снижение разрешения, а также рост нелинейности преобразования. Было установлено, что основные параметры зарегистрированных спектров повышались, т. е. уменьшалась их нелинейность и повышалось разрешение, если цифровой код преобразованных амплитуд получали из сигналов с плоской вершиной при длительности 0,5–5 мкс. При такой ситуации использованная форма положительных сигналов способствует росту качества экспериментальных исследований.

Эти сигналы формируются специальными электронными устройствами. Они получили название «линейные расширители импульсов», которые относятся к широко применяемым структурам аналогового типа. Эти устройства, выполняя заданную функцию, обеспечивают и сохраняют однозначную связь между амплитудой выходного сигнала и энергией частицы, которую она утрачивает в материале детектора при регистрации.

Более того, как показывает практика измерений, такое формирование создает удобную ситуацию и улучшает условия при непосредственном сравнении амплитуд импульсов одного или нескольких источников сигналов. Важно отметить, что в составе линейных расширителей импульсов наряду с усилительными каскадами нередко используются устройства ослабления сигналов. Таким образом, обеспечивается возможность регулировки коэффициента передачи измерительного тракта, создавая благоприятные условия для измерений с помощью такой техники.

Работу этих устройств понять несложно, поэтому нужно рассмотреть лишь функционирование их главного звена. Это каскад расширения сигналов (КРС). Он состоит из аналогового элемента памяти и схемы его заряда. Конденсатор  $C$  является таким элементом, а диод  $VD$  выполняет функцию схемы заряда. В состав устройства КРС входит ключ  $Kл$ , управляемый внешним сигналом. К выходу КРС подключен усилительный каскад  $УК$ , образуя схему линейного расширителя импульсов.

Поступивший сигнал через открытый диод  $VD$  заряжает конденсатор  $C$  до амплитудного значения (рис. 16). Затем диод отключается, и схема КРС удерживает накопленный потенциал, равный амплитуде входного сигнала, на конденсаторе  $C$ . Длительность плоской вершины выходного сигнала усилительного каскада УК определяется лишь задержкой сигнала управления (УПР) ключом Кл.

При поступлении этого сигнала ключ Кл замыкается и конденсатор быстро разряжается до исходного уровня, т. е. нулевого потенциала. Замкнутое состояние ключа зависит от длительности управляющего сигнала УПР, и его величина должна быть достаточна для полного разряда конденсатора  $C$ . Это нужно, чтобы не нарушить однозначную связь между амплитудой выходного сигнала и энергией, утраченной частицей в детекторе.

Другой проблемой является нелинейность вольт-амперной характеристики диода  $VD$ , что создает негативный аспект связи вход-выход схемы расширения. Это в существенной мере характерно для сигналов небольшой амплитуды. Данный фактор уже отмечался ранее (см. п. 4.1). Использование «усиленного» диода способствует решению этого вопроса. Следует заметить, что схему из соединенных последовательно диода  $VD$  и конденсатора  $C$  в составе КРС нередко называют пиковым детектором ПД.

Такое устройство предназначается определять и фиксировать текущее максимальное значение напряжения на своем входе. Чувствительность схемы ПД зависит в основ-

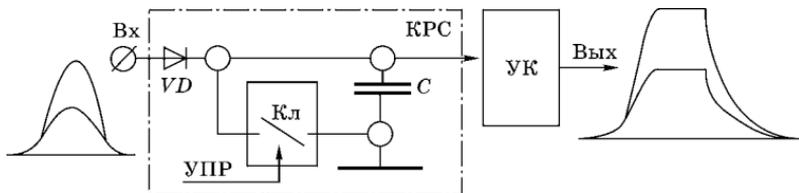


Рис. 16

Схема линейного расширения импульсов:

Кл — ключ; КРС — каскад расширения сигналов; УК — усилительный каскад; УПР — сигнал управления;  $C$  — конденсатор;  $VD$  — диод.

ном лишь от вида диода, его материала (кремниевый или германиевый). Не вызывает сомнений тот факт, что для германиевого диода она почти в два раза выше, чем у кремниевоего. Однако и в этом случае, до тех пор пока входное напряжение не превысит 0,3 В, схема остается нечувствительной к приращению входного напряжения.

Возможным решением такой проблемы можно считать использование схемы активного пикового детектора (АПД). В его состав дополнительно ввели еще один диод и два операционных усилителя  $ОУ_1$  и  $ОУ_2$ , которые функционируют в режиме повторителей напряжения. Полученная схема АПД представлена на рисунке 17.

Все приращения входного напряжения каскад на  $ОУ_1$  передает на конденсатор  $C$  через открытые диоды  $VD_1$  и  $VD_2$ . Выход  $ОУ_2$  отслеживает изменения потенциала на конденсаторе. Если напряжение на входе понизилось, то возникшая на входе  $ОУ_1$  разность потенциалов запирает диод  $VD_1$ , отсекая конденсатор  $C$  от входа. На нем фиксируется достигнутое пиковое значение входа, которое поддерживается за счет обратной связи через резистор  $R$ .

Такая связь не только отслеживает потенциал на конденсаторе  $C$ , но и компенсирует изменения параметров самого диода  $VD_2$ , повышая качество информации на выходе  $ОУ_2$ . Нетрудно понять, что схему АПД можно использовать для расширения сигналов. Еще большим потенциалом возможностей в решении таких задач обладает уст-

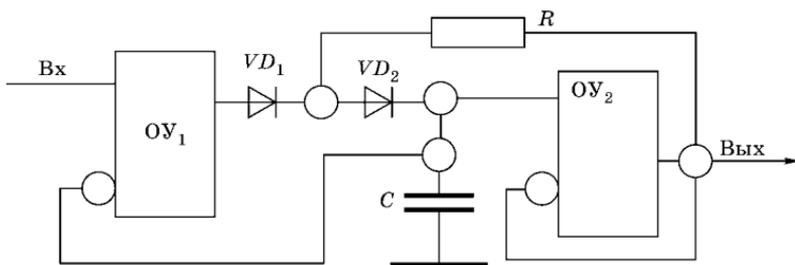


Рис. 17

Схема активного пикового детектора:

$ОУ$  — операционный усилитель;  $C$  — конденсатор;  $R$  — резистор;  $VD$  — диод.

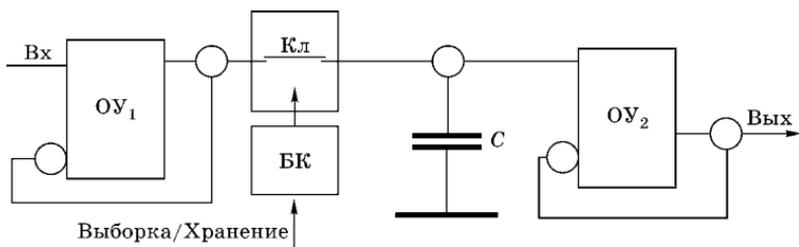


Рис. 18

Схема устройства выборки и хранения (УВХ):

БК — буферный каскад; Кл — ключ; ОУ — операционный усилитель; С — конденсатор.

ройство выборки и хранения (УВХ). Схема служит для запоминания уровня сигнала, поступившего на ее вход.

Элементом памяти аналогового типа в ее составе служит конденсатор  $C$ . Два операционных усилителя  $ОУ_1$  и  $ОУ_2$ , входящие в схему УВХ, являются повторителями напряжения и соединены последовательно. Выход  $ОУ_1$  через замкнутый ключ Кл подключен к конденсатору  $C$  и входу другого  $ОУ_2$ , выходной сигнал которого повторяет все изменения входного. Через схему буферного каскада БК осуществляется управление состоянием ключа Кл. Схема УВХ приведена на рисунке 18.

Процесс слежения за входным сигналом соответствует режиму выборки. Сигнал, поступивший на вход схемы буферного каскада БК, размыкает ключ Кл, переводя схему УВХ в режим хранения. Конденсатор фиксирует входной уровень, адекватный моменту поступления сигнала на схему БК, и удерживает его в течение длительности сигнала. Его снятие вновь переводит схему в режим выборки.

Развитие средств ядерной электроники сняло злободневность вопросов линейного расширения сигналов в ядерной физике. Однако для нелинейной оптики и лазерной техники интерес к этим проблемам сохраняется. Процессы в них протекают в нано- и субнаносекундных диапазонах, что объясняет устойчивую тенденцию дальнейшего совершенствования быстрых схем УВХ.

#### 4.4. ЛИНЕЙНОЕ СУММИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Данная форма обработки аналоговых сигналов, получаемых со всего многообразия детекторных устройств, относится к одному из частных случаев их линейного преобразования. Несмотря на определенную стандартность ряда схемотехнических решений, используемых в таких устройствах, с их помощью получают ответы на значимый перечень задач, возникающих в ходе измерений. Такая ситуация весьма характерна для амплитудного анализа.

Реализация такой формы преобразования почти всегда связана с линейным алгебраическим суммированием сигналов, с согласованием их полярности. Она ведет к преобразованию импульсов тока в сигналы напряжения, к их усилению и т. д. Это имеет важное значение не только для спектрометрии ионизирующих излучений на основе амплитудного анализа, но и для организации и проведения экспериментальных исследований в целом.

При изучении энергоугловых корреляций ядерных излучений не редко применяются разные виды телескопических детекторных систем. Они, как правило, «многоплечные», где каждое «плечо» — это телесный угол в пространстве, выделяемый по крайней мере двумя детекторами, размещенными друг за другом. В первом из детекторов регистрируемая частица теряет малую, весьма незначительную часть своей энергии. Основные же ее потери происходят в следующем, втором, детекторе.

Для получения информации о полной энергии частицы, которая уносится ею в данном направлении, оба детекторных сигнала суммируются. Аналогичная детекторная система может располагаться на другом телесном угле. Складывая суммарные сигналы обоих «телескопических плеч», получают исходную энергию такого генетически обусловленного ядерного процесса. Среди других детекторных устройств, в которых необходимо суммирование сигналов, можно назвать многослойную камеру деления. В экспериментах с камерами такого вида часто используются различные варианты методик по времени пролета.

Обработка сигналов с ряда детекторных устройств в форме линейного аналогового суммирования ведет к увеличению объема экспериментальной информации и повышению ее ценности и качества. Необходимо отметить, что телескопические детекторные системы, как и многослойные камеры деления, помогают решать сложные экспериментальные задачи. Использование методик суммирования сигналов с детекторов и технических средств их реализации позволяет успешно осуществлять эти исследования. Измерение всех параметров создает условия для объективного представления динамики изучаемых ядерных процессов.

Основной элементной базой устройств линейного суммирования аналоговых сигналов служат операционные усилители (ОУ). В составе суммирующего усилителя, который нередко называют просто сумматор, можно выделить две основные структуры. Первая из них является устройством суммирования и выполнена на ОУ<sub>1</sub>, который включен по схеме инвертирующего каскада. Функциональная схема всего усилителя данного вида приведена на рисунке 19. Другим каскадом сумматора служит буферный усилитель на базе ОУ<sub>2</sub>, который с помощью переключателя ПП используется в виде инвертора или просто в виде повторителя входного сигнала.

Суммирующий усилитель осуществляет данную линейную операцию с сигналами, поступающими по входам

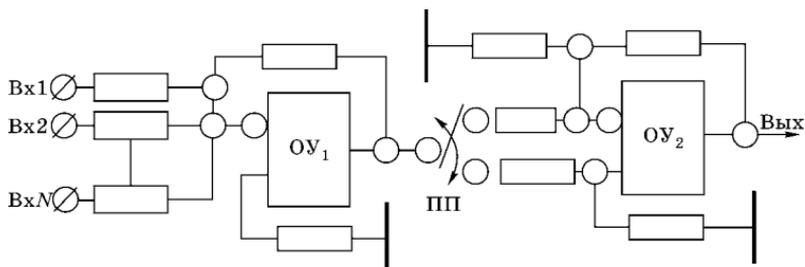


Рис. 19

Структура линейного суммирующего усилителя:

ПП — переключатель полярности выходного сигнала; ОУ — операционный усилитель.

$V_{x1}$ – $V_{xN}$ . Число входов такого усилителя обычно не более четырех. С помощью переключателя ПП можно выбрать необходимую полярность его выходных сигналов. К входам усилителя этого типа можно подключить любой из всей совокупности линейных усилителей, а также схемы удлинения сигналов, аналоговые схемы задержки и т. п. На входы линейного суммирующего усилителя можно подавать сигналы с любого аналогового устройства их обработки. Все эти линейные структуры, безусловно, можно подключать и к выходу сумматора.

Практика применения таких устройств позволяет сделать следующее замечание. Если используются не все входы сумматора, то неподключенные его входы необходимо соединить с земляной шиной, т. е. поставить заглушки на его свободные входы, чтобы соединить входной сигнальный контакт разъема с земляной шиной. Нарушение этих условий может спровоцировать появление дополнительного смещения выходного уровня суммирующего устройства на несколько десятков милливольт.

В ряде случаев, помимо отмеченных моментов, связанных с использованием таких усилителей, может происходить достаточно неприятное явление — «пролезание» сигналов с одного входа на другой, т. е. их взаимодействие друг с другом. Данный негативный момент, как показывает опыт и практика работы с такой электронной техникой, проявляется в наибольшей мере, при одновременном совместном поступлении сигналов на разные входы суммирующего устройства.

Усилители такого вида выпускаются несколькими зарубежными фирмами как в стандарте NIM, так и в стандарте SAMAC. Они имеют, как правило, четыре независимых входа, на которые подаются аналоговые униполярные или биполярные сигналы, амплитуда которых изменяется в пределах от 0 до 10 В. Выходные сигналы в этих усилителях могут инвертироваться или не инвертироваться. Режимы работы выбираются переключателями на их передних панелях. Выходные сигналы усилителей являются алгебраической суммой входных сигналов, которые изменяются в тех же пределах.

#### 4.5. ЛИНЕЙНЫЕ СХЕМЫ ПРОПУСКАНИЯ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Линейная схема пропускания (ЛСП), или линейные ворота, относится к категории электронных устройств, которые обеспечивают контролируемую передачу сигналов со входа на свой выход. Процесс такого вида осуществляется без искажений амплитуды сигналов, но только лишь при наличии разрешающего сигнала на входе УПРАВЛЕНИЕ. Если этот логический сигнал отсутствует, то передача аналоговых сигналов со входа на выход ЛСП невозможна.

Схемы этого вида позволяют отбирать сигналы по установленному критерию, сохраняя в выделенном сигнале всю информацию о параметрах входного сигнала: его амплитуде, форме, длительности и т. д. Не составляет труда понять, что линейным схемам пропускания принадлежит весьма принципиальная роль в решении широкого круга экспериментальных задач. Они ориентированы главным образом на применение амплитудного анализа во всем многообразии ядерно-физических исследований.

Эти схемы можно с успехом использовать в борьбе с регистрацией некорректных событий, т. е. сигналов, связанных различными негативными факторами. Среди таких сигналов могут быть те из них, которые не отвечают заданным условиям проводимого эксперимента, принадлежат фоновым событиям или обусловлены различными шумовыми составляющими и т. п. С помощью ЛСП можно осуществлять эффективную селекцию событий при амплитудном анализе.

Схемы данного назначения являются составной и весьма важной частью измерительных систем различных спектрометров энергетической направленности. Они ориентированы на измерение энергии ядерных взаимодействий с помощью амплитудного анализа. Задача ЛСП, как уже отмечалось, состоит в линейной передаче аналоговых сигналов при наличии управляющего сигнала на ее стробирующем входе. Так иногда называется вход УПРАВЛЕНИЕ в составе ЛСП, сигнал, при котором она переводится в активное состояние.

При открытом состоянии такая схема должна с высокой линейностью и стабильностью передавать аналоговые сигналы по каналу их транспортировки. Передачу необходимо осуществлять с минимальным уровнем искажений даже при высоких нагрузках. Наоборот, в закрытом, пассивном состоянии, когда отсутствуют логические сигналы УПРАВЛЕНИЕ на стробирующем входе, схема не должна передавать на выход амплитуды сигналов, которые поступают по ее аналоговому линейному входу.

Следует заметить, что алгоритм работы схемы может быть противоположным. При таких условиях устройство ЛСП передает на выход все сигналы, поступающие по аналоговому входу, при отсутствии управляющего сигнала. В других условиях при наличии на стробирующем входе управляющего сигнала запрещается прохождение на выход аналоговых сигналов. Те или иные ситуации в передаче информации на выход устройства выбираются с помощью переключателей на передней панели блока ЛСП.

Однако, как установлено на практике и что характерно для реальной ситуации, в пассивном состоянии на аналоговом выходе схемы могут быть все же обнаружены сигналы. Случай появления выходных сигналов нередко обусловлен паразитными связями выхода и входа схемы и называется эффектом «пролезания». Наиболее часто эффект такого рода наблюдается в простых схемах линейных ворот. Усложнение их структурных и схемотехнических решений ведет к снижению этих эффектов.

В ряде случаев на выход ЛСП могут «пролезать» не только линейные сигналы большой амплитуды, но и сигналы УПРАВЛЕНИЯ. Появление их на выходе ЛСП ведет к возникновению «пьедестала» в составе выходного сигнала. Наличие в выходном сигнале дополнительного уровня, равного по длительности управляющему сигналу, в полной мере демонстрирует процессы «пролезания» данного вида.

Иногда при проведении измерений «пьедестал» может вводиться специально, чтобы регистрировать сигналы с минимальной амплитудой. Его величину, которая должна быть весьма стабильна, возможно будет учитывать и вычи-

тать уже в цифровом коде при дальнейшей обработке зарегистрированных амплитудных спектров. Однако на практике все же стремятся уменьшить величину такого «пролезания» или устранить вовсе.

Моделью ЛСП служат аналоговые ключи в замкнутом или разомкнутом состоянии. Их включают последовательно или параллельно либо параллельно-последовательно и наоборот. Последовательные ключи при пропускании находятся в замкнутом состоянии. Параллельные ключи в таком режиме находятся в разомкнутом состоянии. Ключи в составе ЛПС относят к категории структур аналогового вида. Вариант их включения представлен на рисунке 20.

Оба ключа на рисунке 20 находятся в положении, когда входные сигналы на выход ЛСП не проходят. Сигнал УПРАВЛЕНИЕ изменяет состояние ключей на противоположное, что позволяет ЛСП передавать входные сигналы на выход. Это действительно так, потому что сопротивление замкнутого ключа считается равным нулю, т. е.  $R_{\text{КЛз}} = 0$ . Однако если ключ будет разомкнут, то его сопротивление будет весьма большим, т. е. считают, что  $R_{\text{КЛр}} = \infty$ .

В качестве ключей могут использоваться диоды и транзисторы, как полевые, так и биполярные. Появление и широкое применение полевых транзисторов практически вытеснило диоды и биполярные транзисторы из этой сферы. Полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом, используемые в виде ключей, обеспечивают сопротивление ключа в замкнутом состоянии в несколько ом. В свою очередь, сопротивление разомкнутого ключа на основе такого транзистора составляет несколько мегаом. Малая паразитная емкость и ин-

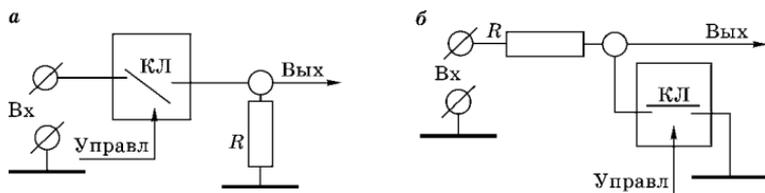


Рис. 20

Линейные схемы пропускания с последовательным (а) и параллельным (б) ключами

дуктивность каналов этих транзисторов обеспечивают для ЛСП вполне приемлемые параметры.

Характерная особенность всех ЛСП, построенных на ключах, состоит в том, что коммутирующие элементы являются составной частью схемы, передающей сигналы на выход. При этом снижается линейность ЛСП и образуется «пьедестал». Радикальным решением данной проблемы стало выведение коммутирующих элементов из линейного тракта передачи аналоговых сигналов. Это в существенной мере повысило ее параметры. Данная идея реализована в ЛСП, схема которой представлена на рисунке 21.

При отсутствии сигнала УПРАВЛЕНИЕ ключ КЛ находится в положении, указанном на рисунке 21. При такой ситуации в исходном состоянии функционирует каскад  $УК_2$  ( $T_3, T_4$ ). Выход усилителя  $Ус$  отслеживает нулевой потенциал базы транзистора  $T_3$ . Предположим, что его ток коллектора увеличился. Это вызывает снижение коллекторного потенциала. При этом уровень напряжения на выходе усилителя  $Ус$  повышается и вызывает увеличение потенциала базы и тока коллектора транзистора  $T_4$ . При такой ситуации ток транзистора  $T_3$  будет уменьшаться.

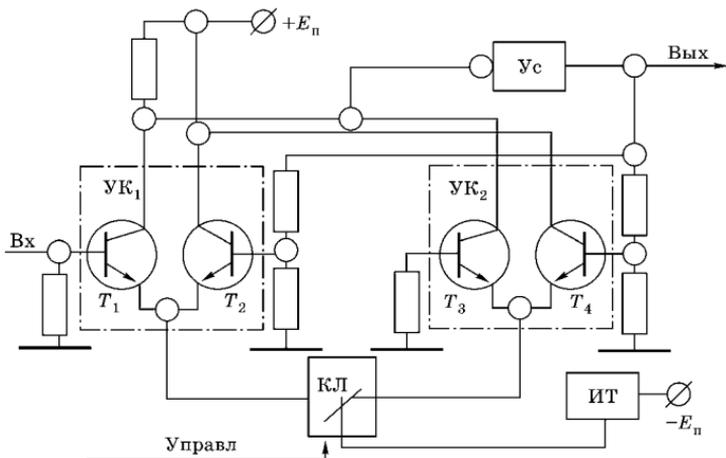


Рис. 21

ЛСП без ключей в аналоговом канале передачи сигналов:

$УК_1, УК_2$  — усилительные каскады;  $+E_n, -E_n$  — источники питания; ИТ — источник тока; КЛ — ключ;  $T_1-T_4$  — транзисторы;  $Ус$  — инвертирующий усилитель.

В таком случае каскад  $УК_2$  возвращается в исходное состояние, отслеживая таким образом нулевой потенциал базы транзистора  $T_3$ .

При поступлении сигнала УПРАВЛЕНИЕ изменяет положение ключа КЛ, что отключает схему  $УК_2$  от источника тока ИТ. Состояние схемы ЛПС изменяется и в работу вводится другой каскад  $УК_1$ . С помощью ключа КЛ его соединяют с источником тока ИТ. Теперь схема  $УК_1$  следит за потенциалом базы транзистора  $T_1$ . Оба усилительных каскада аналогичны по структуре и функционируют практически полностью одинаково.

Таким образом отслеживается и передается на выход ЛСП сигнал, поступающий на базу транзистора  $T_1$  в пределах длительности управляющего сигнала. По окончании сигнала УПРАВЛЕНИЕ устройство возвращается в исходное состояние. В работу опять включается схема  $УК_2$ . Данная организация линейных ворот получила название ЛСП компенсационного типа. Такая схема ЛПС получила широкое применение, обеспечивая высокую линейность передачи аналоговых сигналов ( $< 0,03\%$ ) с почти нулевым уровнем «пьеDESTала» ( $< 2$  мВ).

Линейные схемы пропускания выпускаются не только отдельными модулями, но их часто функционально объединяют с другими схемами. Это могут быть линейные расширители, пороговые усилители, а также устройства задержки. Иногда в одном модуле размещаются две линейные схемы пропускания. Устройства такого вида выполняются в различных стандартах ядерного приборостроения (NIM, САМАС, ВЕКТОР и т. д.).

#### 4.6. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ЦЕПИ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ

Нерегулярный, случайный характер появления сигналов с детекторных устройств нередко ведет к изменению уровня нулевой линии в цепях усиления и формирования измерительного тракта. Возникают флуктуации постоянной составляющей на выходе усилителя. При повышении

интенсивности поступления событий эти процессы еще более активизируются, усугубляя общую негативную картину снижения параметров регистрации. Появляется специфическая частотная перегрузка измерительного канала. В регистрируемом амплитудном спектре наблюдается ухудшение разрешения в виде «размытия» монолиний, т. е. пиков регистрируемого спектра, а иногда происходит их смещение, т. е. изменение положения этих пиков.

К таким же изменениям нулевой линии могут приводить и амплитудные перегрузки, вызванные появлением входных сигналов большой амплитуды. Следует заметить, что перегрузки такого плана обычно связаны с необходимостью выбора и установки большого коэффициента усиления в измерительном тракте спектрометра. При такой ситуации существенно возрастают шумовые составляющие, которые в значительной мере обостряют проблему смещения выходного уровня, а также его флуктуаций на выходе усилительных и формирующих устройств.

Еще одним из факторов, обуславливающих появление сигналов больших амплитуд, являются различные формы наложений сигналов в канале измерения. Увеличение их числа наблюдается при повышении средней скорости поступления событий на входе. В борьбе с экстремальными значениями амплитуды, что обуславливает смещение базовой линии, можно было бы использовать разнообразные виды ограничительных устройств. Однако на практике потенциал и возможности ограничения как одна из методик решения этих проблем не всегда ведут к поставленной цели, а также не дают ощутимых результатов.

Для восстановления постоянной составляющей (ВПС) применяются разные варианты схем ВПС, решающие эту проблему. Широкое распространение получила так называемая схема Робинсона (пассивного ВПС) (рис. 22а). Она состоит из двух диодов  $VD_1$  и  $VD_2$  и двух источников тока ИТ<sub>1</sub> и ИТ<sub>2</sub>, дающих токи  $2I$  и  $I$  соответственно. В исходном состоянии уровень на выходе схемы ВПС фиксируется диодами  $VD_1$  и  $VD_2$  вблизи потенциала нулевой шины. Через каждый из диодов протекают в прямом направлении одинаковые токи величиной  $I$ .

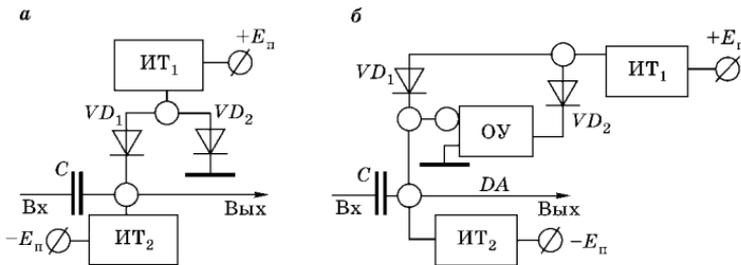


Рис. 22  
Схема пассивного (а) и активного (б) ВПС:

$\pm E_{\pi}$  — шины питания; ИТ — источник тока;  $DA$  — операционный усилитель (ОУ);  $C$  — конденсатор;  $VD$  — диод.

Входной сигнал, а это сигнал положительной полярности, запирает диод  $VD_1$ , переключая ток в диод  $VD_2$ . Окончание сигнала ведет к появлению на выходе отрицательного выброса, который при отсутствии схемы ВПС был бы причиной смещения выходного уровня. Однако в представленной схеме выброс способствует открытию диода  $VD_1$ , что обеспечивает быстрое восстановление выходного исходного уровня, через небольшое прямое сопротивление открытого диода. В такой схеме ВПС смещение нулевой линии не превышает 10 мВ, составляя, как правило, всего несколько милливольт.

Более высокими параметрами обладает схема активного ВПС (рис. 22б). Введение ее в состав схемы операционного усилителя (ОУ) привело к снижению эффективного сопротивления обоих диодов. В исходном состоянии оба они проводят одинаковые токи. Из чего непосредственно следует, что входной и выходной уровни в схеме  $DA$  будут равны нулю. Данное состояние эффективно отслеживается операционным усилителем  $DA$ , обеспечивая нулевой выходной уровень в устройстве ВПС. Использование ОУ в его составе привело к изменению названия схемы. Устройство получило название активный восстановитель постоянной составляющей.

Поступление входного сигнала запирает диод  $VD_1$ , а диод  $VD_2$  остается в проводящем состоянии. Окончание входного сигнала меняет ситуацию с обоими диодами. Скорость изменения потенциала на емкости  $C$  за счет при-

менения  $DA$  резко возрастает. При этом нелинейные области, связанные с переходом обоих диодов из одного состояния в другое, т. е. из открытого в закрытое и наоборот, существенно сузились. Процесс восстановления исходного выходного уровня идет быстрее и эффективнее, и его величина стала менее милливольт.

Устройства восстановления постоянной составляющей вошли в состав спектрометрических усилителей, получив практически постоянную «прописку» в их выходной части. Нередко в структуре усилителя можно обнаружить не одно устройство ВПС. Их число колеблется в пределах от одного до трех. Они обеспечивают независимость выходного уровня спектрометрического усилителя от флуктуаций или изменений средней частоты поступления сигналов по его входу.

В составе спектрометрического измерительного тракта устройствам ВПС отводится достаточно важная роль. Именно данным аспектом можно объяснить тот факт, что электронные средства такого назначения выпускаются в виде отдельных, самостоятельных модулей. Эти устройства, выполняя функцию ВПС, предназначены для передачи аналоговых сигналов положительной полярности от любого линейного модуля спектрометрического тракта с высокой разрешающей способностью и при весьма высоких скоростях их поступления и счета.

#### 4.7.

### ИНСПЕКТОР НАЛОЖЕНИЙ ПРИ АМПЛИТУДНОМ АНАЛИЗЕ

Краеугольным камнем проблем амплитудного анализа является наложение сигналов. Считается, что это одна из трудноустраняемых динамических погрешностей, которая усугубляется и растет с увеличением загрузки. Искажения, связанные с наложениями сигналов, имеют одну отличительную особенность — их невозможно исключить аппаратурными средствами, как это делали, например, при сдвиге нулевого уровня.

Наложение в измерительном тракте имеет место, если два и более импульса находятся в пределах своей длительности, т. е. совпадают между собой. Ситуация обусловле-

на нерегулярным случайным характером их появления. Казалось бы, для снижения числа совпадений необходимо просто уменьшить длительность сигналов. Однако такое решение, как нетрудно понять, входит в противоречие с основными условиями корректной линейной обработки детекторных сигналов.

С одной стороны, это будет несоблюдение условий сбора полного заряда. С другой стороны, это ведет к нарушению основных положений в обеспечении оптимального отношения сигнал/шум. В силу данных обстоятельств кардинальной формой борьбы с явлениями такого вида была признана режекция. С помощью особых методов и специальных электронных средств она создает условия для исключения наложенных сигналов из процесса их обработки. Искаженные детекторные сигналы за счет их наложенных просто удаляются из измерительного тракта.

Как показывает практика, число наложений, ведущих к искажениям регистрируемых амплитудных спектров, в общем случае невелико. Их количество фактически не превышает 5–10% от общего числа зарегистрированных событий и, казалось бы, не должно вызывать какую-то обеспокоенность, однако их локализация в спектре крайне неравномерна. Вся регистрация наложений происходит главным образом в старших каналах получаемого спектра. Такая ситуация вызывает и приводит к увеличению в этих каналах числа отсчетов в несколько раз. Наблюдается смещение и рост зарегистрированных событий в области больших энергий, когда эффективность детекторов нередко существенно падает.

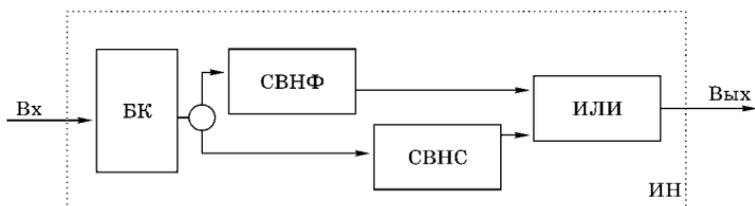
Нельзя не отметить, что зарегистрированные наложения часто нивелируют, т. е. вносят неясность и маскируют слабые эффекты и процессы, которые возникают и происходят при высоких энергиях. В практике измерений наблюдаются наложения двух видов: одно из них приходится на спад импульса, а другое — на его нарастание, т. е. на фронт импульса. В любом случае можно говорить о наложении на полезную часть сигнала. Следует отметить характерный момент для всех наложений, состоящий в смещении или сдвиге во времени сигналов, наложенных друг

на друга. В результате таких наложений появляются различные сигналы, в основном «неправильной формы».

Если сдвиг между сигналами меньше длительности их фронта, то считают, что произошло наложение на фронт сигнала. Однако если сдвиг между ними больше длительности фронта, то имеет место уже наложение на спад сигнала. В любом случае «неправильная форма» суммарного сигнала является одним из основных критериев, который позволяет констатировать и определять факт наложения сигналов. Данный критерий и сдвиг между сигналами положен с основу функционирования всего разнообразия электронных средств, которые позволяют установить факт наложения сигналов.

Устройство, предназначенное для решения этих задач, получило название инспектор наложений. Совместное использование данной техники с рядом электронных устройств обеспечивает исключение наложенных между собой сигналов при их регистрации в форме амплитудного анализа. На практике инспектор наложений весьма часто называется устройством устранения наложений или просто режектором наложений.

Структурная схема инспектора наложений (ИН) представлена на рисунке 23, в составе которой выделены основные его структуры. На вход устройства ИН поступают сигналы с выхода спектрометрического усилителя. Достаточно часто в этих же целях используется выход  $T$  предусилителя (см. рис. 5 или 7). Через буферный каскад (БК) усиления поступивший сигнал синхронно передается на



**Рис. 23**

Структурная схема инспектора наложений:

БК — буферный каскад; ИЛИ — логический элемент; ИН — инспектор наложений; СВНС — схема выделения наложений на спад сигнала; СВНФ — схема выделения наложений на фронт сигнала.

два специализированных устройства схемы инспектора наложений.

Один из них является схемой выделения наложений на фронт (СВНФ) сигнала, что фиксируется при наличии данного факта выходным импульсом. Наложение на другой фронт сигнала фиксируется другой схемой выделения наложений на спад (СВНС) в виде ее выходного импульса. Данные схемы при наличии того или иного варианта наложений формируют импульсы, которые через логический элемент ИЛИ передаются на выход схемы ИН.

Их появление на выходе устройства ИН служит признаком одного из видов наложений, которое присутствует в сигнале, поступившем на вход инспектора наложений. Выходные импульсы со схемы ИН используются для исключения «некорректных» ситуаций из измерительного процесса с помощью линейных схем пропускания, которые блокируются ими. Кроме того, импульсы с выхода схемы ИН используются при учете интенсивности наложений в ходе измерений. Не составляет труда понять, что для корректного учета и контроля таких ситуаций в ходе измерений необходимо организовать дополнительный счетный канал.

Устройства типа ИН могут быть отдельными измерительными модулями, а также являться составной частью и входить в другие структуры. Довольно часто схемы инспекторов наложений, как и восстановители постоянной составляющей, входят в состав и являются компонентами других измерительных модулей. Наиболее общепринятыми структурами их размещения служат спектрометрические усилители, усилители с задержкой, включая формирующие усилители и схемы линейного расширения импульсов.

#### 4.8.

### АНАЛОГОВЫЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ, НАЗНАЧЕНИЕ И СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ

В целом ряде установок энергетической направленности необходимо контролировать многочисленные процессы, происходящие в них. Для совокупности таких процессов характерна определенная инерционность, когда

результат воздействия проявляется с некоторым запаздыванием. Более того, в них нередко наблюдается значительное число измерительных каналов, состоящих из большого числа идентичных точек контроля, где регистрируются одни и те же параметры. При такой ситуации в этих точках применяются различные первичные преобразователи, т. е. датчики температуры, расхода, давления и т. п. Именно в таких измерительных каналах весьма масштабно используются аналоговые мультиплексоры (АМ). С их помощью можно обеспечить, например, оперативный контроль за состоянием объекта.

В общем случае мультиплексор — функциональный узел, обеспечивающий передачу информации, поступающую по нескольким входам на один выход. Выбор входа, информация с которого в виде сигналов поступает на выход, осуществляется с помощью адресных кодов, подаваемых на управляющие входы мультиплексора. В зависимости от значения кода управления по единственному каналу связи может быть передана в аналоговом виде информация с разных точек контролируемого объекта. Именно в этих целях используются различные схемы АМ.

Основу данных структур составляют различные виды аналоговых коммутаторов (АК), т. е. специализированных аналоговых интегральных схем. Их элементной базой главным образом служат униполярные транзисторы на основе КМОП-структур. Наряду с аналоговыми структурами в состав АК входят цифровые схемы управления, нередко совместимые с системой команд микропроцессора. В особых случаях (низкое сопротивление, значительные токи) вместо АК могут быть использованы герконы, т. е. отдельные миниатюрные реле с герметизированными контактами. Они также управляются уровнями логических сигналов интегральных цифровых схем.

Упрощенная схема варианта применения функционального устройства аналоговых мультиплексоров (ФУАМ) в составе системы накопления и обработки данных (СНОД) представлена на рисунке 24. Основной схемы ФУАМ является коммутатор аналоговых сигналов (КАС). На его инфор-

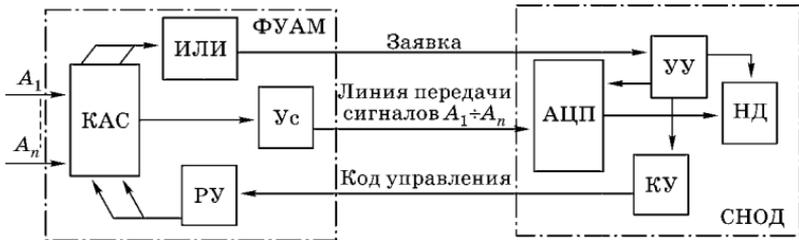


Рис. 24

Вариант применения ФУАМ в составе СНОД:

$A_1$ – $A_n$  — аналоговый вход; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ИЛИ — логический элемент; КАС — коммутатор аналогового сигнала; КУ — кодирующее устройство; НД — накопитель данных; РУ — регистр управления; СНОД — система накопления и обработки данных; Ус — усилитель; УУ — устройство управления; ФУАМ — функциональное устройство аналогового мультиплексирования.

мационные входы  $A_1$ – $A_n$  поступают аналоговые сигналы каждого из первичных преобразователей. На управляющие входы КАС с регистра управления (РУ) поступает код, значение которого подключает выбранный вход КАС к его выходу. Любой из сигналов, поступивших на информационные входы КАС, формируется и через логический элемент ИЛИ передается на СНОД в виде сигнала ЗАЯВКА, инициируя ее запуск и работу.

Аналоговые сигналы, получаемые на выходе КАС, через усилитель Ус подаются в канал передачи данных на СНОД. В ее составе следует выделить устройство управления (УУ), накопитель данных (НД), т. е. память необходимого объема и достаточного быстродействия, а также кодирующее устройство (КУ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Именно АЦП осуществляет трансформацию аналоговых сигналов, поступающих с выхода ФУАМ, в цифровой код, который затем фиксируется в НД.

Схема УУ инициирует запуск АЦП, а также управляет работой схемы КУ, под контролем которой функционирует регистр РУ, входящий в структуру ФУАМ. В накопитель данных НД, помимо кода АЦП, заносится и фиксируется информация о числе сигналов ЗАЯВКА, поступивших на вход УУ, который тоже находится в составе СНОД. Характерно, что работа УУ может быть организована таким

образом, что все информационные входы  $A_1-A_n$  схемы КАС поочередно будут подключаться к линии передачи аналоговых сигналов из ФУАМ в СНОД.

В данном случае можно уже говорить о системе регистрации данных особого вида, которую называют еще системой обегавшего контроля. При этом разные точки контролируемого объекта по очереди проверяют заданный уровень параметров. Практика применения таких систем демонстрирует их высокую эффективность. Они широко используются в управлении различными технологическими процессами. Системы такого рода находятся вне конкуренции при контроле над параметрами, определяющими состояние и работу объекта или установки в целом. Следует заметить, что число первичных преобразователей в этих системах может достигать до нескольких сотен и более.

Основными рабочими параметрами самих АМ принято считать число информационных входов, а также разрядность кода управления, что определяется схемой КАС. Наибольшее распространение получили АМ на 4, 8 и 16 входов. Естественно, что двоичный масштаб их прироста может быть продолжен практически без каких-либо технических ограничений. Понятно, что разрядность кода управления зависит от числа аналоговых входов. При минимальном их числе это будет 2-разрядный код, а при 16 входах необходим 4-разрядный двоичный код.

К другим рабочим параметрам АМ относят сопротивление замкнутого аналогового ключа ( $\sim 100 \text{ Ом}$ ) и его разомкнутое состояние ( $\sim 100 \text{ МОм}$ ). Еще отметим время переключения, т. е. установления нового рабочего состояния, точность коэффициента передачи и перекрестные помехи или наводки, возникающие в каналах при их переключении. Время установления лежит в пределах от десятка наносекунд до единиц микросекунд и в существенной мере зависит от используемой элементной базы и ее структуры. Характерно, что точность передачи составляет сотые доли процента, а величина перекрестной помехи не превышает 0,005%.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. С какой целью применяют пороговый усилитель и где он располагается в измерительном канале?
2. Для чего служат усилители с задержкой выходного сигнала и какие элементы задержки используются?
3. Для какой цели применяются расширители импульсов с линейной характеристикой передачи сигналов?
4. Суть линейного суммирования аналоговых сигналов, типовая схема такого усилителя и его компоненты.
5. Для чего предназначены линейные схемы пропускания (ЛСП) и какие ключи используются в них?
6. Чем вызвана необходимость применения схем восстановления постоянной составляющей?
7. Где размещаются схемы восстановления исходного уровня в измерительном тракте при амплитудном анализе?
8. Какую функцию выполняет инспектор наложений в измерительном канале?
9. Какие виды наложений сигналов происходят при амплитудном анализе и форма их проявления?
10. Роль инспектора наложений в измерительном канале. Почему его нередко называют режектором наложений?
11. Какие задачи можно решить с помощью устройств аналогового мультиплексирования?

РАЗДЕЛ II

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА  
НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
ДЕТЕКТОРНЫХ УСТРОЙСТВ



## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Информация, представленная во втором разделе, связана с нелинейными методами обработки сигналов детекторных устройств и электронной техникой их обеспечения. Вначале рассматривается основная проблема прецизионных измерений, уровень и качество которых обуславливается шумовыми составляющими спектрометрического тракта. Отмечаются наиболее характерные факторы их проявления, преимущественные места дислокации, а также своеобразие возникновения. Обсуждаются меры, которые необходимо принять для уменьшения сферы и степени негативного проявления шумов в измерительном тракте.

В решении измерительных задач ядерной физики применяются как линейные, так и нелинейные методы выделения информации с детекторов излучений. При регистрации широко используется как аналоговая, так и дискретная форма ее представления, в виде различных импульсов. Раскрывается суть нелинейного метода, когда в сигналах пропорциональность и линейность связи с энергией регистрируемой частицы будет до некоторой степени утрачена. Рассмотрены основные версии нелинейных методов, их базовые операции, наиболее характерные в таких случаях.

Представлены унифицированные варианты устройств дискриминации, применяемые при амплитудном анализе. Приведены технические характеристики типового

устройства дискриминации. Сформулированы требования к формирователям временной отметки, известные как быстрые дискриминаторы. Рассмотрены их преобладающие разновидности, включая повышение их возможностей и расширение сферы применения таких устройств.

Обсуждаются методы отбора событий по критерию одновременного их поступления. Данная версия реализует-ся методами совпадений и антисовпадений. Приведены их основные положения и сферы применения. Дана структура средств, реализующих эти методы, их технические характеристики, включая некоторые разновидности схем совпадений. Отмечены особенности экспериментальных исследований на современном этапе и некоторые тенденции в развитии средств отбора событий.



## ГЛАВА 5

# ШУМЫ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ТРАКТА И БОРЬБА С НИМИ

Шумовой фактор принято считать одним из неблагоприятных аспектов при любых измерениях. При амплитудном анализе данный фактор естественно снижает ключевой параметр во всех спектрометрах энергии ядерного излучения — их разрешение. Наличие шумов в измерительном тракте, как показывает практика измерений, ведет к ухудшению разрешения, т. е. «уширение» пиков в регистрируемых амплитудных спектрах. Предлагается рассмотреть некоторые моменты данного вопроса, включая природу шума, меры по снижению его негативных проявлений и проблемы уменьшения его вклада в результаты измерений.

### 5.1. ДИСПРОПОРЦИЯ ПРИ ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦАМИ В ДЕТЕКТОРАХ

Для целого ряда детекторных устройств форма зависимости «энергия — заряд» носит в основном линейный характер. Впрочем, наряду с сохранением пропорциональности между энергией, утраченной заряженной частицей в объеме детектора, и зарядом, собранным на его электродах, имеют место факты различных нарушений данного соответствия. Существует совокупность причин, создающих основу для таких отступлений. В перечне наблюдаемых отклонений отмечают разные обстоятельства и ситуации, которые зависят от природы излучения, типа детек-

тора, режима его работы, длительности процесса измерений и т. п. Среди таких факторов можно выделить следующие аспекты:

- отступление от критерия полноты потери энергии, т. е. неполная утрата энергии частицами в детекторе;
- нарушение однородности объема детектора, т. е. наличие дефектов в его структуре;
- нестационарные процессы взаимодействия исследуемых частиц с материалом детектора, т. е. спонтанный характер их взаимосвязи;
- флуктуации в эффективности и статистическом характере преобразования энергии в объеме детектора;
- изменения характеристик детектора со временем, т. е. их нестабильность.

Не рассматривая скрупулезно и обстоятельно их природу, а также условия регистрации ядерного излучения, отметим лишь основные моменты, характерные для каждой из таких ситуаций. Материал детектора должен учитывать вид излучения (нейтральные или заряженные частицы либо фотоны и т. д.). Габариты детекторного устройства должны быть больше максимального пробега регистрируемой частицы в заданном направлении, т. е. учитывать геометрию эксперимента и соответствовать решаемой задаче.

Это будет обеспечивать, с одной стороны, более полную передачу энергии частицы в чувствительный объем детектора, а с другой стороны, увеличивать его эффективность регистрации. Тем не менее негативные моменты обусловлены граничными эффектами при регистрации излучения на краях чувствительного объема детектора. Этому же будут способствовать утечки носителей заряда, их рекомбинация и т. д. Все эти явления по своей природе представляют собой случайные процессы.

Вторая ситуация обусловлена макроскопическими нарушениями в материале детектора. Наличие неоднородностей, примесей в его рабочем объеме, присутствие различных включений, дефекты и нарушения его структуры также относятся к категории негативных факторов. Они вызывают дополнительные потери носителей зарядов, их рекомбинацию и т. п., а также ведут к рассеянию, отра-

жению и потерям света в сцинтилляционных детекторах. Все эти процессы носят нестационарный характер.

Таким же законам подчиняется взаимодействие частиц с материалом детектора. Своеобразие данного факта в виде нестационарного, т. е. случайного характера воздействия ядерных частиц на материал детектора, зафиксировано в третьей из представленных ситуаций. Говорят о средней энергии, которую частица затрачивает на образование пары носителей зарядов. Эта энергия определяется типом детектора, его материалом, формами дефектов в нем, видом и этапами передачи энергии, режимом его работы и т. д.

Наряду с этими аспектами в детекторах наблюдаются флуктуации в эффективности и статистическом характере передачи и преобразования энергии. Возникающие процессы имеют место и характерны для начальных этапов возбуждения и образования зарядов в детекторе. На последующих этапах наблюдается их утрата за счет диффузии и рекомбинации. Данная ситуация усугубляется наличием примесей в газовых средах, в разных полупроводниковых материалах и сцинтилляторах, а также воздействием на них внешних факторов (изменением питания, температуры и т. д.).

Завершает представленный перечень негативных процессов нестабильность параметров детекторов со временем. Изменения характеристик детектора со временем тоже вносят деструктивный вклад и неопределенности в протекание процессов передачи (энергия — заряд). Трудности вызывают нестабильности, соизмеримые или меньшие времени измерения. Долговременные изменения параметров обычно учитываются и корректируются посредством калибровки аппаратуры измерительной установки.

## 5.2.

### ШУМОВЫЕ ФАКТОРЫ В УСТРОЙСТВАХ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ППД

Точность измерения энергии ядерных частиц с помощью полупроводниковых детекторов (ППД), как уже было отмечено, существенно выше, чем любыми другими видами детекторов. Действительно, для образования пары но-

сителей заряда (электрон и дырка) в объеме детектора, например, из кремния под воздействием излучения необходима энергия, равная в среднем  $\sim 3,66$  эВ (для германия  $\sim 2,96$  эВ).

В газонаполненных детекторах эта величина гораздо больше и составляет  $\sim 30$  эВ, а для вспышки в сцинтилляторе необходимо уже свыше  $300$  эВ. Таким образом, при одной и той же энергии, утраченной частицей в чувствительном объеме детектора, выходной сигнал с ППД по величине почти в  $8$  раз больше (для кремния), чем в других детекторных устройствах. При этом статистические флуктуации величины выходного сигнала для данного детектора меньше почти в  $2\sqrt{2}$  раза.

Однако реализация этих преимуществ на практике сталкивается с наличием ряда проблем. Хотя внешний источник питания, создающий электрическое поле для собирания заряда, смещает ППД в обратном направлении, его чувствительный объем все еще остается электропроводным. Это вызывает постоянный, пусть и небольшой по величине, ток обратного направления. Такое явление, в частности, затрудняет сбор носителей зарядов на соответствующих электродах детектора.

Характерно, что флуктуации тока обратной проводимости оказываются на деле негативными факторами, влияющими на процесс собирания зарядов в детекторе. Случайный характер изменения такого тока является причиной появления в ППД одной из шумовых его составляющих. Другая причина шума в ППД обусловлена присутствием в его чувствительном объеме ловушек, а также наличием локальных центров захвата носителей заряда.

Структуры такого вида, возникающие в составе ППД, могут задерживать носители заряда или вызывать их рекомбинацию. Спонтанный характер этих процессов увеличивает шумовую составляющую детектора, уменьшая величину сигнала на его выходе. Примечательно, что в полупроводниках с низкой электропроводностью объема детектора концентрация центров захвата в нем обычно достаточно велика.

Еще одним из факторов, связанных с проблемой регистрации излучения, является неоднородность кристалла этих детекторов. В предыдущем параграфе данный негативный аспект детекторов был уже представлен как наличие дефектов и нарушений в их структуре. Такая ситуация для ППД, в свою очередь, тоже ведет к росту шумовых составляющих в его выходных сигналах.

Наравне с этими аспектами, характерными для ППД, необходимо отметить еще ряд моментов. Это прежде всего присутствие нерегулярных токов утечки, наличие процессов релаксации, разброс треков ионизации по объему детектора, т. е. по координатам и углам и т. п. Все эти факторы, изменчивые по своей природе, непосредственно ведут к росту шумовых составляющих в детекторных устройствах данного вида.

Информация, получаемая на выходе детектора ядерного излучения, носит гетерогенный, т. е. многогранный, характер. Действительно, из выходных сигналов можно получить и использовать информацию об энергии, виде частицы, времени ее поступления, угле вылета и т. п. Однако не вся информация, поступающая с детектора в виде сигналов, является полезной и используется в равной мере.

Причиной этого являются разные наводки, помехи, флуктуации и т. п., проявляющиеся в виде сигналов. Они могут быть вызваны внутренними факторами или связаны с проявлением внешних воздействий. Среди них можно отметить явления как естественного происхождения (грозы, магнитные бури и т. д.), так и техногенного (коммутационные помехи, сварка и т. п.). Тем не менее в их составе, как показывает практика, будут доминировать сигналы, обусловленные разнообразными составляющими шумовых факторов.

### 5.3.

#### **УСИЛИТЕЛЬ — АКТИВНЫЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК И ЕГО ШУМОВЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ**

На основании общих положений теории активных четырехполюсников присутствие в них той или иной шумовой составляющей позволяет перевести их в категорию

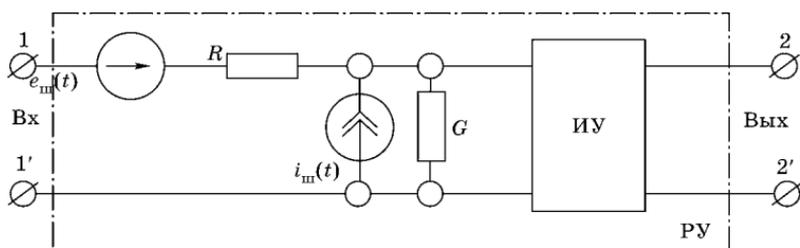


Рис. 25

Схема реального усилителя,  
представленная в виде шумящего четырехполюсника:

ИУ — идеальный, не шумящий усилитель; РУ — реальный усилитель.

шумящих четырехполюсников. В таком случае любой усилитель с позиции активного четырехполюсника можно считать шумящим четырехполюсником. В свою очередь, его можно представить в виде идеальной структуры, т. е. нешумящей схемы, на входе которой включены два эквивалентных источника шума (рис. 25).

Один из них является источником тока  $i_{\text{ш}}(t)$  и включен параллельно входным зажимам четырехполюсника. Другой же, включенный во входную цепь последовательно, является источником ЭДС  $e_{\text{ш}}(t)$ . Они называются еще генераторами тока и напряжения. Эти элементы моделируют и представляют всю палитру шумов. Шумы связаны с флуктуациями параметров разных физических процессов теплового, мерцающего, дробового, поверхностного характера или их совокупностью.

Наличие двух пассивных элементов (резистивного и проводимости) на входе идеальной схемы отражает факт реальности и естественности каждого из источников шума. Уровни шумовых сигналов обоих генераторов выбираются так, чтобы выходной шум эквивалентной структуры был такой же, как у реальной схемы. Важной характеристикой шумов является их спектральная плотность. Этот параметр шума выражается через средний квадрат напряжения или тока, приходящийся на единичный интервал полосы пропускания усилителя, т. е. через  $\bar{e}_{\text{ш}}^2 / \Delta f$  или  $\bar{i}_{\text{ш}}^2 / \Delta f$  соответственно.

В радиотехнике и электронике шумовые параметры усилителей характеризуются еще коэффициентом шума  $F_{\text{ш}}$ . Под данным параметром понимают отношение мощности входного сигнала  $P_{\text{с.вх}}$  к мощности входного шума  $P_{\text{ш.вх}}$ , т. е.  $P_{\text{с.вх}}/P_{\text{ш.вх}}$ , деленное на такое же отношение выходного сигнала, т. е.  $P_{\text{с.вых}}/P_{\text{ш.вых}}$ . Таким образом, коэффициент шума  $F_{\text{ш}}$  усилителя, как любого активного линейного четырехполюсника, определяется соотношением

$$F_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{с.вх}} / P_{\text{ш.вх}}}{P_{\text{с.вых}} / P_{\text{ш.вых}}}.$$

Из этого выражения видно, что коэффициент шума  $F_{\text{ш}}$  показывает, во сколько раз отношение сигнала к шуму на выходе активного четырехполюсника уменьшается по сравнению с аналогичным отношением на его входе. Если принять, что шумы источника сигнала определяют предел чувствительности усилителя, то коэффициент  $F_{\text{ш}}$  демонстрирует, как близко к данному пределу может «продвинуться» такой усилитель.

Наряду с коэффициентом шума  $F_{\text{ш}}$  принят и используется еще один шумовой параметр. Оказалось, что для характеристики шумовых свойств активных четырехполюсников с малым уровнем шума на практике более удобно использовать понятие эффективной температуры шума  $T_{\text{ш.эф}}$  входа четырехполюсника. Для такого активного компонента схемы данный параметр определяется соотношением

$$T_{\text{ш.эф}} = (F_{\text{ш}} - 1) \cdot T_0,$$

где  $F_{\text{ш}}$  — коэффициент шума активного четырехполюсника;  $T_0$  — температура, активного четырехполюсника  $T = 293 \text{ К}$ . При этом накладывается условие, чтобы собственные шумы четырехполюсника имели характер белого шума. Следует заметить, что тепловой шум является по своему характеру белым шумом.

#### 5.4. ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТА РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Характерно, что в ядерной электронике параметр в виде коэффициента шума используется довольно редко. Это связано с тем, что в практике измерений в первую очередь интересуются другой величиной, которая определяется по зарегистрированному моноэнергетическому пику как его ширина на полувысоте. Это разрешение измерительного канала спектрометра, которое обусловлено суммарным уровнем его шумов. Следует отметить, что коэффициент шума  $F_{\text{ш}}$  характеризует усилитель в основном в узкой полосе частот, а интересы спектрометрии находятся и реализуются в весьма широком частотном диапазоне.

Известно, что шумы усилителей выражаются в единицах напряжения и по величине, как правило, составляют малые доли вольта, т. е. в пределах 3–5 мкВ. В экспериментальных методах ядерной физики уровень шумов выражается уже в единицах заряда или энергии. Это также является одной из особенностей представления и учета шумов при измерении параметров ионизирующего излучения.

Допустим, в детекторе величина потеря частицей энергии составляет  $E$  эВ. При этом образуется  $N = E/\hat{w}$  электронно-дырочных пар, поскольку на образование пары носителей заряда идет  $\hat{w}$  эВ. Это приводит к выделению заряда  $Q$  на суммарной входной емкости предусилителя  $C_{\text{экв}} = C_{\text{д}} + C_{\text{эс}}$ . Если постоянная входа  $\tau_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} \cdot C_{\text{экв}}$  велика по сравнению со временем  $\tau_i$  собирания заряда, созданного частицей в объеме детектора, то образуется сигнал с амплитудой, равной  $U = Q/C_{\text{экв}}$ .

В таком случае можно утверждать, что шумовая составляющая  $U_{\text{ш}}$  на входе предусилителя эквивалентна величине шумового заряда детектора и равна  $Q_{\text{ш}} = U_{\text{ш}} \cdot C_{\text{экв}}$ . В свою очередь, такой заряд обусловлен и связан равноценной утратой шумовой энергии  $E_{\text{ш}}$  в детекторном устройстве. При такой ситуации, не теряя общности рассуждений, можно уже говорить об уровне шумовых энергетиче-

ческих потерь детектора. В данном случае их величина будет равна

$$E_{\text{ш}} = Q_{\text{ш}} \cdot \frac{\hat{w}}{q_0},$$

где  $q_0$  — заряд электрона, равный  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Следовательно, можно с полным основанием отмечать как энергетические, так и зарядовые составляющие шума, измеряя их в электронвольтах и кулонах соответственно. Эти параметры как разновидность шумовых характеристик измерительного тракта спектрометра широко используются на практике. Уже упоминалось, что в измерениях, связанных с определением энергии ионизирующего излучения, широко применяются различные виды полупроводниковых детекторов совместно с зарядочувствительными предусилителями (ППД ЗЧП). Такое сочетание устройств в составе ППД и ЗЧП доминирует в спектрометрии ядерных излучений, обеспечивая достаточно высокие параметры измерений.

Тем не менее необходимо рассмотреть шумовые свойства данной структуры. В рамках существующих представлений устройство ЗЧП совместно с ППД содержит два источника шума. Один из них является генератором тока  $i_{\text{ш}}$ , подключенным параллельно детектору и входной цепи ЗЧП (рис. 26). Его принято называть просто параллельным шумом.

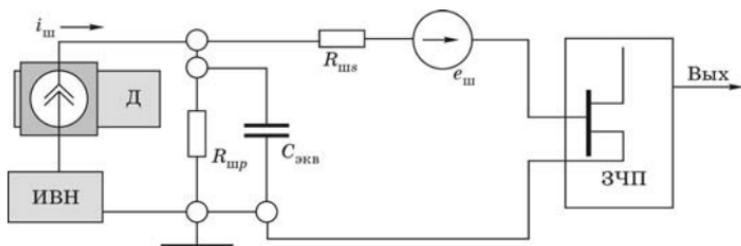


Рис. 26

Эквивалентная шумовая схема в составе ППД и ЗЧП:

$D$  — детекторное устройство типа ППД;  $C_{\text{экв}}$  — эквивалентная емкость входной цепи; ЗЧП — зарядочувствительный предусилитель; ИВН — источник высокого напряжения.

Спектральная плотность такого источника шума будет равна

$$\frac{\bar{i}_{ш}^2}{\Delta f} = \frac{4kT}{R_{шр}},$$

где  $kT$  — энергия теплового движения зарядов (при  $T = 300$  К),  $kT = 4 \cdot 10^{-21}$  Дж;  $R_{шр}$  — результирующее параллельное шумовое сопротивление. Данный шумовой источник связан с флуктуациями токов детектора, тока затвора входного полевого транзистора (ПТ) ЗЧП, включая суммарные токи утечки на входе схемы.

Другой источник шумового напряжения  $e_{ш}$ , подключенный последовательно входной цепи ЗЧП, является генератором шумового напряжения. По аналогии с первым источником шума его принято считать просто последовательным шумом. Спектральная плотность этого источника шума равна

$$\frac{\bar{e}_{ш}^2}{\Delta f} = \frac{4kT}{R_{шс}},$$

где  $kT$  — энергия теплового движения зарядов (при  $T = 300$  К),  $kT = 4 \cdot 10^{-21}$  Дж;  $R_{шс}$  — результирующее последовательное шумовое сопротивление. Данный источник шума  $e_{ш}$  больше связан с входными цепями ЗЧП и, в частности, учитывает флуктуации тока канала в ПТ.

Суммарное шумовое воздействие в составе ППД и ЗЧП можно представить в виде суммы составляющих обоих шумовых источников. В таком случае спектральная плотность шума  $\bar{u}_{ш}^2 / \Delta f$  в сочетании таких устройств будет иметь вид

$$\frac{\bar{u}_{ш}^2}{\Delta f} = \left( \frac{\bar{i}_{ш}^2}{\Delta f} \right) + \left( \frac{\bar{e}_{ш}^2}{\Delta f} \right) = \frac{4kT}{R_{шр}} + \frac{4kT}{R_{шс}}.$$

Минимальная величина шумовых составляющих для ППД, выраженная в единицах заряда, будет составлять около  $7 \cdot 10^{-18}$  Кл. Величина шума для этого же детектора в энергетических единицах будет находиться в пределах нескольких сотен электронвольт, т. е.  $E_{ш} \sim 100\text{--}300$  эВ.

### 5.5. ШУМЫ В НАЧАЛЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА И МЕРЫ ИХ СНИЖЕНИЯ

Если в спектрометре энергий высокого разрешения на основе ППД не принять специальных мер, то шумы заметно ухудшают его разрешение. Наибольший вклад в снижение разрешения вносят шумы, возникающие в начале измерительного канала спектрометра, а именно в детекторе и предусилителе, т. е. в ППД и ЗЧП. Далее эти шумы будут усиливаться в последующих каскадах спектрометрического усилителя, что ведет к падению разрешения. При этом резко ухудшаются условия транспортировки детекторных сигналов, понижается качество их формирования по всему тракту амплитудного анализа.

Снижение шума ППД обеспечивается прежде всего выбором величины оптимального напряжения его питания. Эффективным средством уменьшения собственных шумов детектора этого вида является глубокое его охлаждение (вплоть до температуры жидкого азота  $-196^{\circ}\text{C}$ ). В этих целях ППД помещается в специальный термостат в виде сосуда Дьюара, заполненного жидким азотом.

Ряд ППД типа  $\text{Si}(\text{Li})$  и  $\text{Ge}(\text{Li})$  должны храниться при такой же температуре, в противном случае литий покидает материал детектора, который утрачивает свои свойства. Поскольку жидкий азот испаряется, то необходимо периодически восполнять такую естественную его убыль. Данная ситуация имеет место и создает определенный дискомфорт в практике эксплуатации и применении детекторов этого вида.

Развитие и освоение технологии получения сверхчистого германия (high purity  $\text{Hr Ge}$ ) и такого же кремния ( $\text{Hr Si}$ ) привело к созданию нового вида ППД. Эти детекторы можно содержать при комнатной температуре без утраты и деградациии их свойств. Высокие же характеристики они приобретают лишь во время измерений, когда происходит их охлаждение до  $-196^{\circ}\text{C}$  за счет снижения уровня собственных шумов.

Ведутся интенсивные поиски новых полупроводниковых материалов для детекторов. Достижение в них высо-

кого энергетического разрешения обусловлено более эффективным и полным собиранием зарядов, большим временем жизни их носителей (дырки и электроны), а также высокой их подвижностью. Они должны иметь большую ширину запрещенной зоны, что обеспечивает минимальные обратные токи, а значит, способствует получению малого шума детектора.

При этом важной остается проблема обеспечения работоспособности детектора с высокими характеристиками без принудительного его охлаждения, т. е. при нормальной комнатной температуре (20°C). Среди таких материалов можно отметить теллурид кадмия CdTe и йодид ртути HgI<sub>2</sub>. Представляет интерес и привлекает внимание ученых арсенид галлия GaAs и ряд других полупроводниковых материалов.

Шумовые свойства ЗЧП в первую очередь определяются головным активным элементом усилительного каскада в составе полевого транзистора (ПТ). Интенсивность шума в ПТ связана с его рабочими и температурными режимами. Преобладающим является тепловой шум канала, который, по мнению ряда специалистов, принципиально неустраним, так как связан с самим механизмом усиления. Все остальные источники шума в транзисторах этого вида обусловлены несовершенством исходных материалов и технологиями изготовления.

Полевые транзисторы обладают важной отличительной особенностью — они сохраняют работоспособность при глубоком охлаждении. При понижении температуры в этих транзисторах существенно падает уровень шумов, возрастает его крутизна, а ток затвора при этом уменьшается. Транзистор данного вида в составе зарядочувствительной секции предусилителя размещается вблизи детектора, который располагается, как нам известно, в специальном термостате (сосуд Дьюара). При таком охлаждении интенсивность всех шумов в полевых транзисторах снижается почти в 2 раза.

Уменьшению уровня шума в ЗЧП способствуют целенаправленные исследования шумовых характеристик ПТ. Осуществляется их тщательный отбор по данному критерию. Применение в предусилителе последовательного

согласования кабеля связи с основным усилителем существенно снижает уровень шума (почти в 10 раз) по сравнению с параллельным вариантом согласования кабеля, но уже на входе усилителя. Все эти меры способствуют и обеспечивают достижение высокого разрешения при амплитудной спектрометрии.

### 5.6. СНИЖЕНИЕ ШУМА ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ

Известно, что спектрометрический усилитель (СПУ) является следующим звеном измерительного тракта, где влияние шумовых факторов наиболее существенно. Его структура относится к разряду многокаскадных усилителей. Их входные каскады и компоненты схем наиболее критичны для различных шумовых составляющих. Именно эти части схем в таких усилителях вызывают особую озабоченность разработчиков, так как они требуют к себе дополнительного внимания. Они проявляют особый интерес к применению малозумящей элементной базы. Это как пассивные элементы (резисторы и конденсаторы), так и активные в виде различных транзисторов и операционных усилителей. Активные компоненты обычно проходят тщательный отбор по уровню собственных шумов.

Появление схем ОУ с высокими параметрами и низким уровнем собственных шумов открыло новые пути использования их в составе активных структур различного плана. Для снижения уровня шума измерительного тракта на входе СПУ применили активные делители напряжения. Ослабление уровня входного сигнала осуществляется переключением резисторов в петле обратной связи ОУ, вследствие чего образуется схема активного аттенюатора. Данный вариант дискретного изменения коэффициента передачи в спектрометрическом тракте в значительной мере понизил уровень шума на входе СПУ.

Уменьшению вклада шумовых составляющих в измерительный процесс способствовали ввод и применение в составе СПУ активного дифференцирования и интегриро-

вания на базе ОУ. В этом случае такие цепочки также были введены и коммутировались в петле обратной связи ОУ. Возрос интерес к активным фильтрам, их применению, что тоже привело к положительным результатам. Данные технические решения позволили достаточно успешно решить проблемы шума как в СПУ, так и в измерительном тракте. Совокупность таких решений в значительной мере способствовала повышению энергетического разрешения в спектрометрах ядерных излучений, функционирующих на основе ППД.

Необходимо заметить, что достаточно эффективным средством борьбы с шумами в каналах передачи информации, по мнению целого ряда специалистов, служат методы дискриминации. Это выделение сигналов, параметры которых превышают установленный уровень. Задавая величину параметра выше уровня шумов, исключают их влияние и вклад в результаты измерений. Данный вариант выделения полезной информации относится к нелинейным методам обработки сигналов, которые будут рассмотрены в дальнейшем.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему возникает и имеет место диспропорция в потерях энергии частицами в материале детектора?
2. Чем обусловлены процессы утраты энергии частицами в детекторах и что для них характерно?
3. Почему точность измерения энергии ядерного излучения полупроводниковым детектором выше, чем другими детекторами?
4. Причины возникновения шумовых составляющих в полупроводниковом детекторе.
5. Наводки и помехи, влияющие на измерения, характер и причины их возникновения.
6. В какой форме и в виде какой структуры можно представить реальный усилитель?
7. Какие параметры характеризуют шумовые свойства реального усилителя?
8. В каком виде обычно представлены и оцениваются шумы в спектрометрии ядерных излучений?
9. На какой параметр измерительного тракта шумы влияют негативно, ухудшая его?
10. Назовите основные меры, которые применяются для снижения шумов в спектрометрическом тракте.
11. Какие схемотехнические решения позволяют существенно уменьшить уровень шумов в СПУ?



## ГЛАВА 6

# НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ И ОТБОРА ДЕТЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ

При решении задач ядерной физики широко используются как линейные, так и нелинейные методы получения информации с детекторов ионизирующего излучения. Это направление электронных методов обработки детекторных сигналов будет рассмотрено на данном этапе. Предметом обсуждения станут преобладающие принципы, которые положены в основу функционирования электронной техники на базе нелинейных методов. Электронные средства такого плана широко применяются при изучении параметров ядерных превращений.

### 6.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Как показывает практика измерений, все многообразие выходных сигналов с детекторов ионизирующего излучения можно отнести к трем основным группам. Своеобразие первой из них заключается в пропорциональном линейно-импульсном режиме ее работы. В этом случае в амплитуде выходных детекторных сигналов содержится информация о потерях энергии в чувствительном объеме детектора зарегистрированной им частицы ионизирующего излучения.

Полной противоположностью такому варианту работы является вторая группа детекторов, которые функ-

ционируют в непропорциональном импульсном режиме. В этом случае можно говорить только лишь о факте и времени регистрации ядерной частицы. Для третьей группы детекторных устройств характерна непрерывная форма, которая еще известна как токовый режим их работы.

Линейные методы обработки детекторных сигналов можно и целесообразно применять в первом и последнем случаях. Вряд ли имеет смысл использовать эти методы во втором случае, так как в сигналах детекторов этой группы информация об энергии, потерянной в нем частицей, утрачена. Можно говорить только о моменте ее регистрации. При этом линейные методы — всего лишь стандартный прием увеличения амплитуды сигнала в целях дальнейшей его обработки.

Помимо этих аспектов, важно отметить еще некоторые факты, состоящие в том, что в целом ряде детекторных сигналов отсутствует полезная информация. Это, как правило, сигналы сопутствующего или стороннего излучения. Они могут быть еще шумовыми сигналами самого детектора и его составных элементов. Все разнообразие негативных факторов, которое сопровождает измерительный процесс, обуславливает, по сути, данную категорию сигналов.

В их составе импульсы фонового излучения, а также сигналы экстремальных параметров, т. е. выходящих за пределы диапазона измерений. Последние из них обычно связаны с регистрацией высокоэнергетических частиц космического происхождения. При измерениях не вся информация, поступающая с детекторов ядерного излучения, является полезной и может быть использована в равной мере.

Помимо фонового излучения, на выходе детектора могут быть сигналы, которые никак не связаны с ионизирующим излучением. Причиной их появления являются разного рода наводки, помехи, флуктуации и т. п. Они могут быть внутреннего характера, а также обуславливаться внешними факторами, т. е. влиянием и воздействием окружающей среды, и быть или естественного, или, что наиболее вероятно, техногенного происхождения.

Все сигналы, как показывает практика измерений, можно считать либо информативными, либо нет. В этой ситуации важная роль отводится нелинейным методам обработки детекторных сигналов — ограничение, дискриминация и селекция сигналов. Последняя из них использует самые разнообразные критерии отбора событий, в том числе и нелинейные методы, и обладает наибольшими возможностями. Отбор можно вести по широкому перечню признаков и параметров (полярность, форма сигналов, их амплитуда, длительность, момент поступления, частота следования и т. п.).

## 6.2. ВИДЫ СИГНАЛОВ И СФЕРА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Различные варианты систематизации сигналов позволяют отнести практически все детекторные сигналы к категории аналоговых. Аналоговый сигнал — это непрерывная (в определенных пределах) форма изменения параметра (ток или напряжение) в составе линейного электронного устройства, а также на его входе и выходе. Непрерывная форма аналогового сигнала исключает возможность непосредственного применения цифровых устройств и средств вычислительной техники, т. е. ЭВМ, для регистрации и обработки экспериментальных данных.

Разнообразные варианты счетных методов, обработка данных эксперимента, его мониторинг, как и практика применения ЭВМ на различных этапах экспериментальных исследований, вызвали необходимость использовать уже иную, дискретную форму сигнала. Сигналы такого вида называются еще и цифровыми. Цифровым сигналом принято считать прерывистую, в определенных пределах, форму дискретного изменения параметра (ток или напряжение) в составе электронного логического устройства, а также на его входе и выходе.

В основу функционирования средств цифровой и вычислительной техники положены сигналы дискретной формы. Их формируют и выделяют, используя нелинейные методы обработки непрерывных сигналов. Эти мето-

ды, как и получаемая дискретная форма сигналов, доминируют во многих измерительных процессах. В ходе измерений практически вся аналоговая форма сигнала с помощью специальных электронных устройств и схем на заключительном этапе обработки трансформируется в дискретную.

Арсенал измерительной электронной техники, принятый на вооружение экспериментальными методами ядерной физики, достаточно внушителен и разнообразен. Наличие таких средств позволяет полноценно и успешно решать задачи эксперимента. В составе такой техники можно выделить две доминирующие группы электронных средств.

Первая из них относится к технике микросекундного диапазона и служит для решения задач физики низких и средних энергий, т. е. до 20–30 МэВ. Другая группа, решая проблемы физики высоких энергий, т. е. свыше 30 МэВ, использует электронную технику наносекундного диапазона. Оба направления электроники располагают методами, техническими решениями и электронными средствами перевода аналогового сигнала в дискретную форму.

### **6.3. НЕЛИНЕЙНЫЙ МЕТОД — УНИФИЦИРОВАННЫЙ ВАРИАНТ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ С ДЕТЕКТОРНЫХ УСТРОЙСТВ**

Наряду с линейными методами в практике экспериментальных исследований широко применяются нелинейные методы получения информации с детекторов ядерного излучения. Такой вариант выделения информации играет ключевую роль во всем многообразии электронных методов ядерной физики. С его помощью можно решать задачи, связанные с определением интенсивности излучения, фиксации счетной информации, отбора событий по заданным параметрам, установления координат источника излучения, выделения и учета фоновых событий и т. п.

Основополагающая идея, т. е. суть нелинейного метода, состоит в том, чтобы, используя заданный параметр

в виде установленной его величины, выделять нормируемый сигнал, если его входная величина, например, превысит заданное и установленное значение. Нормируемый сигнал — это импульс фиксированной полярности, длительности и амплитуды. Следовательно, в сигналах, полученных с помощью этого метода, линейность и пропорциональность связи с энергией зарегистрированной частицы будет в определенной мере утрачена.

Однако следует заметить, что при этом фиксируются не все частицы, а лишь те, параметры которых соответствуют установленному критерию. В качестве меры можно использовать, например, факт превышения установленного уровня напряжения или тока, называемый еще уровнем дискриминации. Устройство, в котором фиксируется такая ситуация, т. е. момент превышения и выделения нормированного сигнала, называется дискриминатором.

Взаимосвязь, которая имеет место между входом и выходом в таких устройствах, демонстрируется на рисунке 27. В сложившейся ситуации имеет место нарушение пропорциональности между потерей частицей энергии в детекторе и сигналом, который выделяется на выходе дискриминатора. Это дает повод говорить о нелинейном методе ее фиксации. Детектор в таком случае работает либо в пропорциональном линейно-импульсном режиме, либо в непропорциональном импульсном режиме.

Существенный момент — в сигналах на выходе всех устройств, в основу функционирования которых положен

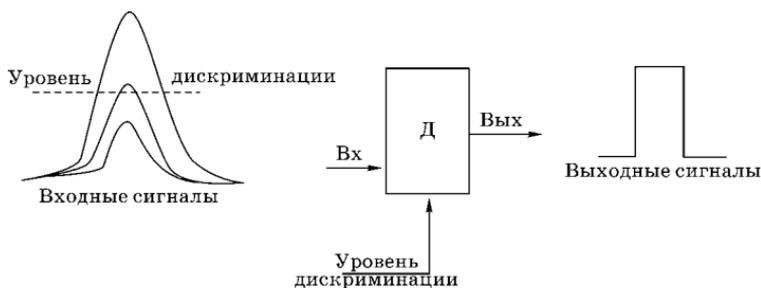


Рис. 27

Соотношение между входными и выходными сигналами при дискриминации:

Д — дискриминатор.

данный алгоритм работы, содержится главным образом информация только о факте регистрации частицы детектором. Однако, ее энергия всегда будет превышать энергию, которая задается установленным уровнем дискриминации.

#### 6.4. ДИСКРИМИНАЦИЯ — ОСНОВА НЕЛИНЕЙНОГО МЕТОДА И ЕЕ ВИДЫ

В общем случае, используя критерий разделения (как правило, превышение заданного параметра), дискриминация является нелинейным методом обнаружения и выделения полезного сигнала. Отбор происходит за счет превышения входным сигналом заданного уровня сравнения. Метод дискриминации допускает регистрацию лишь тех частиц ионизирующего излучения, которые при утрате энергии в детекторе обеспечили амплитуду его выходного сигнала выше установленного уровня.

Нередко такой уровень называют просто порогом, а электронные средства — пороговой техникой. Дискриминацию принято считать стандартным и обычным методом нелинейного преобразования. Важно заметить, что она содействует успешному решению широкого круга экспериментальных задач. В спектрометрии ионизирующих излучений с ее помощью можно обеспечить условия для практически полного избавления измерительного тракта от шумовых сигналов. Не последняя роль принадлежит ей в уменьшении вклада фонового излучения в регистрируемые спектры, включая и целый ряд других негативных аспектов.

В основу схемотехнической реализации методов дискриминации положена та или иная разновидность порогового устройства. Это может быть дискриминатор тока или напряжения. В связи с тем, что в этой ситуации общим параметром для всех сигналов является амплитуда, устройство, в котором реализуется указанная функция, стало называться просто амплитудным дискриминатором.

Дискриминаторы этого вида доминируют, например, в решении экспериментальных задач, ориентированных

главным образом на все многообразие счетных методов. Эти устройства играют важную роль, как при амплитудном анализе, так и при временном анализе микросекундного диапазона. Применение амплитудных дискриминаторов способствует решению широкого круга проблем, связанных с логикой организации сложных экспериментов в составе измерительных систем спектрометров различного назначения.

При временном анализе в наносекундном диапазоне дискриминация, используя ряд специальных методов, обеспечивает условия получения сигналов временной отметки с весьма высокой точностью. Решение измерительных задач, как показывает практика применения таких электронных средств, обеспечивает необходимый уровень точности. Они успешно решают проблемы временного анализа не только наносекундного диапазона, но и в субнаносекундной области. Более того, наблюдается устойчивая тенденция продвижения их уже в сферу пикосекундных значений и величин, что характерно для некоторых направлений в лазерной технике.

Данная разновидность пороговых устройств получила особое название быстрые дискриминаторы. Интересно отметить тот факт, что очень часто их называют формирователями или устройствами временной отметки, т. е. ФВО или УВО соответственно. Известно, что с помощью особых схемотехнических решений в этих электронных структурах с наивысшей точностью фиксируется момент времени, когда поступает сигнал с детектора ядерного излучения.

### 6.5. ОГРАНИЧЕНИЕ — БАЗОВАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ОПЕРАЦИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИГНАЛОВ

Как уже отмечалось, наряду с дискриминацией другой формой нелинейной обработки сигналов является ограничение. В общем случае это лимитирование одного из параметров сигнала в процессе его обработки. При этом

в качестве характеристики сигнала обычно используются полярность, амплитуда, длительность, форма сигнала и т. п. В таком случае ограничение является функцией одноименного электронного устройства — ограничителя, определяющего и фиксирующего то или иное превышение заданной величины параметра.

Среди разнообразия этих устройств можно выделить структуры, осуществляющие ограничение сигналов по амплитуде. В их составе используются различные, с явно нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), полупроводниковые изделия электронной техники: диоды, стабилитроны, транзисторы и т. д. Они являются составной частью различных схемотехнических решений, которые находят применение при нелинейных формах обработки всего многообразия сигналов, включая сигналы детекторов ионизирующего излучения.

В зависимости от реализуемой функции различают ограничители по максимуму, т. е. ограничение «сверху», и по минимуму — «снизу», а также двухсторонние ограничители. Самостоятельное применение ограничителей в виде отдельных законченных устройств — крайне редко. Однако их схемы широко используются в составе разнообразных импульсных устройств, где они выполняют ряд достаточно важных функций.

Ограничители решают задачи «урезания» амплитуды сигналов, что исключает поступление и воздействие на последующие схемы сигналов экстремальных значений, т. е. большой амплитуды. Они применяются для изменения формы сигналов. С их помощью, например, биполярный сигнал превращается в нужный по форме однополярный импульс. Ограничители используются для понижения степени насыщения биполярного транзистора при его работе в ключевом режиме. Это повышает быстродействие работы ключевых транзисторных схем. Ограничители такого вида применяются для защиты электронных схем и устройств от неправильного подключения к ним источников питания и т. д.

Наибольшее распространение среди этих устройств получили различные весьма простые, не требующие в ряде

случаев дополнительных элементов и сигналов управления, схемы диодных ограничителей. Место включения диода в схеме относительно нагрузки определяет вид ограничителя. Если диод включен последовательно с нагрузкой, то это ограничитель последовательного типа. При включении диода параллельно нагрузке образуется ограничитель параллельного типа.

В основу функционирования всех устройств такого назначения положены хорошо известные вентильные свойства диода. Это возможность диода находиться в двух состояниях: либо в проводящем, т. е. открытом состоянии, либо в закрытом, т. е. непроводящем состоянии. Первое из состояний (проводящее) составляет основу для работы ограничителей последовательного типа. Закрытое состояние диода создает условия для работы ограничителей параллельного типа.

В зависимости от используемого параметра ограничитель может быть схемой ограничения по току или напряжению. Последний из них имеет исключительно широкое применение. Полной его противоположностью является ограничитель по току, который в устройствах импульсной техники используется значительно реже. В то же время ярким примером широкого применения самого простого токового ограничителя в электронной технике может служить обычный предохранитель, который используется практически в каждом приборе.

Если не использовать дополнительный источник напряжения, то ограничение можно осуществлять лишь по нулевому потенциалу или уровню. Введение источника питания в схему ограничителя создает условия для выполнения им функции при другом уже ненулевом уровне. При этом уровень ограничения может быть как положительным, так и отрицательным. Кроме того, такое значение потенциала, как уровень ограничения, является важной характеристикой устройства. К стабильности, а также возможности регулировки данного уровня, как показывает практика применения устройств ограничения, в ряде случаев предъявляют достаточно высокие требования.

## 6.6. ТЕХНИКА ОГРАНИЧЕНИЯ СИГНАЛОВ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ

В качестве элементной базы ограничителей, как уже было отмечено, можно использовать все разнообразие полупроводниковой техники. Однако каждый из ее элементов в этом случае должен удовлетворять определенному условию. Всем им следует сохранять свою работоспособность при функционировании в той или иной форме ключевого режима работы, а значит, быть при определенных ситуациях или в проводящем, или в непроводящем состоянии.

Наименее сложными среди разнообразия схемотехнических решений устройств ограничения являются диодные ограничители. Эти устройства, практически не меняя временные соотношения между сигналами, могут изменять их параметры. Это относится прежде всего к форме сигналов и их амплитудам. Важно заметить, что коэффициент передачи  $k$  диодного ограничителя как пассивного четырехполюсника всегда будет меньше единицы, т. е.  $k < 1$ .

Известно, что прямое сопротивление диода не превышает несколько десятков ом. При этом диод находится в проводящем состоянии. Однако если диод не проводит, то его обратное сопротивление доходит уже до нескольких сотен килоом. Это позволяет интерпретировать диод и представлять его в виде модели ключа. Его замкнутое состояние будет связано с одной из версий режима работы диода. Она соответствует прямому варианту его включения.

Обратное включение диода будет уже адекватно разомкнутому состоянию ключа. Все эти предположения становятся удобными и просто необходимыми при анализе работы диодов в роли устройств ограничения. Рассмотрим ряд схемотехнических решений, где диоды выполняют функцию ограничителя по уровню. Довольно простой структурой является ограничитель последовательного типа.

Его схема и временные соотношения, поясняющие функционирование устройства ограничения, представлены

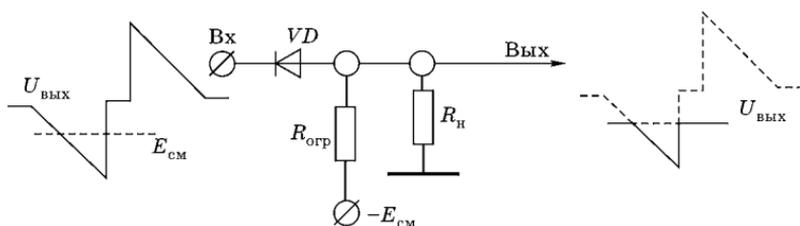


Рис. 28

Диодный ограничитель последовательного типа  
и временные диаграммы его работы:

$-E_{см}$  — источник смещения;  $R_{н}$  — сопротивление нагрузки;  $R_{огр}$  — токоограничивающее сопротивление;  $VD$  — диод.

на рисунке 28. Диод  $VD$  включен последовательно с нагрузкой  $R_{н}$ . Через токоограничивающее сопротивление  $R_{огр}$  анод диода соединяется с отрицательным источником постоянного смещения  $-E_{см}$ , который задает уровень ограничения. Изменяя его величину, можно регулировать уровень ограничения.

Схема такого ограничителя пропускает на выход входной сигнал или его часть, если диод  $VD$  находится в проводящем состоянии. Этот факт отражается на входных и выходных временных диаграммах. Диод  $VD$  передает часть отрицательного сигнала на выход, когда его амплитуда будет ниже уровня ограничения  $E_{см}$ . При этом диод находится в проводящем состоянии. Если исключить источник постоянного смещения  $-E_{см}$  и сопротивление  $R_{огр}$ , то полученная схема будет пропускать на свой выход отрицательную составляющую входного сигнала, но с нулевым уровнем смещения.

В случае, когда в представленной схеме (рис. 28) одновременно поменять полярность включения диода  $VD$ , а также источника смещения  $E_{см}$ , то возникшая при этом схема ограничителя выделит на своем выходе часть сигнала, амплитуда которого превышает  $E_{см}$ . При изъятии источника смещения  $E_{см}$  и сопротивления  $R_{огр}$  получается схема ограничителя, который будет передавать на выход положительную составляющую сигнала с нулевым уровнем смещения.

Рассмотрим другую разновидность диодного ограничителя. В нем диод, служащий для выделения выходного сигнала, будет включен параллельно нагрузке. При этом если диод ограничителя не проводит, поскольку он находится в закрытом в состоянии, то входные сигналы появляются на выходе схемы. Устройство получило название ограничителя параллельного типа. Схема и временные диаграммы его работы приведены на рисунке 29.

Диод  $VD$  находится в закрытом состоянии для всех сигналов положительной полярности и передает их на выход. Для сигналов отрицательной полярности диод  $VD$  открывается, если амплитуда входного сигнала будет ниже уровня, получаемого от отрицательного источника постоянного смещения  $-E_{см}$ . При этом все сигналы, амплитуда которых выше уровня  $-E_{см}$ , будут проходить на выход, так как диод  $VD$  закрыт и не проводит.

Для входных сигналов, амплитуда которых ниже этого уровня, диод  $VD$  находится в открытом состоянии, т. е. диод проводит. Сопротивление нагрузки  $R_n$  зашунтировано малым сопротивлением открытого диода  $VD$ , и выходного сигнала со схемы не будет. Если исключить источник смещения и анод диода  $VD$  соединить с нулевой шиной, то на выходе будут выделяться лишь сигналы положительной полярности с нулевым уровнем смещения.

При одновременном изменении полярности включения диода  $VD$  и источника смещения  $E_{см}$  поменяется и вид выходных сигналов. На выход будут передаваться все сиг-

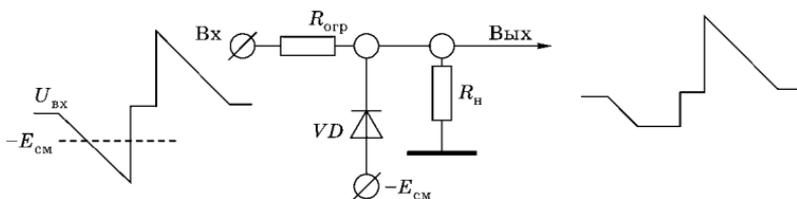


Рис. 29

Диодный ограничитель параллельного типа и временные диаграммы его работы:

$-E_{см}$  — источник смещения;  $R_n$  — сопротивление нагрузки;  $R_{огр}$  — токоограничивающее сопротивление;  $VD$  — диод.

налы, амплитуда которых ниже уровня ограничения, задаваемого источником смещения  $E_{см}$ . При устранении источника смещения  $E_{см}$  и подключении катода диода  $VD$  к земляной шине на выходе схемы ограничения будут выделяться сигналы только лишь отрицательной полярности.

Представленная и рассмотренная выше совокупность устройств ограничения относится к категории односторонних ограничителей. Однако на практике широко применяются двухсторонние ограничители. Рассмотрим их функционирование на примере двухстороннего ограничителя параллельного типа, схема которого приведена на рисунке 30. Масштаб их применения существенно шире, чем у двухсторонних ограничителей последовательного типа.

Два диода  $VD_1$  и  $VD_2$  и два источника  $E_{1см}$  и  $-E_{2см}$  положительной и отрицательной полярности вместе с ограничивающим резистором  $R_{огр}$  образуют схему двухстороннего ограничителя. Диод  $VD_1$  и источник  $E_{1см}$  служат для ограничения сигналов по максимуму. Диод  $VD_1$  переходит в проводящее состояние, если амплитуда входных сигналов превышает уровень  $E_{1см}$  и схема ограничивает выходные сигналы на этом уровне. В свою очередь, диод  $VD_2$  и источник  $-E_{2см}$  создают условия для ограничения сигналов по минимуму.

Таким образом, на выходе такой схемы ограничителя выделяются сигналы, амплитуда которых будет заключена между уровнями  $E_{1см}$  и  $-E_{2см}$ . Необходимо принять во

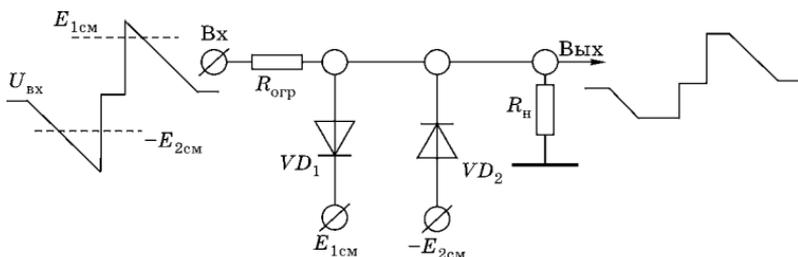


Рис. 30

Диодный двухсторонний ограничитель параллельного типа и временные диаграммы его работы:

$E_{1см}$ ,  $-E_{2см}$  — источники смещения;  $R_н$  — сопротивление нагрузки;  $R_{огр}$  — токоограничивающее сопротивление;  $VD_1$ ,  $VD_2$  — диоды.

внимание и тот факт, что ограничители данного типа используются на входе практически всех устройств дискриминации. Они защищают их входные каскады от воздействия сигналов экстремальных параметров, т. е. сигналов большой амплитуды.

### 6.7. СЕЛЕКЦИЯ — ФОРМА НЕЛИНЕЙНОЙ ОБРАБОТКИ И ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

При выделении и обработке детекторных сигналов с помощью нелинейных методов необходимо принимать во внимание и учитывать методы их селекции. Селекция сигналов, как показывает практика ее применения, — это процедура выделения их по определенному критерию, т. е. заданному параметру. В качестве такого признака можно использовать достаточно большой перечень характеристик и показателей.

При реализации таких функций используется полярность сигналов, их амплитуда, длительность, а также форма сигнала, включая одновременность или заданную последовательность их поступления и т. д. Вариант выбора той или иной категории отбора, т. е. селекции сигналов, определяется методикой измерений или целями и задачами экспериментальных исследований. Используемый для отбора критерий определяет вид селекции.

Если для выбора используется полярность сигнала, то это селекция полярности, т. е. выделение либо положительных, либо отрицательных сигналов. Данную селекцию можно осуществлять с помощью всего разнообразия структур диодных ограничителей разных типов. При амплитудном отборе, а это уже амплитудная селекция, применяются различные методы ограничения и дискриминации сигналов.

В свою очередь, сортировка и отбор событий во времени или пространстве выполняются с помощью временной селекции. Для решения таких задач используется весь арсенал логических элементов совместно с устройствами

формирования сигналов установленной или заданной длительности. Они служат исходной базой для внушительного разнообразия схем временного отбора сигналов, их селекции и синхронизации.

Масштабная роль в составе таких структур принадлежит различным методам и модификациям схем совпадений и антисовпадений. Они широко используются в измерениях как микросекундного, так и наносекундного диапазона. Эти устройства находят применение в решении многих вопросов временной селекции сигналов и их отбора в разных направлениях электронных методов ядерной физики. Данная техника успешно решает такие же проблемы во всем многообразии экспериментальных исследований в различных областях науки и техники.

Селекцию можно считать обобщенной формой нелинейных методов обработки и выделения сигналов. С ее помощью получают информацию в форме сигнала с фиксированными амплитудой и длительностью при выполнении заданного условия. Если в качестве критерия используется лишь один из параметров, то это обычная селекция, которая имеет, как правило, название выбранного параметра. Некоторые моменты такой ситуации уже были представлены и рассмотрены.

Однако, как показывает практика организации экспериментальных исследований, нередко возникают ситуации, когда необходимо принимать в расчет несколько показателей, т. е. комбинацию параметров. Если при селекции используется несколько, по крайней мере не меньше двух, показателей, т. е. критериев отбора, то такой вариант получил особое наименование и стал называться кодовой селекцией.

Селекция этого вида применяется в средствах электронной техники для многодетекторных измерений. Такой вариант измерений при временном анализе позволяет с помощью одного измерителя интервалов времени отдельно регистрировать спектры с нескольких детекторов. Следует отметить использование методов кодовой селекции для мультифакторного анализа в ядерно-физических исследованиях.

Примером таких измерений может служить мульти-скайлерный анализ. Это измерение спада интенсивности излучения во времени. При таком анализе в каждом канале системы регистрации фиксируется поступившее за установленное время число импульсов. Затем переходят к следующему каналу и вновь реализуют ту же процедуру регистрации. Таким образом, получают спектр изменения интенсивности излучения во времени.

В более сложных вариантах этого вида анализа в каждом канале системы сбора данных регистрируют не счетную информацию, а амплитудные спектры. При этом, помимо изменения интенсивности, располагают параметрами и характером изменения энергетических составляющих спектра. В такой ситуации повышается качество измерительной информации и существенно возрастает ценность экспериментальных данных.

Применение кодовой селекции необходимо для другого варианта мультифакторного анализа с привлечением нескольких детекторов при одновременном осуществлении временного и амплитудного анализа. В измерениях такого вида регистрация амплитудных и временных спектров от каждого детектора осуществляется в отдельных группах памяти системы накопления и обработки данных. Кроме того, различные варианты кодовой селекции широко используются в средствах вычислительной техники, радиолокации, телеизмерениях, в теле- и радиовещании и т. д., включая средства промышленной электроники.

## 6.8. РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ В СТРУКТУРАХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Как показывает практика применения и использования электронной техники для обработки сигналов, вся разновидность схем работает главным образом в двух основных режимах. Эти режимы определяются характером функционирования в составе устройств активных элементов: транзисторов, аналоговых и цифровых интегральных

схем и т. п. Это, как правило, линейный или ключевой режимы их работы, т. е. активных элементов.

Не секрет, что при нелинейных методах обработки и выделения сигналов используется в основном ключевой режим их работы. В таком режиме работы любой активный элемент может находиться в двух состояниях: проводящем или в непроводящем, т. е. в закрытом, состоянии. Оба состояния можно и удобно интерпретировать моделью ключа, находящегося в замкнутом или в разомкнутом положении.

Данный аспект является основой для анализа схем, работающих в этом режиме. Такая модель определяет функционирование преобладающей части импульсных устройств. Их структуры служат составными частями для схемотехнических реализаций всего разнообразия нелинейных методов обработки и выделения детекторных сигналов. Ранее было уже отмечено, что коэффициент передачи  $k$  любого диодного ключа всегда меньше единицы, т. е.  $k < 1$ .

Кроме того, в диодных ключах управляющая и рабочая цепи между собой совмещены и разделить их просто невозможно. Такая ситуация иногда считается негативным моментом и относится к варианту деструктивного фактора. Как показывает практика использования таких схемотехнических решений, существуют различные ситуации, когда разделение этих цепей буквально необходимо.

Таких недостатков лишены все ключевые структуры на основе транзисторов любых видов и типов. В ключах на базе таких элементов цепь управления и рабочая цепь, т. е. цепь коммутации, разделены. Если ключевая схема, например, организована на биполярном транзисторе, который включен по схеме с общим эмиттером, то управляющая цепь является его базовой цепью. При этом управляющая цепь или цепь коммутации проходит через эмиттер и коллектор транзистора.

Состояние этой цепи будут определять два режима его работы. Транзистор может находиться либо в режиме насыщения, либо в режиме отсечки. В первом состоянии

транзистор выполняет функцию замкнутого ключа. В режиме отсечки он функционирует уже как ключ в разомкнутом положении.

Кроме того, коэффициент передачи  $k$  транзисторного ключа будет уже больше единицы, т. е.  $k > 1$ . При включении транзистора по схеме с общим эмиттером, а это наиболее распространенная его ключевая схема, полярность выходного сигнала противоположна полярности входного воздействия, т. е. сигналу управления. Это является еще одной особенностью такой схемы включения транзисторов в ключевом режиме.

Отметим некоторые преимущества нелинейных методов, которые обусловлены импульсным режимом работы электронных устройств. При снижении средней мощности потребления существенно растет мощность в импульсе, иногда в десятки раз. Это снижает потребляемую энергию питания, уменьшая, как правило, массу и габариты устройств.

Нелинейные методы, реализуемые в схемах, весьма эффективно нивелируют влияние различных дестабилизирующих факторов (изменение напряжения питания, температуры, влажности и т. п.) на их работу. Более того, импульсный режим работы повышает помехоустойчивость аппаратуры, а также в значительной мере снижает искажения информации при ее выделении и передаче по каналам связи.

Это характерная черта работы в нелинейных режимах электронных средств, которая в существенной мере повышает надежность их функционирования. Таким образом, переход на цифровые методы способствует успешному решению проблем обработки сигналов. Все эти достоинства реализуются в электронной технике, которая применяется для выделения, обработки и формирования сигналов, поступающих с детекторных устройств.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Типовые режимы работы, характерные для детекторных устройств, и их выходные сигналы.
2. Виды нелинейных методов обработки детекторных сигналов и основные критерии их отбора.

3. Какие существуют формы представления детекторных сигналов и варианты их использования?
4. В чем заключается основная идея метода дискриминации детекторных сигналов?
5. Основа метода дискриминации и базовые варианты его реализации.
6. Какие варианты ограничения применяются при обработке сигналов?
7. Виды диодных ограничителей, включение в них диодов, с учетом двухстороннего диодного ограничителя параллельного типа.
8. Селекция сигналов, ее суть и виды селекции, используемые в экспериментальных методах ядерной физики.
9. В чем состоит суть ключевого режима работы активных элементов средств электронной техники?
10. Сравните ключевой режим работы диода и биполярного транзистора. В чем состоит их различие?
11. Какие преимущества обеспечивают нелинейные методы обработки сигналов?



## ГЛАВА 7

# НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТОДЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Среди всей совокупности нелинейных методов обработки сигналов наибольшее распространение получил метод выделения полезного сигнала с помощью дискриминации. Ее техника решает внушительный объем задач, связанный с выделением информации для амплитудного и временного анализа. Электронные средства, реализующие эти методы в обоих вариантах анализа, будут рассмотрены далее.

### 7.1. ТРЕБОВАНИЯ К ДИСКРИМИНАЦИИ ПРИ АМПЛИТУДНОМ АНАЛИЗЕ

Электронные средства дискриминации являются составной частью практически всех измерительных систем регистрации ядерных превращений. Изучение параметров ионизирующих излучений проводят на базе счетных методов, амплитудного или временного анализа, включая варианты их совместного использования. Выделение, накопление и обработку информации о природе и характере излучения ведут, преобразуя аналоговые сигналы в дискретную, т. е. в цифровую, форму.

Наряду с аналого-цифровым преобразованием широко применяют амплитудную дискриминацию. Такая форма получения дискретной информации зависит от вида

экспериментальных исследований, их сложности, типа детекторных устройств, интенсивности поступления с них сигналов, т. е. загрузки и т. д., а также целей и задач измерений. Например, в варианте реализации счетного метода амплитудный дискриминатор и счетчик выполняют функцию аналого-дискретного преобразования и накопления информации об интенсивности излучения.

Многие разновидности счетного метода, помимо самостоятельного применения, являются неотъемлемой частью многих измерительных систем, используемых для определения характеристик и свойств ядерных излучений. В составе таких систем со сложной конфигурацией и структурой организации, что характерно для современного этапа их развития, устройствам дискриминации принадлежит весомая роль. Выделенные ими сигналы, давая общие сведения об интенсивности излучения, используются другими электронными средствами системы, создавая условия для реализации принятой методики измерения.

Рассмотрим унифицированные требования, которым должны удовлетворять параметры амплитудных дискриминаторов микросекундного диапазона. Именно эти структуры используются в амплитудной спектрометрии. Входные сигналы должны быть положительной полярности либо биполярные, где сначала следует их положительная составляющая. Амплитуда входных сигналов не должна быть больше  $\pm 15$  В. Рабочий диапазон должен находиться в пределах  $\pm 10$  В, при этом длительность входных сигналов может изменяться в диапазоне от 0,1 до 100 мкс.

Значимым параметром дискриминатора является пороговый уровень и его стабильность. Уровень в нем регулируется, и при необходимости можно установить его минимальное значение. Наименьшая величина уровня обычно составляет десятки милливольт, хотя у лучших образцов данной техники нижний уровень находится в пределах единиц милливольт.

В свою очередь, критерием величины верхнего уровня дискриминации служит максимальное значение амплитуды входных сигналов  $\leq 5$  В. Однако в ряде случаев эта величина составляет  $\leq 10$  В. В таком случае динамический

диапазон изменения уровня дискриминации находится в пределах от 100 до 1000, где устройство должно сохранять работоспособность и обеспечивать заданный уровень метрологических параметров.

Температурная нестабильность уровня дискриминации (а именно с этим параметром связано качество работы устройства) имеет типовое значение  $\leq \pm 1$  мВ/°С. Лучшие образцы техники среди средств измерений этого вида имеют величину такого параметра в пределах от  $\leq \pm 0,5$  до  $\leq \pm 0,1$  мВ/°С, а иногда и менее. Важно заметить, что порог дискриминатора должен изменяться в заданных границах, а также плавно и линейно регулироваться в этих пределах. Такую особенность установки порога обеспечивают с помощью специальных переменных резисторов. Они относятся к категории многооборотных потенциометров, имеющих порой до 20 оборотов оси регулирования.

Важным аспектом при установке величины порога в устройстве является возможность управления уровнем дискриминации программными средствами. Это создает условия практически для полной автоматизации управления измерительной системой. Хотя возрастает сложность схемотехнических решений для устройств дискриминации, но при этом открываются новые перспективы в постановке экспериментальных исследований.

Среди параметров дискриминатора весьма существенное значение имеет его быстродействие. Это способность функционирования без ухудшения своих основных характеристик при высокой скорости поступления входных сигналов. Интенсивность поступления сигналов детектора, например при амплитудном анализе, может достигать до нескольких мегагерц и выше.

Такая загрузка по счетным каналам вряд ли вызовет какие-то осложнения или проблемы. Однако для спектрометрического тракта данная ситуация может вызывать озабоченность, так как велика вероятность искажений регистрируемого спектра за счет наложений входных сигналов. Наряду с этим негативным моментом при такой ситуации еще может иметь место и ухудшение разрешения измерительного тракта.

## 7.2. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ДИСКРИМИНАТОР — СТРУКТУРА И СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ

При определении параметров ядерного излучения, как уже упоминалось, необходимо избирательно выделять интересующую информацию. Она содержится в сигналах детектора, где присутствуют основная, т. е. полезная ее часть, и сопутствующая, т. е. нежелательная ее составляющая. Последняя из них обычно обусловлена негативными аспектами, т. е. фоном, шумами, наводками и т. п.

Такому состоянию соответствуют две группы сигналов. Они, как показывает практика, отличаются в основном величиной амплитуды. Проблему выделения полезных сигналов из общего потока стараются решить на этапе предварительной обработки, понижая загрузку измерительной системы сомнительными сигналами. Эту процедуру называют еще фильтрацией.

Устройства, осуществляя над входными сигналами такую операцию, пропускают на выход лишь сигналы соответствующей амплитуды. Эти электронные средства можно отнести к разряду импульсных фильтров. Функцию амплитудного отбора сигналов выполняют устройства, получившие название интегральный дискриминатор (ИД). Они заняли ведущие позиции в составе систем регистрации параметров ядерных превращений.

Дискриминаторы такого типа из поступающих сигналов исключают те из них, у которых амплитуда меньше установленной величины  $A_0$ . Параметр  $A_0$  называется уровнем дискриминации и является ее пороговым значением или просто порогом. Условие отбора определяется соотношением  $A \geq A_0$ , т. е. амплитуда входного сигнала должна быть не меньше уровня порога. Кроме того, выделенные по заданному критерию сигналы устройство унифицирует по амплитуде и длительности.

Схема ИД выполняет операцию нелинейного преобразования всех сигналов, поступающих на его вход, при установленных условиях (уровень порога). Название устройства отражает тот факт, что на его выходе появятся все сигналы, амплитуда которых больше установленного уровня

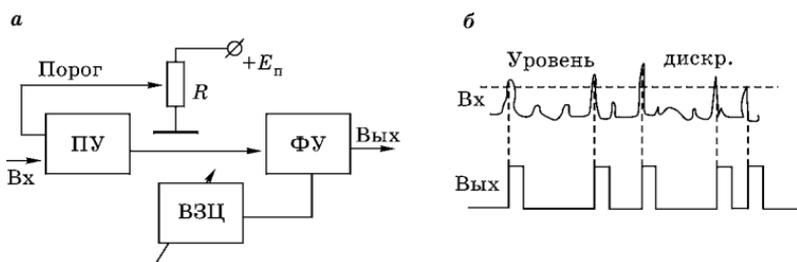


Рис. 31  
Структурная схема интегрального дискриминатора (а)  
и временные диаграммы его работы (б):

ВЗЦ — регулируемая времязадающая цепь; ПУ — пороговое устройство; ФУ — формирующее устройство;  $+E_n$  — напряжение порога;  $R$  — установка порога.

дискриминации. Структурная схема и соотношения между сигналами на входе и выходе устройства изображены на рисунке 31.

На схеме представлены базовые устройства, входящие в состав интегрального дискриминатора. Схема порогового устройства ПУ выделяет те входные сигналы, амплитуда которых превышает установленный уровень дискриминации, задаваемый с помощью потенциометра  $R$ . Функцию порогового устройства могут выполнять компараторы напряжения или тока. В основу схемотехнических решений пороговых устройств положены различные варианты и типы интегральных схем.

Выделенный схемой ПУ сигнал запускает формирующее устройство ФУ, которое нормирует по длительности и амплитуде выходные сигналы дискриминатора (рис. 31б). В качестве времязадающей цепочки ВЗЦ, определяющей длительность выходных сигналов, обычно используется интегрирующая  $RC$ -цепочка. В ее составе несколько конденсаторов, коммутируя которые (см. стрелка на ВЗЦ) изменяют длительность выходных сигналов устройства дискриминации.

Типовое значение такого дискретно изменяемого параметра имеет, как правило, три значения: 0,1; 0,5 и 1,0 мкс. В некоторых вариантах интегральных дискриминаторов могут быть добавлены еще диапазоны в 5,0 и 10,0 мкс. Амплитуда выходных сигналов соответствует

величине уровней интегральных схем типа ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика: уровень лог. «0»  $\leq 0,5$  В, а уровень лог. «1»  $\geq 2,5$  В).

В измерениях интенсивности излучения, т. е. при счетном методе регистрации, выходной сигнал дискриминатора должен иметь малую длительность, что обеспечивает высокую скорость счета событий. Однако такой ее величины может оказаться недостаточно для управления линейными воротами при амплитудном анализе. Изменением длительности выходных сигналов дискриминатора путем коммутации емкостных элементов в составе схемы времязадающей цепи ВЗЦ обеспечивается успешное решение таких задач.

### 7.3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ДИСКРИМИНАТОР — СТРУКТУРА, ЕЕ СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ

Наряду с интегральным дискриминатором, где используется единственный уровень сравнения, в ядерно-физических измерениях широко применяют устройства с двумя уровнями сравнения. Один из уровней сравнения получил название верхний, а другой — нижний. Электронное устройство, выделяющее на выходе нормированный импульс, если амплитуда входного сигнала находится между двумя регулируемые уровнями сравнения, называется дифференциальным дискриминатором (ДД).

Это устройство выполняет функцию выделения сигналов, амплитуда которых находится в предварительно установленном диапазоне. В состав схемы дифференциального дискриминатора входят два пороговых устройства. Один из них называется дискриминатором верхнего уровня (ДВУ), а другой — дискриминатором нижнего уровня (ДНУ). Разность между этими уровнями задает ширину амплитудного «окна» схемы ДД.

Если сработали оба пороговых устройства ДВУ и ДНУ, то выходного сигнала со схемы ДД не будет. На выходе схемы ДД появится выходной сигнал только в случае, когда при поступлении входного сигнала работает лишь устрой-

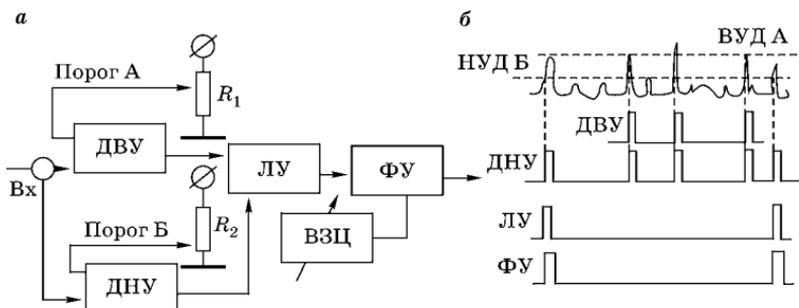


Рис. 32

Структурная схема дифференциального дискриминатора (а) и временные диаграммы его работы (б):

ВЗЦ — регулируемая времязадающая цепь; ДВУ — дискриминатор верхнего уровня; ДНУ — дискриминатор нижнего уровня; ЛУ — логическое устройство; ФУ — формирующее устройство; ВУД — верхний уровень дискриминации; НУД — нижний уровень дискриминации;  $R_1, R_2$  — установка величины порога.

ство ДНУ. Дискриминатор этого вида будет выполнять функцию фильтрации более эффективно, по сравнению с интегральным дискриминатором. Структурная схема ДД и временные диаграммы его функционирования представлены на рисунке 32.

Итак, на выходе ДД появится сигнал, если работает лишь пороговое устройство ДНУ и уровень порога А будет выше уровня порога Б, т. е.  $A > B$ . Если сработали схемы обоих дискриминаторов ДВУ и ДНУ, то логическое устройство (ЛУ) запрещает запуск формирующего устройства (ФУ), что исключает появление выходного сигнала со схемы ДД (рис. 32б). Выходных сигналов со схемы ДД также не будет, если пороги с помощью многооборотных потенциометров  $R_1$  и  $R_2$  «закрутили» так, что  $B > A$ . В этой ситуации необходимо восстановить прежние условия для пороговых уровней, т. е.  $A > B$ , чтобы схема ДД возвратилась к режиму нормального функционирования.

Длительность выходных сигналов в этом дискриминаторе определяется схемой формирующего устройства (ФУ), где данный параметр фиксируется с помощью времязадающей цепи (ВЗЦ). Точно так же, как и в интегральном дискриминаторе (ИД), схема ВЗЦ обеспечивает три значения длительности выходного сигнала: 0,1, 0,5 и 1,0 мкс.

Так же как и в некоторых вариантах ИД, в ряде схем ДД могут быть предусмотрены диапазоны в 5,0 и 10,0 мкс. Амплитуда выходных сигналов дифференциального дискриминатора, как правило, соответствует уровням интегральных схем типа ТТЛ, т. е. транзисторно-транзисторная логика, имеющая уровень лог. «0»  $\leq 0,5$  В и уровень лог. «1»  $\geq 2,5$  В.

Интегральный и дифференциальный дискриминаторы относятся к устройствам, реализующим нелинейный метод для получения информации о параметрах излучения. С их помощью сигналы из аналогового вида трансформируются в цифровую форму. Дискриминаторы выполняют функцию устройства аналого-цифрового преобразования «мощностью» в один разряд. Несмотря на такую довольно «скромную» разрядность техники дискриминации, сферы ее применения весьма существенны.

#### 7.4.

### ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ДИСКРИМИНАЦИИ И ВАРИАНТЫ ИХ ИСПОЛНЕНИЯ

Рассмотрена суть и основы реализации метода дискриминации, получившего широкое распространение. Необходимо отметить усилия специалистов по целенаправленному поиску расширения возможностей данного метода. Были выполнены работы по модификации техники дискриминации, что привело к росту и расширению ее функционального потенциала. Достигнутые успехи позволили создать электронные средства, которые не только получили новые возможности, но и приобрели в ряде случаев новое название.

Известно, что схемы ДВУ и ДНУ срабатывают по фронту входного сигнала и выделяют импульс, длительность которого определяется временем превышения сигналом порогового уровня. В таком случае длительность импульса схемы ДНУ будет всегда больше импульса со схемы ДВУ. Выходной сигнал, выделяемый устройством ДД, обычно «привязывают» к фронту импульса, который получают со схемы ДНУ.

Поскольку разность длительностей учитывается в схеме ЛУ, момент появления выходного сигнала ДД можно привязать в ней к спаду входного сигнала. Вариант привязки к фронту или спаду входного сигнала выбирается переключателем на передней панели дискриминатора. Выбор вида привязки зависит от задач, решаемых в ходе измерений, и привязка к спаду входного сигнала повышает надежность, уменьшая число ложных запретов на выделение выходных сигналов ДД.

Появление альтернативы в привязке выходного сигнала дискриминатора существенно расширило возможности по отбору и селекции событий при постановке экспериментов. И все-таки, как показывает практика, «классический» вариант привязки выходного сигнала дискриминатора к фронту входного незаменим и широко используется при временном анализе в микросекундной области. Характерно, что этот вид привязки и получения выходного сигнала с электронных средств дискриминации принято считать основным стандартным вариантом.

Следует отметить, что дифференциальный дискриминатор обретает новые возможности, если верхний А и нижний Б уровни дискриминации (см. рис. 32) могут и будут изменяться синхронно. Итак, если изменили уровень порога Б, то на ту же величину следует изменить уровень порога А. В этом случае верхний порог А отслеживает все изменения нижнего порога Б.

Однако при этом любые изменения верхнего порога А никоим образом не должны влиять на величину нижнего порога Б. Такой вариант изменения порогов стал возможен за счет использования специальной схемы их задания и регулировки. Необходимо отметить, что применение специальной схемы исключает отмеченную ранее ситуацию с «закрученными» порогами.

Если уровень верхнего порога А обозначить как  $U_A$ , а нижнего порога Б —  $U_B$ , то разность между ними ( $U_A - U_B$ ) будет определять еще один крайне важный параметр схемы ДД. Его величина, которая равна  $\Delta U_{AB} = (U_A - U_B)$ , получила название ширины канала дифференциального дискриминатора. Возможность установки данного параметра

в заданных пределах позволила перевести устройства этого вида в новую категорию.

Они получили статус структур одноканального амплитудного анализа. Измерительный модуль такого функционального назначения получил название ДОКА — дискриминатор одноканального анализа. Техника этого направления в составе амплитудного анализа позволяет выделять и регистрировать лишь интересующие участки амплитудного, а значит, и энергетического спектров.

Создаются условия для выделения и регистрации частиц ядерного излучения только в установленном диапазоне энергий. Величину диапазона задает ширина канала схемы ДД, управляющая линейными воротами, т. е. линейной схемой пропускания, которая включена перед аналого-цифровым преобразователем. В таком случае говорят о регистрации в установленных заранее амплитудных «окнах».

Таблица 2

Параметр	Значение
Входные сигналы	Положительный/биполярный
Диапазон амплитуд	0,05–5 В, иногда 0,1–10 В
Максимально допустимая амплитуда	≤ 15 В
Длительность фронта входного сигнала	0,1–10 мкс
Входное сопротивление	≥ 5 кОм
Уровень порога (дискриминации)	0,05–5 В, иногда 0,1–10 В
Стабильность уровня порога	≤ ±1 мВ/°С
Диапазон ширины «окна»	0,1–2 В
Стабильность «окна»	≤ ±1 мВ/°С
Диапазон изменения положения «окна»	0,05–4,5 В, иногда 0,1–9,0 В
Выходные сигналы	Уровни ИС типа ТТЛ
Длительность выходных сигналов	0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10 мкс

Эта форма регистрации стала возможной за счет синхронного изменения порогов дискриминации при их односторонней взаимообусловленности, которая обеспечивается схемой ДД. Ширина «окна», как уже отмечалось ранее, задается разностью между уровнями дискриминации в этой схеме, что и позволило назвать ее ДОКА (дискриминатор одноканального анализа).

Технические параметры унифицированного устройства дискриминации для амплитудного анализа приведены в таблице 2.

Все многообразие устройств дискриминации данного вида получили весьма широкое распространение и применение в экспериментальных исследованиях. Они выпускаются целым рядом фирм Canberra, Ortec, Tennelec (США); Nokia, Philips, Silena и т. д. (Европа); ОИЯИ, Дубна, ИЯФ СО АН, Новосибирск, ПИЯФ, Гатчина, и др. (Россия), осуществляющих свою деятельность в области ядерного приборостроения. Фирмы предлагают несколько вариантов таких устройств, которые выпускаются как в стандарте NIM, так и в стандарте САМАС.

## 7.5. ТРЕБОВАНИЯ К ДИСКРИМИНАЦИИ ПРИ ВРЕМЕННОМ АНАЛИЗЕ

Наряду с амплитудным анализом в решении широкого круга ядерно-физических задач применяется временной анализ. Выделяемая с его помощью информация отвечает на целый ряд вопросов, связанных, например, с моментом рождения частицы, с параметрами ее перемещения во времени и пространстве, включая момент ее регистрации в заданном месте. Это позволяет однозначно увязать полученную информацию с характером и параметрами ядерных взаимодействий и превращений.

Особенно эффективно используется временной анализ в спектрометрии нейтронов по методу времени пролета. Благодаря этому методу получены весомые результаты в спектрометрии быстрых нейтронов с помощью различных времяпролетных методик измерений. Их особенность

состоит в том, что все они реализуются в наносекундной области. В силу этого временной анализ, осуществляемый в этой области, ведут с применением быстрой электронной техники нано- и субнаносекундного диапазона.

В амплитудном анализе, как известно, используются в основном сигналы положительной полярности. Однако при временном анализе в данном диапазоне применяются главным образом сигналы отрицательной полярности. Их длительность лежит в пределах от единиц до сотен наносекунд. Могут использоваться и биполярные сигналы, но в этом случае первой всегда поступает его отрицательная составляющая.

Все эти факты следует отнести к особенностям «быстрого» временного анализа наносекундного диапазона. Характерно, что измерительные электронные средства и структуры, используемые в этом случае, получили название наносекундная электроника. Она ориентирована на выделение, формирование и обработку быстрых сигналов отрицательной полярности. Именно сигналы такого вида поступают на вход и выделяются на выходе электронных устройств дискриминации и формирования.

Результаты временных измерений, т. е. их точность, определяются параметрами используемых электронных средств, а также характеристиками детектирующих устройств. Действительно, одни детекторы имеют высокие временные параметры, а характеристики других значительно ниже. Если сопоставить фронты сигналов детекторов, то фронт сигнала сцинтилляционного детектора доходит до  $10^{-10}$  с, в то время как фронт сигнала ионизационной камеры составляет около  $10^{-6}$  с. Этот же параметр для полупроводникового детектора в среднем будет равен  $2 \cdot 10^{-9}$  с.

Кроме того, форма сигнала, а значит, и его фронт зависят от типа излучения, места попадания его в детектор, собирания света или носителей заряда, флуктуаций их сбора и т. п. Это ведет к амплитудному «разбросу» и обуславливает «гуляние» во времени срабатывания порогового устройства. Момент срабатывания этой схемы связывают с выделением сигнала, который называют сигналом

временной отметки. Применение метода дискриминации для получения таких сигналов с предельной точностью и стабильностью является лишь одной из задач временного анализа. Среди других задач такого анализа прежде всего надо отметить точность измерения выделяемых интервалов времени.

Одним из факторов нестабильности является дрейф параметров, как электронных средств измерения, так и устройств детектирования. Его проявление наблюдается в виде медленных изменений пороговых уровней, ухода и смещения параметров схем, выделяющих сигналы временной отметки. Эта реальность связана с изменениями температуры, режимов питания и т. п. Дрейф вызывает особую озабоченность и является крайне неблагоприятным фактором в продолжительных измерениях.

Эффект «гуляния» сигналов временной отметки обусловлен еще рядом факторов. Среди них шумовые составляющие детектора и предусилителя, конечная длительность фронта сигнала и ее разброс, включая время распространения сигнала и его флуктуации и т. д. Совокупность этих обстоятельств, определяемая в общем случае как временной статистический разброс, не способствует и не повышает точность выделения сигнала временной отметки. Наоборот, эти факторы ведут к ухудшению временного разрешения во временном анализе при регистрации наносекундных интервалов времени в виде временных спектров.

Стремление обеспечить высокую точность получения сигнала временной отметки привело к разработке целого ряда особых методов временной дискриминации. Наиболее известными и широко применяемыми являются метод фиксации сигнала временной отметки по фронту импульса, метод по пересечению нулевого уровня, а также метод следящего порога. Устройства, использующие такие методы, получили название быстрые дискриминаторы или формирователи временной отметки. Вместе с тем существуют и другие способы выделения и формирования таких сигналов на базе специальных подходов к их обработке.

### 7.6. БЫСТРЫЙ ДИСКРИМИНАТОР ПО ФРОНТУ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Как показала практика, данный вид получения сигналов временной отметки принято считать самым простым по технической реализации и наиболее распространенным по сфере применения. Сигналы выделяют, фиксируя момент превышения ими заданного уровня порога по абсолютной величине, так как полярность входных импульсов отрицательная.

Результат превышения фиксируется нормированными выходными сигналами отрицательной полярности, т. е. назначенной амплитудой и длительностью. Среди достоинств данного метода выделения и формирования сигналов следует отметить прежде всего непритязательность его схемотехнических решений, их доступность и вполне достаточную простоту. Характерно, что незамысловатость конструктивных и технических решений обуславливает ряд преимуществ в виде надежности, экономичности и компактности, а также стоимости этой техники.

Величина порога задается и регулируется в пределах нескольких вольт. Для временного анализа диапазон его регулировки меньше, чем при амплитудном анализе, приблизительно в 1,5–2 раза. Выходные сигналы таких дискриминаторов, как правило, токовые величиной 16–20 мА. Они создают на согласованной нагрузке в 50 Ом импульсы амплитудой 0,8–1,0 В отрицательной полярности. Длительность выходных импульсов не регулируется и совсем небольшая по величине. Она составляет несколько десятков наносекунд и находится обычно в пределах от 20 до 50 нс.

Если сопоставить технику дискриминации амплитудного и временного анализа, то быстрый дискриминатор следует отнести к разряду интегральных дискриминаторов. С его помощью выделяют момент превышения входными сигналами порога по абсолютной величине. Эта ситуация подтверждается выходными сигналами, которые выделяются быстрым дискриминатором. Структурная схема устройства и временные диаграммы ее работы представлены на рисунке 33.

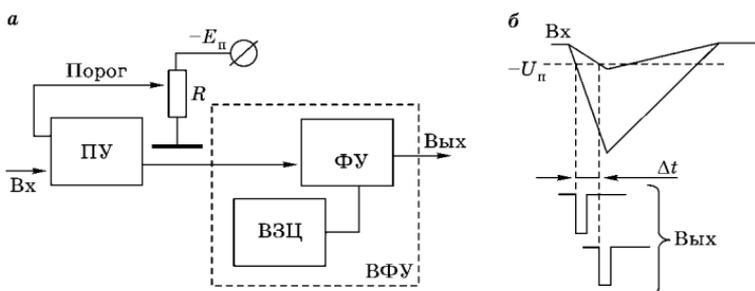


Рис. 33

Структурная схема быстрого дискриминатора по фронту входных сигналов (а) и временные диаграммы его работы (б):

ВЗЦ — времязадающая цепь; ВФУ — выходное формирующее устройство; ПУ — пороговое устройство; ФУ — формирующее устройство;  $-E_{п}$  — напряжение порога;  $R$  — установка порога;  $-U_{п}$  — заданная величина порога.

Входные сигналы (рис. 33б) отрицательной полярности поступают на пороговое устройство ПУ. Величина порога задается и устанавливается многооборотным потенциометром  $R$ . На выходе схемы ПУ выделяется сигнал, если амплитуда входного импульса больше уровня порога  $U_{п}$ . В качестве ПУ используются различные варианты быстрых компараторов тока или напряжения в интегральном исполнении. Ранее для этих целей применялись туннельные диоды. Выделенные схемой ПУ сигналы запускают выходное формирующее устройство (ВФУ).

Задача каскада ВФУ — обеспечить на выходе быстрого дискриминатора нормированные по длительности и амплитуде сигналы отрицательной полярности. В состав устройства ВФУ входят нерегулируемая времязадающая цепочка ВЗЦ и схема формирующего устройства ФУ. Они обеспечивают, как и в случае амплитудного интегрального дискриминатора, заданные параметры выходных сигналов временной отметки быстрого дискриминатора.

Параметры ВЗЦ не меняются, так как длительность выходных сигналов таких дискриминаторов не регулируется и находится в указанных выше пределах. На практике в качестве ВЗЦ нередко используют линии задержки в виде коаксиального кабеля, свитой пары изолированных проводов или печатной микрополосковой линии задержки. Это важно для получения стабильной длительности

быстрых сигналов, величина которой лежит в пределах от 5 до 20 нс.

На погрешность данного метода временной привязки влияет ряд факторов. В первую очередь необходимо отметить ключевой момент, что точность привязки связана и зависит от крутизны фронта нарастания сигнала и его амплитуды. Положение сигнала временной отметки будет «размыто» на оси времени. «Размытие» является достаточно характерным процессом, величина которого может превышать длительность фронта поступающих сигналов.

Данное обстоятельство обусловлено в основном разбросом амплитуд входных импульсов (см. рис. 33б), что ведет к неопределенности  $\Delta t$  в получении сигналов временной отметки. Такая же негативная ситуация возникает при нестабильности порога и при наличии шумовых составляющих во входных импульсах. Последние аспекты являются наиболее характерными для сигналов малой амплитуды.

Эта совокупность неблагоприятных факторов в значительной мере ограничивает сферу применения метода и техники дискриминации по фронту входных сигналов. Метод, как и электронные средства на его основе, широко используется в измерениях при наличии сигналов с крутыми фронтами, при достаточно малом амплитудном диапазоне их разброса и при существенном превышении ими уровня порога.

Примером таких сигналов могут служить импульсы, выделяемые с пикап-электрода электростатического перезарядного ускорителя, которые в измерениях служат стоповыми сигналами. На электроде они наводятся достаточно короткими сгустками ( $\tau_{\text{ст}} \leq 1$  нс) заряженных частиц, обычно протонами. Естественно, что после усиления получают сигналы практически одинаковой амплитуды.

В таком случае их формирование при измерении спектров быстрых нейтронов по методу времени пролета обычно осуществляется быстрыми дискриминаторами рассматриваемого типа. Применение электронных средств данного назначения будет всегда оправданно, если необходима приемлемая точность фиксации моментов времени при конкретных ситуациях.

### 7.7. ФОРМИРОВАТЕЛЬ ВРЕМЕННОЙ ОТМЕТКИ ПО ПЕРЕСЕЧЕНИЮ НУЛЯ

Метод дискриминации по фронту сигнала оказался непригодным при решении проблем измерений времяпролетных спектров быстрых нейтронов с разрешением несколько единиц наносекунд и выше. Задачи такого плана все чаще возникали и имели место в смежных областях науки и техники. Желание получить высокую точность фиксации на временной оси сигнала отметки такого вида стимулировало целенаправленный поиск методов и электронной техники для решения этих задач.

Известно, что двойное дифференцирование при линейном формировании сигналов повышает разрешение амплитудного тракта, улучшает соотношение сигнал/шум, обеспечивает получение биполярного сигнала, уменьшая таким образом флуктуации выходного нулевого уровня при высоких нагрузках. При формировании биполярного сигнала было установлено, что смена его полярности, т. е. момент пересечения им нулевого уровня, довольно слабо зависит от величины амплитуды входных сигналов и ее изменений в значительных пределах.

Момент перехода от отрицательного уровня к положительному и наоборот можно использовать для точной отметки времени. Это понятно, поскольку момент изменения знака импульса фиксируется гораздо точнее, чем время его нарастания, и меньше зависит от амплитуды импульса. Это легло в основу метода получения временной отметки по пересечению нуля. В таком случае проблемой метода стала техника формирования биполярного импульса. Для получения такой формы сигнала можно задействовать весь набор как пассивных, так и активных компонентов.

Пассивные интегрирующие и дифференцирующие цепи типа  $RC$  и  $RL$ , а также привлечение операционных усилителей успешно решали эти проблемы в микросекундном диапазоне. Однако в наносекундной области с их помощью такие проблемы решать стало невозможно, им просто не хватало быстроедействия. Для формирования нано-

секундных биполярных сигналов были привлечены и использованы другие компоненты в виде отрезков коаксиальных кабелей, микрополосковых линий задержки, импульсных трансформаторов и т. п.

Не рассматривая детально всю совокупность проблем, связанных с получением биполярного сигнала, фиксацией факта смены полярности, стробированием, селекцией и т. д., отметим лишь увеличение сложности устройства в целом. Эти обстоятельства стали одним из ключевых факторов повышения точности измерений. Рассмотрим структурную схему устройства и временные диаграммы его работы, представленные на рисунке 34.

В формирователе временной отметки или быстрого дискриминатора по пересечению нуля можно выделить два канала. Один из них, состоящий из схемы порогового устройства ПУ и элемента установки величины порога  $R$ , является, по сути, амплитудным интегральным дискриминатором. С его помощью отсекают шумовую и фоновую составляющие спектра, регулируя многооборотным потенциометром  $R$  величину порога. Данная ситуация отражается на верхней части временной диаграммы, представленной на рисунке 34б.

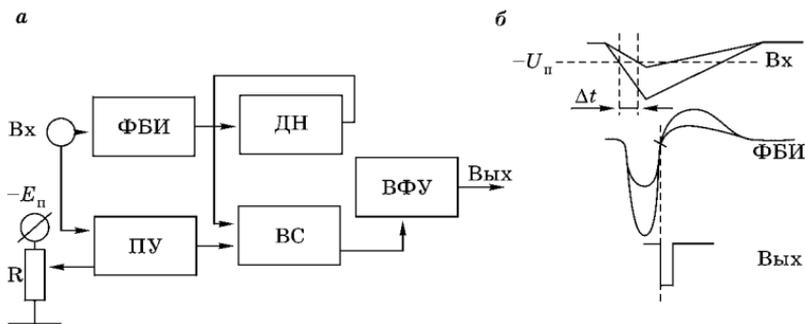


Рис. 34

Структурная схема формирователя временной отметки по пересечению нуля (а)

и временные диаграммы на выходах его базовых схем (б):

ВС — временной селектор; ВФУ — выходное формирующее устройство; ДН — детектор нуля; ПУ — пороговое устройство; ФБИ — формирователь биполярного импульса;  $-E_{п}$  — напряжение порога;  $R$  — установка величины порога;  $-U_{п}$  — заданная величина порога.

Другой канал состоит из формирователя биполярного сигнала ФБИ и детектора нуля ДН. Схема ФБИ решает проблему получения сигнала такой формы. На временной диаграмме отражен факт смены полярности при нарастающей части сигнала. Такой порядок и направление изменения полярности не являются обязательными. Получение положительной или отрицательной формы биполярного сигнала зависит лишь от варианта реализации схемы ДН.

Затруднения в построении схем детекторов нуля вызваны в основном шумовой составляющей, которая присутствует в биполярном сигнале. Этот фактор ограничивает точность получения сигнала временной отметки. Однако ее стандартное значение для этого метода составляет 0,1 нс при изменении амплитуды входных сигналов в пределах двух порядков и выше. Следовательно, если сигналы на входе изменяются от 30 мВ до 5,0 В, то «гуляние» выходного импульса дискриминатора данного типа не превысит 0,1 нс.

Функции, которые выполнили оба канала, далее объединяются схемой временного селектора ВС. Подготовленный сигналом схемы ПУ селектор пропускает сигнал со схемы ДН, поступающий на запуск устройства ВФУ. Назначение данной схемы состоит в формировании нормированного выходного сигнала дискриминатора. Необходимо заметить, что элементы схемы ВФУ и выполняемые ими функции практически аналогичны такому же устройству в быстром дискриминаторе по фронту входных сигналов.

Рассмотрим некоторые достоинства такого варианта построения быстрого дискриминатора. Однако следует обратить внимание на ряд обстоятельств. В этом методе, на ранних этапах его реализации, функции получения сигнала временной отметки и регулировки уровня порога были совмещены. Данная реальность стала одним из основных сдерживающих факторов в его развитии.

Это в значительной мере ограничивало диапазон изменения порога, сужая выбор вариантов схем ФБИ и ДН, создавая дополнительные трудности по их модификации. Все эти ограничения в основном были сняты путем разде-

ления таких функций. Это привело к повышению в несколько раз точности фиксации временной отметки и обеспечило существенный рост динамического диапазона амплитуд входных сигналов. Данный аспект был уже отмечен ранее.

Кроме того, появилась возможность модификации обеих схем ФБИ и ДН независимо, а также использования для них новых схемотехнических решений и применения в их составе новой прогрессивной элементной базы. До разделения каналов в качестве элементной базы этих устройств использовались в основном туннельные диоды, применение которых во второй половине прошлого столетия доминировало в быстрой электронной технике.

Тенденция роста и увеличения сложности устройств дискриминации ведет к значительному (почти в несколько раз) повышению точности выделения сигналов временной отметки. Использование новой элементной базы в виде многообразия интегральных схем также способствует приросту точности измерений. Достигнутые параметры открывают новые горизонты и возможности в изучении физики процессов на базе временных методик измерений в наносекундной области.

## 7.8. БЫСТРЫЙ ДИСКРИМИНАТОР ПО ПОСТОЯННОЙ ЧАСТИ СИГНАЛА

Рассмотрим еще один вариант получения сигналов временной отметки. Первой из его особенностей можно считать многогранность в наименовании электронных средств, созданных на его основе. Среди названий этой техники можно встретить формирователь со следящим порогом или по постоянной части амплитуды, а также дискриминатор с порогом, пропорциональным амплитуде или постоянной фракции сигнала и т. п. В различных зарубежных изданиях, публикациях и статьях, связанных с методами ядерной физики, все разнообразие электронных средств данной направленности известно под названием *constant-fraction discriminators*.

Практика реализации этого метода в составе измерительных электронных средств обеспечила им самые высокие параметры среди многочисленных устройств данного назначения. Точность выделения сигналов временной отметки стала лучше 0,1 нс, и техника уверенно продвигает ее к значению 0,05 нс и выше. Данный способ выделения сигнала временной отметки можно отнести к разряду прецизионных методов измерений, связанных с временной спектрометрией, проблемы которой лежат в наносекундной области.

В основу метода выделения сигнала временной отметки по его постоянной части положена модифицированная идея фиксации момента пересечения нулевого уровня. Такой момент создается специальным образом с помощью разделения маршрута передачи входных сигналов. В каждом из направлений передачи сигналов их дополнительно обрабатывают линейными, но различными по характеру воздействия методами.

Далее путем линейного суммирования их объединяют вновь, получая достаточно характерную разновидность биполярного сигнала. С помощью детектора нуля определяют момент изменения полярности такого сигнала, т. е. пересечения им нулевого уровня. Затем данный момент фиксируется в виде сигнала временной отметки. В этом заключаются основные положения, если так можно выразиться, *constant-fraction* идеи и метода.

Представленный алгоритм реализации метода дискриминации по постоянной части сигнала рассмотрим с помощью структурной схемы быстрого дискриминатора, приведенной на рисунке 35а. Здесь же, необходимо отметить функциональное назначение базовых компонентов, входящих в его состав. Временные диаграммы работы устройства, связанные с основными узлами, демонстрируются на рисунке 35б.

Детекторные сигналы, которые получают главным образом с ФЭУ, поступают на вход дискриминатора. Они сразу разделяются и направляются по трем маршрутам следования. Один из них состоит из порогового устройства ПУ и схемы установки порога  $-U_{п}$ . Эта структура выполняет

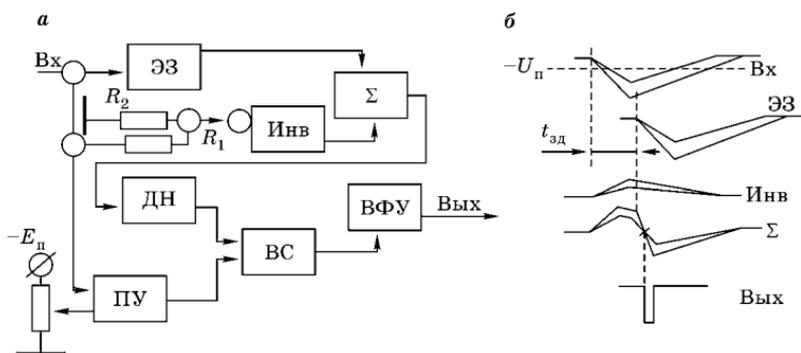


Рис. 35

Структурная схема быстрого дискриминатора по постоянной части сигнала (а) и временные диаграммы на выходе его основных узлов (б): ВС — временной селектор; ВФУ — выходное формирующее устройство; ДН — детектор нуля; Инв — инвертор; ЭЗ — элемент задержки;  $\Sigma$  — сумматор;  $-E_{\text{п}}$  — напряжение порога;  $R$  — установка величины порога;  $-U_{\text{п}}$  — заданная величина порога.

функцию интегрального дискриминатора, назначение и роль которого нам уже хорошо известны. Изменяя многооборотным потенциометром  $R$  величину порога  $-U_{\text{п}}$ , исключают регистрацию шумов и отчасти фоновые события.

Два других пути передачи входных сигналов служат для формирования биполярного сигнала. Один из них осуществляет просто задержку входных сигналов с помощью элемента задержки ЭЗ. Его величина  $t_{\text{зд}}$  с учетом алгоритма получения биполярного сигнала должна удовлетворять условию  $t_{\text{зд}} > t_{\text{ф}}$ . Схема ЭЗ призвана обеспечить задержку входного сигнала на величину, которая несколько больше длительности его фронта  $t_{\text{ф}}$ . Поскольку фронт быстрых сигналов с ППД и ФЭУ составляет единицы наносекунд, то в качестве ЭЗ обычно используется отрезок коаксиального кабеля необходимой длины. Такой кабель метровой длины имеет задержку несколько меньше 5 нс.

Другой маршрут передачи входных сигналов для придания им биполярной формы содержит обычный делитель напряжения  $R_1$  и  $R_2$  и инвертор Инв. Последовательность их включения не принципиальна и может быть изменена. Такая ситуация нередко встречается в схемотехнических решениях. Делитель напряжения, выполняя функцию

аттенюатора, ослабляет и уменьшает амплитуду входных сигналов. Анализ показал, что коэффициент ослабления  $A$  входного сигнала должен находиться в определенных пределах.

Для оптимального выделения и формирования сигнала временной отметки его величина должна удовлетворять условию  $A = R_2 / (R_1 + R_2) = 0,2 - 0,3$  для сцинтилляционных детекторов. Для полупроводниковых детекторов данный коэффициент ослабления  $A$  несколько меньше и изменяется уже в других пределах от 0,05 до 0,2, т. е. равен  $A = 0,05 - 0,2$ . Ослабленный, с уменьшенной до такой степени амплитудой сигнал (что демонстрирует временная диаграмма на рис. 35б) меняет свою полярность с помощью схемы инвертора Инв.

Раздельное следование по обоим маршрутам передачи входных сигналов, которые были обработаны по рассмотренным алгоритмам, завершается схемой  $\Sigma$  суммирования. В результате выполнения этой схемой функции линейного суммирования на ее выходе выделяется биполярный сигнал. Момент смены полярности такой формы сигнала будет слабо зависеть от изменений амплитуды входных сигналов в значительных пределах. Динамический диапазон изменения амплитуд может достигать 1:200 и более.

Момент смены полярности в выходном сигнале сумматора определяется схемой детектора нуля ДН. Детектор с высокой точностью фиксирует время пересечения сигналом нулевого уровня. Этот сигнал, пройдя схему временного селектора ВС, подготовленную сигналом порогового устройства ПУ, запускает схему выходного формирующего устройства ФВУ. Данная схема, что уже отмечалось ранее, нормирует выходной сигнал быстрого дискриминатора по длительности и амплитуде.

Характерно, что такая же идея может быть положена в компенсацию разброса не только амплитуды сигналов, но и их длительностей. Данный аспект имеет принципиальное значение для получения сигналов временной отметки с различных полупроводниковых детекторов. Формирующие устройства такого типа выпускаются фирмами, которые специализируются на электронных средствах данного направления.

### 7.9. ПОВЫШЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ БЫСТРЫХ ДИСКРИМИНАТОРОВ И РАСШИРЕНИЕ СФЕРЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Представлены и рассмотрены три основных варианта получения сигнала временной отметки с детекторных устройств. Быстрые дискриминаторы по фронту входных сигналов обладают недостаточной точностью получения сигнала временной отметки, но по быстродействию они вне конкуренции. Частота входных сигналов может достигать до 350 МГц и выше. Для быстрых дискриминаторов, выделяющих сигналы по пересечению нуля, эта частота будет уже несколько ниже 200–250 МГц, хотя сохраняется тенденция ее роста. Диапазон частот входных сигналов быстрых дискриминаторов по постоянной части сигнала обычно лежит в пределах 100–200 МГц, сохраняя тенденцию роста данного параметра.

Важно отметить, что в быстрых дискриминаторах по постоянной части сигнала для достижения высокой точности выделения сигнала временной отметки элемент задержки делают свободно заменяемым. Цепь его включения в виде разъемов выводят на переднюю или заднюю панель измерительного модуля, где с их помощью можно подключить кабель необходимой длины. Такое техническое решение позволяет учитывать длительность фронта поступающих сигналов, сводя к минимуму влияние указанного фактора, обеспечивая высокие параметры регистрации с помощью дискриминаторов данного типа при различных видах детекторов.

Все виды быстрых дискриминаторов, которые были представлены и рассмотрены выше, являются амплитудными селекторами интегрального типа. Регулируя величину их порога, можно осуществлять ее установку в пределах диапазона изменения амплитуд входных сигналов. В ряде случаев возникает необходимость ограничения сверху, чтобы исключить из результатов измерений вклад, обусловленный экстремальными величинами сигналов, связанных с фоновым излучением обычно космического происхождения. Проблема такого плана, как из-

вестно, решается применением дифференциального дискриминатора.

Особенности работы такого дискриминатора были обсуждены, когда рассматривались подобные структуры для амплитудного анализа. Устройство дискриминации этого вида выделяет сигнал на своем выходе, если величина входного сигнала находится в пределах амплитудного «окна». Амплитуда сигнала на входе дифференциального дискриминатора выше нижнего порога дискриминации, но не превышает его верхний порог.

Все эти положения будут справедливы для быстрого дифференциального дискриминатора. В таком случае в рассмотренные нами быстрые интегральные дискриминаторы достаточно ввести дополнительное пороговое устройство, которое, допустим, создаст и обеспечит им верхний порог. Тем самым они перейдут в новое качество, став, таким образом, дифференциальными дискриминаторами.

Понятно, что сложность схемы в таких устройствах в целом возрастает. Это не вызывает сомнений, так как, помимо порогового устройства, необходимо дополнительное логическое устройство, схема которого создаст и обеспечит требуемый алгоритм работы быстрого дискриминатора такого типа. Кроме того, следует отметить еще одну особенность в выделении сигналов временной отметки.

Если раньше эти сигналы получали в основном со сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов, то в последнее время номенклатура детекторных устройств значительно возросла. Появилась необходимость получения сигналов временной отметки с других детекторов: различные виды ионизационных камер и камер деления, дрейфовые камеры и камеры с сеткой, разнообразные координатно-чувствительные и позиционно-чувствительные детекторы.

В сигналах всех этих детекторных устройств достаточно высока фоновая составляющая. Например, в калифорниевой камере деления  $^{252}\text{Cf}$  выделяемый спектр нейтронов служит для калибровки спектрометров быстрых нейтронов по времени пролета. Регистрируя спектр, определяют разрешение и эффективность сцинтилляционного

нейтронного детектора. Располагая его на некотором расстоянии от камеры, фиксируют момент регистрации нейтрона сигналом СТАРТ.

Момент рождения и вылета нейтронов из камеры фиксируется сигналом СТОП, полученным из сигналов, связанных с осколками деления. Процесс деления сопровождается большим числом  $\alpha$ -частиц, которые дают сигналы, связанные с фоновой их составляющей. Путем задержки сигналов с камеры деления создают условия для регистрации нейтронного времяпролетного спектра в режиме обратной временной шкалы. В обоих каналах регистрации используются быстрые дискриминаторы по постоянной части сигнала, которые, обеспечивая высокие временные параметры, решают проблему фона.

Расширение сферы применения позиционно-чувствительных детекторов и привлечение временных методик измерений обусловили создание техники фиксации событий во времени и пространстве. В них стали использовать отметку времени по центру тяжести импульса, привязку к середине интервала времени и ее определение, а также

Таблица 3

Параметр	Значение
Входной сигнал	Отрицательный
Диапазон амплитуд	$-(0,01-5)$ В
Максимальная входная амплитуда	$\leq -10$ В
Длительность фронта входного сигнала	$\geq 1$ нс
Входное сопротивление	50 Ом
Регулировка уровня порога	$-(0,01-1,0)$ В
Частота входных сигналов	До 150 МГц
Выходные сигналы (токовый выход)	-16 мА
Выходные сигналы на нагрузке	50 Ом
Длительность выходных сигналов	$\sim 3$ нс
Внешний элемент задержки:	Кабель (типа РК-50)
для сцинтилляционных детекторов	$L = 0,3-1,0$ м
для ППД (планарные Ge-детекторы)	$L = 1,0-2,0$ м
для ППД (коаксиальные Ge-детекторы)	$L = 2,0-4,0$ м

компенсацию разброса такой привязки и т. д. В основу реализации такой техники были положены различные варианты как одинарных, так и двойных параллельных и последовательных преобразований типа время — амплитуда и амплитуда — время.

Параметры унифицированного быстрого дискриминатора по постоянной части сигнала (constant-fraction discriminator) имеют значения, представленные в таблице 3.

Быстрые дискриминаторы, известные еще как устройства временной отметки, различных типов производят практически все ведущие зарубежные фирмы, которые занимаются производством электронных средств ядерного приборостроения. Они предназначены для решения измерительных задач во временном анализе наносекундного диапазона. Эта измерительная техника выпускается как в стандарте NIM, так и в стандарте САМАС. Некоторые модули содержат до 8 таких устройств, размещенных в одном измерительном модуле.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сфера применения техники дискриминации и ее роль в экспериментальных исследованиях.
2. Требования к основным параметрам амплитудных дискриминаторов.
3. Интегральный дискриминатор (ИД), назначение в экспериментах, его структура и функции его составных частей.
4. Дифференциальный дискриминатор (ДД), его основные функции и отличие от ИД, структура и состав ДД.
5. Какой метод обработки сигналов реализуют дискриминаторы и в чем его суть?
6. Дискриминатор одноканального анализа (ДОКА), его специфика и роль, которая исполняется им в измерениях.
7. Какие задачи решают временные дискриминаторы в измерении параметров ядерного излучения?
8. Быстрый дискриминатор по фронту входных сигналов, его назначение и структура. Достоинства и недостатки.
9. Назначение, структура и роль составных частей формирователя временной отметки по пересечению нуля.
10. Быстрый дискриминатор по постоянной части сигнала, его структура и характерные особенности.
11. Сравните разновидности быстрых дискриминаторов по быстродействию и точности получения сигнала временной отметки.



## ГЛАВА 8

# МЕТОДЫ СОВПАДЕНИЙ И АНТИСОВПАДЕНИЙ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В основу нелинейных методов обработки детекторных сигналов положено все многообразие способов и методов, а также различные электронные средства. Все они выполняют в основном унифицированные функции ограничения, дискриминации и селекции. Селекция, как уже отмечалось, является одним из базовых вариантов отбора событий по заданному критерию (амплитуда, длительность, форма и т. п.). Решающая роль в выборе событий во времени и пространстве принадлежит методам совпадений и антисовпадений. Их основные положения, способы и электронная техника реализации будут представлены в данной главе.

### 8.1. СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СОВПАДЕНИЙ И АНТИСОВПАДЕНИЙ

Возникшие (как и метод счета событий) на заре зарождения ядерной электроники методы совпадений и антисовпадений широко применяются в различных областях науки и техники. На начальном этапе становления электронных методов ядерной физики счетный метод являлся удачной кооперацией электроники и электромеханики. В структуре счетчика присутствовали, как правило, две части: электронная и электромеханическая.

Триггеры счетчика на лампах (обычно триодах) составляли его первую часть, и сигналы с последнего триггера поступали на двухдекадный электромеханический счетчик. Для индикации состояния триггеров электронной части счетчика применялись неоновые лампочки. В этом отношении, что было характерно даже для изначального этапа становления ядерной электроники, метод совпадений и антисовпадений всегда был и оставался, если можно так сказать, «чисто электронным».

Несколько позже метод совпадений и антисовпадений был востребован электронными средствами вычислительной техники, где стал основой практически всех ее логических элементов. Данный метод послужил фундаментом для главных компонентов в составе различных структур, входящих в ЭВМ. Характерно, что идеи, заложенные в схемотехническую реализацию этого метода, в чистом виде (на что тоже надо обратить внимание) вошли во все многообразие логических композиций современных цифровых интегральных схем.

В конце 1920-х гг. были предложены первые варианты схемотехнических решений таких схем отбора событий на электронных лампах. Созданные устройства работали, используя сигналы со счетчиков Гейгера — Мюллера. Устройство, которое получило название схема совпадений, выделяло выходной сигнал, если на все его входы одновременно поступали сигналы с обоих счетчиков. В составе такой разновидности схемы использовались электронные лампы.

В одном варианте это были триоды (анод, сетка, катод), а в другом использовался тетрод (анод, две сетки, катод). Автор (W. Bothe) последнего варианта схемы совпадений удостоен в 1954 г. Нобелевской премии, так как его публикация в 1930 г. в одном из журналов оказалась несколько раньше. Другой автор (B. Rossi) в этом же году опубликовал схему совпадений на лампах типа триод, но в другом журнале, который вышел несколько позже.

Дальнейшее развитие данной электронной техники носило гетерогенный характер, т. е. было достаточно разнонаправленным. Почти до конца 1950-х гг. основным

элементом отбора совпадений были и оставались электронные лампы, и совершенствование этого элемента шло по пути применения новых, более высококачественных видов и типов ламп. Это стало насущной необходимостью, так как появились новые детекторные устройства в виде разнообразия сцинтилляционных детекторов.

Различные виды сцинтилляторов, и особенно «быстрая» их разновидность, вызвали необходимость создания для них фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Детекторы такого вида обусловили возникновение и распространение нового направления в развитии и становлении электронных устройств в форме быстрых схем совпадений. Для работы этих структур требовались уже сигналы наносекундной длительности.

Развитие и совершенствование наносекундной техники привело к разработке и использованию в ядерно-физических исследованиях нового метода, получившего название быстро-медленных совпадений. С появлением жидких сцинтилляторов стало возможным создание детекторов внушительных размеров, которые «просматривались» уже десятками и сотнями ФЭУ. Без схем совпадений решение задачи о корректном выделении сигналов с такого детектора вряд ли было бы возможным.

Появление новых, электронных, полупроводниковых элементов (диодов, различных видов транзисторов, туннельных диодов и т. п.) существенно повлияло на дальнейшее развитие и совершенствование устройств совпадений. Резко упало энергопотребление, повысилась их надежность, уменьшились габариты, расширились функциональные возможности, а также номенклатура электронных средств отбора событий.

Их совершенствованию в значительной мере способствовал еще и рост сложности экспериментальных исследований. Введение в строй ускорителей различных видов и назначения, что было характерно для 1960–1980 гг., повлекло за собой разработку и создание достаточно сложных по структуре систем отбора событий. Их основой стали различные варианты структур многократных совпаде-

ний и антисовпадений. Они послужили фундаментом для разнообразных устройств и систем хронирования.

Занимая далеко не последние позиции в технике эксперимента, методы совпадений и антисовпадений являются важной составной частью спектрометрии ядерных излучений. В настоящее время особенность таких измерений, как показывает практика, состоит в том, что в экспериментах одновременно используются методики и техника как амплитудной, так и временной спектрометрии. Электронная техника, которая объединяет эти методики, а также способствует появлению новых вариантов их применения, является в основном устройствами совпадений и антисовпадений, которые составляют логическую основу экспериментальных исследований.

Применение метода совпадений и антисовпадений ведет к повышению степени надежности и росту качества получаемых экспериментальных данных. Использование этих методов существенно снижает уровень регистрации фоновых событий, повышая достоверность результатов измерений. Действительно, если сцинтиллятор «просматривается» двумя ФЭУ, сигналы которых поступают на схему совпадений, то в ее выходных сигналах будут практически полностью исключены импульсы, связанные с шумами ФЭУ.

Применение метода совпадений позволяет с помощью сцинтилляционного детектора на основе органического сцинтиллятора (стильбен) эффективно разделять нейтроны и гамма-кванты в измерениях спектров нейтронов методом времени пролета. Помимо этого, например, в методе бета-, гамма-совпадений даже в случае простого измерения интенсивности одного из компонентов, скажем, бета-излучения, общая погрешность измерения его активности не превышает 0,2–0,5% даже в случае сложных механизмов бета-распада. Такой результат без применения метода совпадений вряд ли был бы достижим.

Это предельно сжатая и далеко не полная демонстрация роли и места методов совпадений и антисовпадений в практике ядерно-физических исследований. Проводя с их помощью селекцию событий и решая задачу одновремен-

ности их поступления, можно получить ответ и на целую совокупность проблем, связанных с регистрацией событий в пространстве. Задачи такого вида доминируют в физике элементарных частиц и физике высоких энергий.

Одним из основополагающих инструментов, с помощью которого можно решать такие «пространственные» задачи, является метод задержанных совпадений. Его широко используют в составе различных годоскопических устройств, выделяющих частицы, которые перемещаются в установленном или заданном направлении. Решению многих пространственных проблем способствует применение особого класса устройств отбора событий в виде мажоритарных схем совпадений. Такая разновидность устройств отбора событий была создана с учетом специфики данного направления физических исследований.

## 8.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОВ СОВПАДЕНИЙ И АНТИСОВПАДЕНИЙ

Методы совпадений и антисовпадений, как показала практика их применения, являются одним из наиболее эффективных инструментов, используемых для решения различных задач и проблем пространственно-временного плана в ядерно-физических исследованиях. Именно такой характер носит все многообразие задач физики высоких энергий, в которых эти методы и их технические средства заняли доминирующие позиции.

Они входят в состав разнообразных годоскопических, а также телескопических структур, которые являются одной из базовых частей таких систем регистрации. Годоскопические системы, как известно, фиксируют направление перемещения регистрируемых частиц в значительном пространственно-временном объеме проводимого эксперимента. В свою очередь, телескопические структуры отбирают лишь фиксированные направления при регистрации излучения. Электронные средства отбора событий в этих системах представлены той или иной разновидностью методов и техники совпадений и антисовпадений.

В таких достаточно сложных системах регистрации все многообразие техники совпадений и антисовпадений обеспечивает предварительный отбор событий. Нередко их объединяют и даже выделяют в специальные устройства, получившие название логические процессоры, которые создают необходимую степень фильтрации поступающих сигналов. Кроме того, устройства этого вида осуществляют синхронизацию работы электронных средств экспериментальной установки. Характерно, что эти средства могут находиться не только в составе измерительных систем, но и в других системах установки, которые обеспечивают ее управление и работу в заданном режиме.

Устройства, в основу функционирования которых положены методы совпадений и антисовпадений, используют не только в таких довольно сложных физических исследованиях. Электронные средства данного вида, помимо различных сфер атомной науки и техники, нашли применение в различных областях химии, геологии, медицины, биологии, охраны окружающей среды и т. д. Все эти аспекты лишней раз подчеркивают и демонстрируют ту весьма важную роль, которую играют методы совпадений и антисовпадений в практике эксперимента.

В силу представленной совокупности доводов по этим методам будет уместно определить их суть. Итак, сущность метода совпадений состоит в определении факта одновременного или в пределах заданного времени появления событий, дающего информацию о процессах, происходящих в пространстве и/или во времени. Попробуем разобраться и уточнить последний момент в определении сути метода совпадений.

Действительно, практика применения метода демонстрирует тот факт, что совпадения можно определять одновременно и в пространстве, и во времени. Вместе с тем этот метод может еще отдельно давать ответы и на факты появления событий либо в заданной точке пространства, либо в установленное для них время. Все это еще раз подчеркивает целесообразность и необходимость такого сочетания союзов (и/или).

Рассмотрим некоторые аспекты и суть метода антисовпадений. Итак, сущность метода антисовпадений состоит в нарушении в пределах установленного времени факта одновременности или установленной последовательности событий, несущего информацию о выполнении условий реализации процесса во времени и/или пространстве. Какой же факт фиксируется в случае антисовпадений и что же это за ситуация?

Представим, что устройство имеет два входа, на которые поступают сигналы определенной длительности. В таком случае на выходе появится сигнал при условии, если сигналы на его входах не совпадают. Действительно, только на отдельные и не перекрывающиеся между собой входные сигналы будет реагировать устройство антисовпадений, выделяя свой выходной сигнал. Структура и функционирование такого устройства, а также его особенности будут рассмотрены несколько позже.

### 8.3. СТРУКТУРА БАЗОВЫХ СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА СОВПАДЕНИЙ

Схемы совпадений служат в измерениях для отбора лишь тех сигналов, во временном положении которых содержится информация, представляющая определенный интерес. Данные о событиях или случившемся процессе, как правило, заключены в сигналах, поступающих на входы устройства совпадений. В качестве критерия их отбора, как нам уже известно, используется одновременность поступления этих сигналов.

Рассмотрим наиболее общие моменты, которые связаны с обеспечением и выполнением основного положения для данного критерия выбора событий. Главным инструментом в реализации обстоятельства одновременности является применение дополнительной, искусственной задержки обрабатываемых сигналов. С помощью задержки осуществляется обычный временной сдвиг сигналов на оси времени.

Действительно, если одно событие происходит раньше другого, то сигнал, связанный с первым событием, задерживают на время, спустя которое имеет место уже второе событие. Таким образом, сигналы, обусловленные этими событиями, становятся совпадающими и одновременно поступают на входы устройства совпадения. Выходные сигналы такого устройства будут подтверждать и демонстрировать факт совпадения входных сигналов.

Рассмотрим наиболее распространенные варианты реализации метода совпадений в виде типовых структурных схем. Моделью унифицированного элемента отбора событий в этих схемах служат ключевые элементы. Их исходное состояние (замкнутое или разомкнутое) изменяется при воздействии внешних сигналов. Новое состояние ключевого элемента поддерживается в течение всей длительности поступившего сигнала. Один из вариантов схемы совпадений на три входа представлен на рисунке 36.

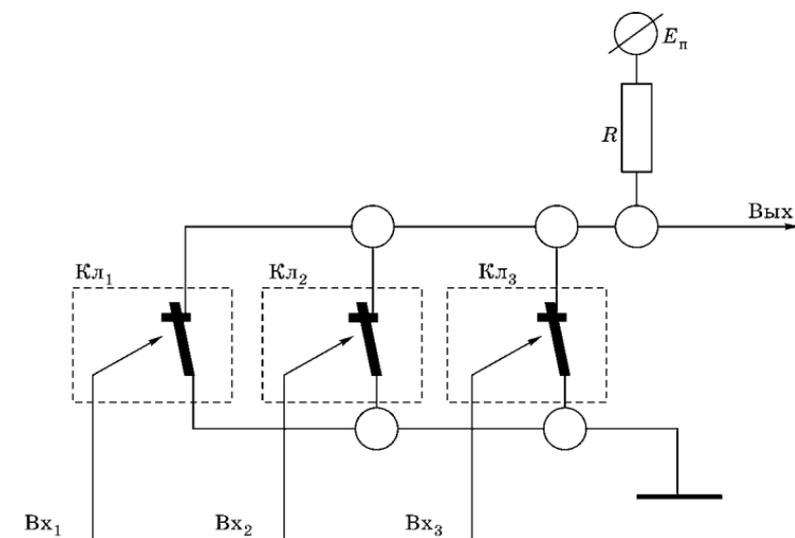


Рис. 36

Эквивалентная схема совпадений на три входа с параллельными ключами Кл<sub>1</sub>–Кл<sub>3</sub>:

Вх — вход; Кл — ключ;  $E_n$  — напряжение питания;  $R$  — токоограничительное сопротивление.

В исходном состоянии все три параллельно включенных ключа  $K_{л1}$ – $K_{л3}$  находятся в замкнутом состоянии, что обеспечивает на выходе схемы уровень нулевой шины. Любой из поступивших по входам  $V_{x1}$ – $V_{x3}$  сигналов будет размыкать соответствующий ключ  $K_{л1}$ – $K_{л3}$ . Однако состояние уровня на выходной шине меняться не будет. Это состояние останется неизменным, даже если по двум любым входам одновременно поступят два сигнала. Они разомкнут два ключа, а третий ключ останется замкнутым, что обеспечит на выходе схемы все тот же нулевой уровень.

Характерно, что только при одновременном поступлении всех трех сигналов по входам  $V_{x1}$ – $V_{x3}$  ключи  $K_{л1}$ – $K_{л3}$  синхронно, т. е. единовременно, примут разомкнутое состояние. Важно отметить, что в такой ситуации изменится выходной уровень схемы совпадений, который становится равным напряжению питания  $E_n$ . Этот уровень на выходе схемы поддерживается и остается неизменным в течение перекрытия всех входных длительностей, связанных с поступившими сигналами, однозначно определяя суть реализации принципа совпадений.

Функцию ключа может выполнять любой из активных компонентов, который под воздействием входного сигнала может переходить из проводящего в непроводящее состояние или наоборот. Данную функцию могут выполнять биполярный или полевой транзисторы любого типа, а также электронные лампы. Именно лампа (триод) служила ключевым элементом в составе схемы совпадений, предложенной В. Rossi в 1930 г. В реализованной схеме лампы были включены параллельно.

Наряду с вариантом параллельного соединения ключей существует вариант и последовательного их включения. Такого вида была эквивалентная структура схемы совпадений на два входа, предложенная в том же году W. Bothe. В исходном состоянии ее ключи были разомкнуты. Вариант схемы совпадений с разомкнутыми ключами на три входа представлен на рисунке 37.

В исходном состоянии на выходе схемы удерживается уровень нулевой шины. Сигнал, поступивший по любому

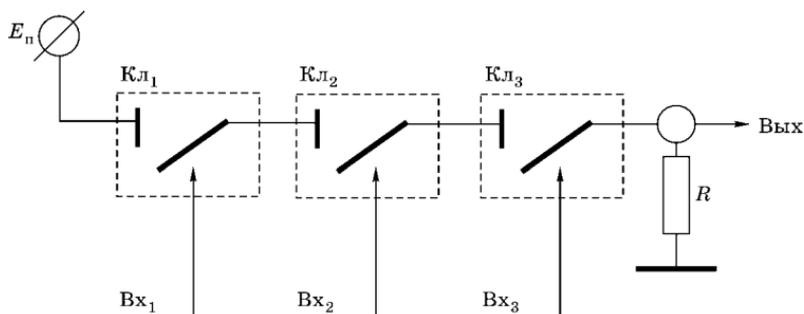


Рис. 37  
Эквивалентная схема совпадений на три входа с последовательными ключами  $Кл_1$ – $Кл_3$ :

$Vx$  — вход;  $Кл$  — ключ;  $E_n$  — напряжение питания;  $R$  — токоограничительное сопротивление.

ее входу, замыкает лишь один ключ, связанный с этим входом. При такой ситуации выходной уровень схемы не меняется. Состояние и уровень на выходе схемы совпадения изменится в случае одновременного поступления сигналов по всем входам схемы.

При этом синхронное изменение состояния всех ключей  $Кл_1$ – $Кл_3$  (они все переходят в замкнутое состояние) приводит к появлению на выходе схемы уровня питания  $E_n$ . Точно так же, как уже отмечалось, выходной уровень  $E_n$  будет оставаться неизменным лишь на время перекрытия входных сигналов, поступивших по всем входам схемы совпадений. В качестве ключей используются различные активные электронные компоненты (транзисторы всех видов и типов, электронные лампы, интегральные схемы и т. д.).

Характерно, что схема совпадений на параллельных ключах относится к категории схем сложения. В их основу положена идея суммирования сигналов. Необходимо отметить, что суммирование может быть линейным и нелинейным. Оба варианта используются в схемах совпадений. В свою очередь, схема совпадений на последовательно включенных ключах относится к категории схем логического умножения. Критерий линейного суммирования

нашел применение в мажоритарных структурах отбора совпадений, которые рассмотрим несколько позже.

Имеются и другие разновидности схем совпадений (фазовые, дифференциальные, выбора меньшего, быстрые, приоритетные и т. п.), но следует отметить еще одну особенность. Варианты соединения в них ключевых элементов можно наблюдать в составе цифровых интегральных схем. По параллельному принципу включены транзисторы в логических элементах интегральных схем типа ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика) и ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика). В интегральных схемах типа КМОП (комплементарная пара «металл — окисел-полупроводник») в их логических структурах использованы одновременно оба варианта соединения ключевых элементов.

#### 8.4. СХЕМЫ АНТИСОВПАДЕНИЙ, ИХ ОРГАНИЗАЦИЯ И ТИПОВЫЕ СТРУКТУРЫ

Ранее была определена сущность метода антисовпадений (см. п. 8.2). Как показала практика, для построения схем антисовпадений используется та же элементная база и аналогичные компоненты, что и для схем совпадений, однако имеются некоторые отличия. Прежде чем говорить о них, необходимо вспомнить, что схемы совпадений устанавливают факт одновременности появления событий на всех входах схемы. Только при такой ситуации на ее выходе появится сигнал.

Тем не менее отсутствие такого сигнала тоже несет информацию, и в ряде случаев весьма полезную. Однако в этой ситуации ее невозможно однозначно интерпретировать, а также нельзя точно установить, на каком из входов схемы отсутствовал сигнал. В ряде случаев это может быть заранее выделенный вход. Данную задачу решают с помощью схем антисовпадений. Несмотря на значительную идентичность элементной базы со схемами совпадений, схемы антисовпадений отличаются от них.

Размежевание происходит прежде всего по вариантам решаемых задач, сводимых к различным версиям,

включая структуру и организацию самих схем. Кроме того, схемы антисовпадений по своей структуре крайне редко бывают многовходовыми. Типовые задачи, которые решаются благодаря применению схемы антисовпадений, содержат главным образом несколько каналов совпадений и, как правило, один канал антисовпадений, который называется еще каналом запрета.

Если обратиться к рассмотренным ранее схемам совпадений на три входа с последовательными или параллельными ключами, то один из входов каждой схемы можно перевести в режим антисовпадений. Установим заранее вход, который будет функционировать в режиме антисовпадений. Свяжем эту ситуацию с параллельным соединением ключей, которая представлена на рисунке 36. При этом в исходном состоянии схемы один из ее ключей, который будет обусловлен выбранным входом, должен находиться уже в разомкнутом положении.

При синхронном поступлении входных сигналов на все входы устройства состояние каждого из его ключей будет изменено на противоположное. В таком случае разомкнутый ключ замкнется и соединит выход схемы антисовпадений с земляной шиной. Изменения выходного уровня схемы не произойдет. В этом будет состоять нарушение факта одновременности, а данный вход, связанный с этим ключом, можно рассматривать как канал запрета.

Не составляет труда понять, что при последовательном соединении ключей (см. рис. 37) в исходном состоянии один из них должен находиться в замкнутом положении. Тогда вход, соединенный с этим ключом, считается каналом запрета. Аналогичная ситуация, как и ранее, возникнет, если поступят сигналы по всем входам сразу, т. е. все ключи поменяют свое состояние. Выходного сигнала при этом не будет, так как ключ, связанный с запрещающим входом, разомкнется. Это и будет фактом нарушения критерия одновременности, что составляет суть метода антисовпадений.

Процесс антисовпадений, как и вариант совпадений, аналогично реализуется лишь при наличии всех входных сигналов, а также при полном перекрытии их длитель-

ности — это необходимое условие логики таких процессов при измерениях. В противном случае может наблюдаться и иметь место вариант некорректного «пролезания» сигналов, образования логических «щелей» и снижения эффективности запрета, т. е. искажение результатов измерений при осуществлении логики антисовпадений.

Если использовать логические элементы цифровых интегральных схем, то организовать схему антисовпадений будет достаточно просто. Подбираем логический элемент И с необходимым числом входов. Устанавливаем на одном отобранном его входе инвертор, т. е. логический элемент НЕ, образуя таким образом канал запрета. Полученная таким образом структура будет уже схемой антисовпадений, которую можно использовать в составе разнообразных устройств и схем отбора событий.

Обратим внимание на своеобразие функционирования образованного логического устройства. Его схема по оставшимся входам логического элемента И будет выполнять функцию совпадения, выделяя при этом на выходе элемента сигнал. Характерно, что выходного сигнала не будет, если на все входы схемы, включая канал запрета, одновременно поступили сигналы. Выходной сигнал не появится и при отсутствии сигнала на запрещающем входе устройства, если нарушено условие одновременности на его входах совпадения.

Характерно, что метод антисовпадений, как и варианты использования техники отбора событий такого плана, широко применяется в экспериментальной ядерной физике. Прежде всего следует отметить эксперименты по изучению поглощения ядерного излучения образцами различных веществ. Применение метода и техники антисовпадений весьма эффективно при регистрации продуктов излучения от источников малой или слабой активности. Устройства антисовпадений широко применяются в составе различных технических средств выделения и измерения интервалов времени. Это особенно характерно для наносекундной области, где сфера использования такой техники достаточно многогранна.

## 8.5. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СХЕМ СОВПАДЕНИЙ И АНТИСОВПАДЕНИЙ

Методы совпадений и антисовпадений, как и техника их реализации, возникшие на рубеже 1930-х гг., в дальнейшем находились в состоянии непрерывного развития и совершенствования. Возникла потребность в характеристиках и параметрах, которые позволили бы анализировать и сравнивать эти методы и устройства. На различных этапах их развития некоторые параметры были уточнены, а другие утратили свою актуальность.

Например, в настоящее время, видимо, нет смысла говорить о чувствительности схем совпадений. Однако этот параметр еще в 1960-е гг. был весьма актуален. Точно так же утратил свою актуальность и значимость рабочий диапазон амплитуд входных сигналов схем совпадений. Теперь на все устройства такого вида поступают (и используются) лишь сигналы фиксированной амплитуды.

Определим и рассмотрим основную разновидность параметров схем совпадений. Из всей совокупности их характеристик и параметров выделим следующие:  $\tau$  — разрешающее время;  $\varepsilon$  — эффективность;  $\mu$  — мертвое время;  $k$  — коэффициент отбора;  $t_3$  — время задержки сигнала (вход — выход);  $t_{и}$  — длительность выходных сигналов и  $n$  — число входов схемы совпадений. Остановимся на каждом из параметров и обсудим их более подробно.

Основным параметром схемы совпадений принято считать ее разрешающее время  $\tau$ . Это интервал времени, в пределах которого устанавливается и фиксируется факт одновременности поступления сигналов, т. е. их регистрируют как совпадающие. Если два сигнала необходимой полярности, амплитуды и длительности  $t_c$  одновременно поступают на двухвходовую схему совпадений, то они, естественно, регистрируются как совпадающие. Этот факт фиксируется выходным сигналом схемы заданной длительности.

Таким образом, если входные сигналы будут разнесены на время, меньшее  $t_c$ , то выходной сигнал всегда имеется в наличии. В таком случае можно говорить, что раз-

решающее время схемы совпадений  $\tau$  будет равно  $\tau = 2t_c$ . Величину разрешающего времени можно определить по кривой задержанных совпадений. Ее «снимают» или получают с помощью переменной, т. е. регулируемой задержки, включенной на одном из входов схемы совпадений.

Изменяя величину задержки, которая должна быть несколько больше длительности поступающих сигналов с фиксированными параметрами, снимают кривую совпадений. Понятно, что это зависимость числа совпадений от величины задержки. В микросекундном диапазоне такая зависимость имеет практически прямоугольную форму в координатах «число отсчетов — время». Для наносекундного диапазона зависимость такого вида будет иметь симметричную, как правило, колоколообразную форму в тех же координатах.

Различают физическое и электронное разрешающее время схем совпадений. В микросекундном диапазоне эти параметры практически одинаковые, так как не отличаются друг от друга. Именно вариант электронного разрешающего времени был представлен выше при рассмотрении данного параметра. Однако физическое разрешающее время, как показывает практика, всегда будет хуже электронного.

В выделении и получении этого параметра участвует значительная совокупность технических средств: детекторы, предусилители, усилители, дискриминаторы, формирователи и т. п. Их шумовые факторы, а также присутствие в их составе различного рода флуктуаций, в том числе и временных, деструктивно влияют на разрешающее время. Более того, это время становится параметром всей измерительной установки, используемой в эксперименте.

Для завершения обсуждения этой характеристики схемы совпадений необходимо отметить еще один момент. В настоящее время в каждом таком устройстве имеется возможность выбрать необходимое значение разрешающего времени. С помощью переключателя на передней панели измерительного модуля устанавливают величину разрешающего времени схемы совпадений в пределах от 0,1 до 2,0 мкс. Обычно в таких пределах обеспечивается выбор этого времени в виде пяти его значений: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 и

2,0 мкс. Следовательно, для решения задач эксперимента физикам предоставляется возможность выбрать и установить любое из пяти значений данного параметра.

Другим важным параметром схем совпадений является их эффективность  $\varepsilon$ . Она показывает долю зарегистрированных совпадений от их общего числа, т. е. не все совпадения регистрируются. Вместе с тем схемы совпадений наряду с так называемыми истинными совпадениями регистрируют и фоновую составляющую, т. е. случайные совпадения. Это неизбежная фиксация событий в методе совпадений, которая является неотделимой частью в таких измерениях, влияющая на эффективность регистрации. Важно заметить, что фон, обусловленный случайными совпадениями, будет падать с уменьшением разрешающего времени схем совпадений.

Еще одним существенным параметром схем совпадений считают их мертвое время  $\mu$ . Данная характеристика схемы совпадений является мерой ее нечувствительности. Такая ситуация возникает при каждом акте регистрации совпадений. Этот весьма неблагоприятный, но неизбежный параметр приводит к снижению и просчетам совпадений в целом. Кроме того, мертвое время уменьшает еще и эффективность регистрации схем совпадений. Данный параметр нередко является причиной появления логических «щелей» при функционировании этих схем в режиме антисовпадений.

Коэффициент отбора  $k$  схемы совпадений показывает ее способность отличить совпадение от несовпадения через отношение амплитуд выходных сигналов. Обычно используют амплитуду выходного сигнала  $U_n$  (совпадения на  $n$  входах) и почти такой же сигнал, но при совпадениях на  $(n - 1)$  входах, т. е.  $U_{n-1}$ . В таком случае коэффициент отбора  $k = U_n/U_{n-1}$ . Следует заметить, что данный параметр весьма существен и играет важную роль в схемах совпадений, построенных по мажоритарному принципу.

В основу этой разновидности метода совпадений положена идея суммирования одинаковых по амплитуде и длительности совпадающих входных сигналов. Выделение момента совпадений определяется путем превышения установленного уровня полученной суммой нормированных

амплитуд. Это ведет к ограничению кратности совпадений, т. е. снижению числа входов у таких схем совпадений. Установлено, что коэффициент отбора  $k$  тоже падает при увеличении кратности совпадений.

Параметр в виде времени задержки сигнала  $t_3$  определяет быстродействие схем совпадений и влияет на их мертвое время, а значит, и на эффективность схем совпадений в целом. Все это лишний раз подчеркивает важность такого параметра. Время задержки сигнала (вход — выход) схемы совпадения или время его распространения в ней стремятся свести к минимуму, и особенно в быстрых схемах совпадений.

Длительность выходных сигналов схем совпадений  $t_{\text{и}}$  не регулируется. Ее величина для обычных схем совпадений составляет 0,1–0,5 мкс и выдается, как правило, в уровнях интегральных схем типа ТТЛ положительной и отрицательной полярности. Для быстрых схем совпадений длительность выходных сигналов находится в пределах 10–20 нс. Это токовые сигналы отрицательной полярности. Их величина 16–20 мА на один выходной разъем, которых иногда бывает несколько, создает на нагрузке в 50 Ом быстрый сигнал отрицательной полярности амплитудой около 1 В.

Число входов  $n$  в стандартных схемах совпадений находится в пределах от трех до пяти, и они часто коммутируемые, т. е. имеют возможность отключения. Естественно, в этих схемах имеется отдельный вход антисовпадений, который логически связан с ее входами совпадений. Следует заметить, что для режима антисовпадений параметры устройства в основном аналогичны всем характеристикам схемы совпадений.

## 8.6. РАЗНОВИДНОСТИ СХЕМ СОВПАДЕНИЙ

Были представлены стандартные модификации схем совпадений. Они являются основой для базовых вариантов типовых схем совпадений как микросекундного, так и наносекундного диапазонов. Однако последние, именуемые

еще быстрые схемы совпадений, относятся к устройствам особой разновидности. Их входные и выходные параметры в значительной мере отличаются от характеристик традиционных схем совпадений. Данный факт нетрудно установить, обратив внимание на обстоятельства, изложенные и отмеченные в предпоследнем абзаце предыдущего параграфа.

Просто «состыковать» быстрые и обычные схемы совпадений, т. е. подать выходные сигналы одних на вход других, не получится. Устройства, если не выйдут при этом из строя, все равно останутся неработоспособными. Таким образом, совместное использование этих схем совпадений в принципе неосуществимо. Необходимы дополнительные специальные электронные средства, которые обеспечивают согласование уровней сигналов. Это является основным препятствием для совместного применения в эксперименте обычных схем совпадений микросекундного диапазона и быстрых схем совпадений наносекундного диапазона.

В первой части, где обсуждается главным образом электронная техника линейных методов обработки детекторных сигналов, были рассмотрены различные варианты линейных схем пропускания. Они выделяют и пропускают на выход линейные сигналы лишь при наличии соответствующего уровня на управляющем входе данной схемы. Их называют еще линейными воротами. Тем не менее если провести аналогию, то схемы совпадений можно, по всей видимости, отнести к категории нелинейных схем пропускания. В этом случае всю совокупность таких устройств можно считать одной из разновидностей нелинейных ворот.

Как известно, при нелинейной обработке сигналов, их выделении и формировании информация об амплитуде входных сигналов в основном утрачивается. Сохраняется и передается лишь временная ее составляющая, которая широко и эффективно используется всеми схемами совпадений, осуществляющими отбор событий. В основу такого отбора, как уже известно, положен критерий одновременности появления сигналов на входах таких схем или

поступление их в пределах установленного промежутка времени.

Если взять за основу нетрадиционный критерий отбора событий, то можно получить оригинальную структуру такого назначения. В качестве примера можно рассмотреть достаточно нетрадиционную быструю схему совпадений. В основу ее функционирования был положен приоритетный принцип отбора событий. Этот принцип с высокой точностью устанавливает, какой из двух сигналов и по какому входу поступает раньше другого сигнала.

Данный факт можно зафиксировать с помощью обычного *RS*-триггера, выполненного на интегральных схемах (ИС) типа ЭСЛ или ТТЛ (эмиттерно-связанной логики или транзисторно-транзисторной логики). Однако более высокие параметры были получены при использовании ИС типа ЭСЛ. Точность определения очередности поступления входных сигналов таким устройством на ЭСЛ составила менее 20 пс.

Следует отметить, что триггер такого типа использовался в нетрадиционном варианте его включения, который не рекомендуется технической справочной литературой. Действительно, в исходном состоянии на оба его входа подавались уровни логической единицы, и состояние триггера было неопределенно. Поступление на его входы нулевых уровней придавало триггеру устойчивое состояние.

При этом состояние его выходов однозначно определяло, по какому из его входов нулевой уровень поступил раньше. Различие в очередности поступления сигналов, которое определялось установившимся состоянием триггера, которое не превышало ранее отмеченной величины. Данный *RS*-триггер, получивший возможность точно определять порядок поступления сигналов по своим входам за счет нетрадиционного варианта его включения, был назван авторами приоритетным дискриминатором. Рассмотрим функциональную схему быстрой схемы совпадений на основе приоритетных дискриминаторов, которая представлена на рисунке 38.

Длительность одновибратора Одн, которая регулируется, задает величину разрешающего времени быстрой

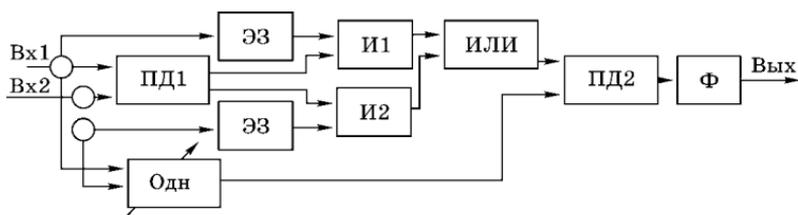


Рис. 38

Быстрая схема совпадений на базе приоритетных дискриминаторов: Вх — вход; Вых — выход; И, ИЛИ — логические элементы; Одн — одновибраторы с регулируемой длительностью; ПД — приоритетный дискриминатор; Ф — формирователь; ЭЗ — элементы задержки.

схемы совпадений. Он запускается первым сигналом, поступившим по любому ее входу. Схема ПД1 определяет, по какому из входов сигнал поступил первым и готовит соответствующий логический элемент И для пропуска второго сигнала, поступающего по другому входу.

Логический элемент ИЛИ объединяет и передает сигналы с обоих элементов И1 и И2, т. е. вторые сигналы обоих входов на другой приоритетный дискриминатор. Схема ПД2 определяет, какой из поступивших сигналов закончится раньше. Если это сигнал со схемы Одн, то выходного сигнала со схемы совпадений не будет, так как второй сигнал не попадает в ее заданное разрешающее время  $\tau$ . Это время равно

$$\tau = T_{\text{Одн}} - t_{\text{ЭЗ}},$$

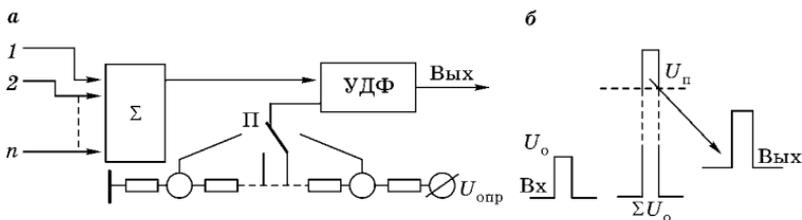
где  $T_{\text{Одн}}$  — длительность одновибратора;  $t_{\text{ЭЗ}}$  — время задержки сигнала схемой ЭЗ.

Два элемента задержки ЭЗ одинаковой величины создают условия для получения минимального значения разрешающего времени быстрой схемы совпадений. Необходимо заметить, что при условии  $t_{\text{ЭЗ}} > T_{\text{Одн}}$  это время будет уже равно нулю. Итак, если раньше закончится сигнал со схемы ИЛИ, то схема ПД2 выделяет сигнал, запускающий выходной формирователь Ф. Его сигнал фиксирует факт совпадения двух сигналов на входах Вх1 и Вх2 в пределах установленного разрешающего времени быстрой схемы совпадений и является ее выходным сигналом.

Рассмотренная быстрая схема совпадений имеет кратность отбора событий, равную двум. В свою очередь, кратность отбора типовых, унифицированных схем совпадений лежит в пределах от трех до пяти. В практике экспериментальных исследований нередко требуется более высокая кратность отбора событий, которая может достигать до десятка и выше. Такие ситуации характерны и складываются в исследованиях по физике высоких энергий, а также в физике элементарных частиц, привлекательность которых имеет тенденцию роста.

Казалось бы, эти проблемы можно решить путем каскадирования и объединения типовых схем совпадений. Однако такое решение даже в случае использования быстрых схем совпадений ведет к росту задержек распространения и передачи сигналов, что является неприемлемым для ряда ситуаций. Для решения возникших проблем созданы и используются мажоритарные схемы совпадений. В основу функционирования таких устройств положена идея линейного сложения входных сигналов. Структура схемы устройства совпадений данного вида приведена на рисунке 39а.

Нормированные по амплитуде и длительности входные сигналы поступают на входы от 1 до  $n$  линейного суммирующего устройства  $\Sigma$ . Амплитуда на его выходе будет пропорциональна числу совпавших сигналов. Кратность совпадений выбирают с помощью переключателя  $\Pi$  вели-



**Рис. 39**  
Мажоритарная схема совпадений (а)  
и сигналы на выходе схем, входящих в ее состав (б):

$\text{Вх}_{1-n}$  — входы;  $\text{Вых}$  — выход схемы совпадений;  $\Sigma$  — суммирующее устройство;  $\Pi$  — переключатель величины порога; УДФ — устройство дискриминации и формирования;  $U_{\text{п}}$  — пороговый уровень;  $U_o$  — амплитуда входных сигналов;  $\Sigma U_o$  — сигнал на выходе суммирующего устройства;  $U_{\text{оп}}$  — опорное напряжение.

чины порога  $U_n$  устройства дискриминации и формирования УДФ. Основные сигналы в структуре мажоритарной схемы совпадений представлены на рисунке 39б. Выходной сигнал со схемы УДФ выделяется фиксированной амплитуды и длительности. Он отражает тот факт, что кратность совпадений на входах данного устройства не меньше числа выбранного и установленного переключателем П, независимо от очередности и варианта их поступления.

Разнообразие мажоритарных схем совпадений отличается главным образом схемами суммирующих и дискриминирующих устройств. Основу устройств суммирования составляют схемы сумматоров на базе операционных усилителей, а устройства дискриминации создаются на основе интегральных компараторов. В составе быстрых мажоритарных схем совпадений широко используются токовые сумматоры и быстрые компараторы в интегральном исполнении.

## 8.7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ И ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ОТБОРА СОБЫТИЙ

Все многообразие схем совпадений и антисовпадений относится к более широкому классу средств отбора сигналов, ориентированных на различные направления экспериментальных методов ядерной физики. Следует заметить, что данная разновидность электронной техники продолжает достаточно интенсивно развиваться и совершенствоваться. Характерно, что такая тенденция довольно четко прослеживается, несмотря на некоторый спад интереса к разработкам средств ядерной электроники общей ориентации и традиционного назначения.

Разнообразные варианты, а также различные методические основы, заложенные в средства отбора событий, составляют те или иные версии техники совпадений и антисовпадений. Их гетерогенный характер схемотехнических решений, объединенный логикой экспериментальных

исследований, определили новый класс или разновидность электронных средств экспериментальной физики. Эти устройства, ставшие неотъемлемой частью измерительных систем сложных экспериментальных установок, получили название логические процессоры.

Необходимость создания данной разновидности электронной техники вызвана значительным ростом сложности экспериментальных исследований, как в физике элементарных частиц, так и в физике ядра высоких и средних энергий. В значительной мере произошло увеличение числа детекторных устройств, весьма расширилась их номенклатура, реально возросло пространство сбора событий, а также сложность геометрии эксперимента. Более того, в существенной мере сократилось время реакции и принятия решений на каждом из этапов селекции событий, численность которых также возросла.

Проведение измерений такого плана вызвало необходимость привлечения топологических критериев в их организации, включая варианты отбора событий. Имеется в виду необходимость учета углов «падения», т. е. налета исходных частиц, их энергии, а также углов разлета образовавшихся компонентов ядерных реакций, вызванных ими на мишени изучаемого материала. Обратимся к простой модели обычной реализации пространственно-временной задачи по изучению взаимодействия заряженных частиц с исследуемым веществом.

В основу этих измерений положены, как правило, топологические критерии, определяющие структуру и базу для всех вариантов определения основных параметров. Их фундаментом являются различные версии и виды телескопических и годоскопических систем регистрации. С их помощью определяются направление исходного воздействия и углы разлета компонентов ядерной реакции. Топология эксперимента, которая нередко еще называется его геометрией, а также вариант отбора событий в нем представлены на рисунке 40.

Исходное направление поступления частиц на мишень М определяется телескопической системой из двух «полупрозрачных» сцинтилляционных детекторов Дет.1 и

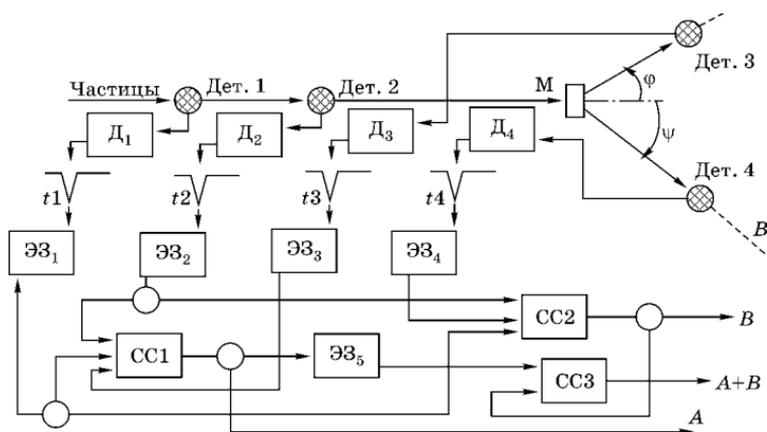


Рис. 40  
Стандартная топология измерений и вариант отбора событий в эксперименте (пояснения в тексте)

Дет.2. Углы  $\phi$  и  $\psi$  разлета продуктов реакции из мишени М фиксируются и определяются с помощью двух других детекторов Дет.3 и Дет.4. Их расположение характерно для годоскопической системы.

С каждого из этих детекторов Дет.1–Дет.4 сигналы поступают на дискриминаторы  $D_1$ – $D_4$ , где они нормируются по амплитуде и длительности. Кроме того, моменты времени их появления  $t_1$ – $t_4$  фиксируются на временной оси. Представленная геометрия эксперимента диктуется и определяется его задачами. Получаемые результаты измерений, обусловлены с одной стороны, топологическими критериями, а с другой стороны, структурой системы отбора событий, состоящей из схем совпадений  $CC_1$ – $CC_3$ .

На практике несоблюдение одновременности поступления событий, а это, если можно так выразиться, ключевое нарушение основного положения метода совпадений, должно быть скомпенсировано. Для таких целей используются элементы задержки  $ЭЗ_1$ – $ЭЗ_5$ , как правило, в виде отрезков кабеля необходимой величины. Временной разброс в появлении сигналов связан со всей совокупностью факторов пространственно-временного плана, т. е. это топология, очередность поступления, время регистрации и т. п.

Первая схема совпадений СС1, фиксируя факт совпадения сигналов на своих входах, выдает выходной сигнал. С его помощью, управляя измерительными модулями, можно выделять и регистрировать лишь экспериментальные данные, представляющие интерес. В таком случае в измерительной системе можно будет накапливать информацию о процессах, происходящих в направлении  $A$ , т. е. под одним из выбранных углов  $\varphi$ . Измерительная система на рисунке 40 не представлена.

Вторая схема совпадений СС2 таким же образом способствует получению экспериментальных данных в направлении  $B$ , т. е. под другим углом  $\psi$ . Таким образом, можно выделять и фиксировать информацию по каждому из установленных направлений исходя из условий экспериментальных исследований. Третья схема совпадений СС3 будет обеспечивать полный единовременный сбор данных эксперимента по обоим направлениям разлета компонентов ядерных реакций на мишени  $M$ .

При такой ситуации создаются условия для всестороннего и глубокого изучения всего многообразия ядерных превращений. Их можно проводить в широком диапазоне энергий для различных угловых распределений продуктов ядерных реакций. Даже при получении счетной информации с помощью такой системы отбора событий можно регистрировать и получать весьма интересные результаты.

Появилась возможность рассматривать вопросы корреляции событий, решать задачи прохождения вторичного излучения через вещество и т. д. Не вызывает сомнений тот факт, что привлечение дополнительных измерительных методик амплитудного или временного анализа для каждого из установленных направлений вылета продуктов ядерных реакций в существенной мере будет повышать качество и ценность получаемых экспериментальных данных.

Рассмотрены электронные средства нелинейных методов выделения информации в виде дискретных сигналов с детекторных устройств. Представленная электронная техника решает задачи ограничения, дискриминации и селек-

ции сигналов. С ее помощью осуществляется перевод аналоговых сигналов с различных детекторов в цифровую форму. Приведена структура отбора событий в практике ядерно-физических исследований, которая может служить прототипом одного из вариантов унифицированной системы регистрации, используемых в экспериментах.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие задачи решаются с помощью электронной техники совпадений?
2. Какие функции выполняют устройства совпадений в практике эксперимента?
3. С какой целью применяются элементы задержки при использовании техники совпадений и антисовпадений?
4. Эквивалентная схема совпадений и ее модель на базе параллельных ключей.
5. Структура эквивалентной схемы совпадений в виде модели последовательно соединенных ключей.
6. В чем заключается различие схем совпадений и антисовпадений?
7. Что такое разрешающее время схемы совпадений и можно ли измерить этот параметр?
8. Что такое мертвое время схемы совпадений и что может влиять на данный параметр?
9. Какими параметрами характеризуются выходные сигналы типовых схем совпадений?
10. Чем отличаются параметры выходных сигналов быстрых схем совпадений от обычных схем совпадений?
11. Какие факторы обусловили появление логических процессоров и что такое логический процессор?



РАЗДЕЛ III

ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ  
И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ  
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ



## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В начале данного раздела представлены методы счета событий. Информация, зарегистрированная таким образом, позволяет прежде всего судить об интенсивности источников ядерного излучения. Для получения данных о величине измеряемого параметра широко применяются как цифровые, так и аналоговые методы регистрации. Более того, при цифровых методах измерения счетная информация может фиксироваться с учетом живого или мертвого времени. Обсуждается специфика таких измерений, особенности организации счетных каналов, а также электронные средства счета событий в системах накопления и обработки данных.

Здесь же рассматривается один из наиболее распространенных методов исследования параметров ядерных превращений — амплитудный анализ. Обсуждаются его характерные особенности, основные параметры, включая электронные средства и технику его реализации. Отмечается своеобразие амплитудного анализа, связанное с используемыми детекторами, а также необходимость градуировки энергетической шкалы и стабильности измерений в целом. Затронута перспектива применения специализированных аналоговых процессоров для прецизионного амплитудного анализа.

Далее раскрывается сущность другого направления исследований, основой которого служит временной анализ и его разновидности. Обсуждаются базовые измери-

тельные электронные средства, используемые для обеспечения анализа в микросекундном и наносекундном диапазонах. Первый из них, т. е. микросекундный диапазон, характерен для исследований главным образом по физике ядра низких энергий. В свою очередь, другой из них, т. е. наносекундный диапазон, широко и весьма эффективно применяется при времяпролетной спектрометрии быстрых нейтронов. Временной анализ, реализуемый в этом диапазоне, масштабно используется при решении проблем физики высоких энергий. Его широко применяют в спектрально-кинетических исследованиях физико-химических процессов, для лазерного зондирования космических объектов, а также во многих областях науки и техники.

## **МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Информация в виде числа событий в единицу времени широко используется в изучении различных ядерно-физических процессов. Результаты, получаемые методом счета событий в пределах заданного времени, достаточно часто являются основным параметром регистрации. Такой вид экспериментальных данных фиксируется при решении многих задач независимо от используемых методик измерений. Счетная информация, полученная в радиометрии, дозиметрии или спектрометрии, обычно доминирует в каждом из этих направлений, связанных с изучением и оценкой параметров ионизирующих излучений.

### **9.1. ЗАДАЧИ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ ПОСТУПЛЕНИЯ СОБЫТИЙ**

Сведения о параметрах излучения в виде средней частоты поступления сигналов с детекторных устройств успешно используются как в научных, так и прикладных исследованиях. Решение задач такого плана сводится к определению числа импульсов в единицу времени. Данный алгоритм работы наиболее характерен для радиометрической и дозиметрической аппаратуры. Регистрацию плотности потока частиц, а также интенсивности излучения принято считать наиболее массовыми и самыми распространенными видами измерений.

Измерительная техника такого назначения широко применяется в атомной промышленности и энергетике. С ее помощью решаются задачи контроля и управления различными ядерно-физическими объектами и установками. Характерной особенностью такого направления в технике измерения является широкий диапазон измеряемых активностей и плотности потоков в различных радиационных полях.

Измерение параметров в этом случае часто усугубляется наличием неблагоприятной атмосферы (пар, газ, их смеси и т. д.), загрязненной к тому же химически активными веществами. Такая ситуация наиболее типична для различных технологических цепочек, используемых на радиохимических производствах очистки и обогащения рудных материалов. Реализация этих процессов ведется при радиационном контроле, в целях определения содержания делящихся веществ в смесях или растворах, а также на различных этапах многих технологических циклов и их цепочек, связанных с радиацией.

Для энергетических установок решением проблем такого плана стало выделение данной группы радиометрических устройств в самостоятельную группу — приборы систем управления, контроля и аварийной защиты реакторов. Системы имеют десятки тысяч каналов съема, обработки и выделения информации. По уровню реактивности можно судить об энергетическом состоянии реактора. Более того, по характеру ее изменения контролируют выход его на заданный уровень мощности, который может быть увеличен или, наоборот, понижен.

Техникой измерения в этом случае служат специализированные приборы, получившие название периодометры и реактиметры. Их основу составляют те или иные структуры счета событий и измерения средней частоты поступления импульсов. Счетные устройства и измерители данного вида составляют основу дозиметрической аппаратуры, с помощью которой обеспечивается контроль и состояние надлежащего уровня радиационной безопасности.

Аппаратура такого назначения может быть как мобильной, так и стационарной. Последняя применяется на

атомных электрических станциях, обеспечивая безопасность обслуживающего персонала. Переносные радиометры используются при решении оперативных задач дозиметрического контроля персонала и окружающей среды. Проверяются ее различные компоненты: атмосфера, почва, водные ресурсы и т. д.

Следует отметить еще целый ряд направлений, связанных с медициной, биологией, геофизической разведкой полезных ископаемых, горной и добывающей промышленностью, археологией и т. п. В медицине с помощью меченых атомов (низкоуровневый радиоактивный препарат) изучают динамику процесса обмена веществ, их накопление, а также поражение внутренних органов и т. д. Широко используется локальное воздействие гамма-излучения или нейтронов на злокачественные образования в организме.

В биологии с помощью этой методики изучается миграция изотопов, их рассеяние или накопление в живых организмах и растениях. Интересные результаты были получены при изучении радиоактивного углерода  $^{14}\text{C}$ . При жизни живого организма концентрация этого изотопа в нем остается неизменной. После гибели относительная концентрация углерода начинает уменьшаться из-за распада. Данный факт используется для установления момента утраты жизнедеятельности субстанцией, что вызывает интерес исследователей при определении, например, хронологии событий.

Среди радиометрической аппаратуры важное место занимают приборы геофизической разведки, горной и добывающей промышленности. В транспортном исполнении (автомобиль, самолет, вертолет и т. п.) техника геофизической разведки применяется для поиска месторождений радиоактивных руд (урана, тория, радия и т. д.).

Для определения глубины залегания радиоактивных руд и их аномалий широко используются каротажные радиометры. Глубина опускания приборов в скважины колеблется от сотен метров до нескольких километров. В добывающей промышленности для определения содержания радиоактивных элементов в образцах, минералах и руде тоже применяется радиометрическая техника.

Ее масштабно используют не только для фиксации уровня обогащения, т. е. установки количественного содержания этих элементов в объеме, но и для сортировки рудных материалов на различных этапах их обработки. Основой такой измерительной техники служат системы счета событий и измерения средней частоты поступающих сигналов. Информация может быть представлена как в цифровом виде, так и в аналоговой форме. Упомянутые направления, как и представленный перечень задач, весьма далеки от своей завершенности.

Они отражают важность проблемы измерения интенсивности радиационных излучений. С этой целью наряду с техникой счета событий широко используются устройства для измерения средней частоты поступления импульсов. Они получили название интенсивметры. Их используют самостоятельно, или они являются составными частями дозиметрических и радиометрических приборов, систем и комплексов, которые широко используются на различных ядерно-физических объектах (атомные станции, ядерные реакторы, обогатительные фабрики, установки утилизации ядерных отходов и т. д.).

## 9.2. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ ПОСТУПЛЕНИЯ СОБЫТИЙ АНАЛОГОВЫМ МЕТОДОМ

Счетные устройства, как показывает практика, с достаточной степенью точности позволяют фиксировать число импульсов, поступивших на их вход. Для определения интенсивности излучения  $n_0$  зарегистрированное число событий  $N$  необходимо разделить на время  $t$  их регистрации, т. е.  $n_0 = N/t$ . В этом случае получают информацию об интенсивности излучения, т. е. средней скорости поступления событий в единицу времени.

Не вызывает сомнений факт, что регистрация процессов деления в общем случае не представляет особой сложности. Однако если сферой интереса является характер изменения интенсивности в ходе процесса измерений, то

эта процедура будет вносить и создавать определенные неудобства. Более того, возникает необходимость выполнения ряда операций.

Это могут быть установка и задание времени измерения, спустя которое следует выполнить считывание результата, его сброс и запуск цикла измерения вновь. Ситуация в существенной мере усложняется, если необходимо фиксировать и оценивать скорость изменения этого параметра в течение продолжительного промежутка времени.

Острота проблем такого плана в значительной степени снижается, когда для этих целей используются специальные электронные устройства. Они не измеряют число поступивших импульсов  $N$ , а сразу определяют и регистрируют скорость их поступления на вход устройства, т. е. непосредственно фиксируют параметр  $N/t$ .

Такие электронные средства, получившие наиболее масштабное применение в дозиметрии и радиометрии, называются измерителями скорости счета или интенсивметрами, иногда их именуют еще измерителями средней частоты. Каждое из этих названий имеет право на существование и применение. Основой для таких устройств является одна из разновидностей интегрирующей цепочки.

Каждый сигнал, поступивший на вход устройства, оставляет на этой цепочке (а точнее, на ее конденсаторе) стандартный по величине заряд  $q_0$ . Это обеспечивается тем, что входные сигналы предварительно нормализуются по амплитуде и длительности. При таком положении зарядный ток  $i_3$  конденсатора будет равен  $i_3 = q_0 \cdot N$ .

Если каждый входной сигнал приносит на конденсатор единицу заряда, то увеличение потенциала на нем будет обусловлено ростом частоты поступающих сигналов. Параллельно конденсатору подключен резистор  $R$ , через который конденсатор разряжается. По мере роста заряда на конденсаторе увеличивается потенциал  $U_C$  и растет ток его разряда  $i_p$ , величина которого равна  $i_p = U_C/R$ .

В случае, когда  $i_3 = i_p$ , на конденсаторе будет поддерживаться постоянный потенциал за счет поступающих на

вход сигналов. Если шкалу показывающего прибора, а это может быть вольтметр, проградуировать непосредственно в импульс/с, то получаем вариант типового измерителя скорости счета событий. Интенсивность поступления событий определяется непосредственно по шкале прибора.

Среди различных вариантов устройств такого типа наибольшее распространение получила структура с дозирующим конденсатором  $C_d$ . Одна из ее версий представлена на рисунке 41. В ней стандартный по величине заряд  $q_0$  получают, заряжая конденсатор  $C_d$  нормированными входными сигналами. Схема формирователя  $\Phi$  выделяет эти сигналы одинаковой амплитуды и длительности. Образованный таким образом заряд через диод  $VD_2$  передается на интегрирующий конденсатор  $C_{и}$ .

По мере увеличения заряда растет напряжение  $U_C$  на конденсаторе  $C_{и}$ . Ток разряда емкости, величину которого измеряют с помощью микроамперметра, будет тоже возрастать. Равенство токов заряда и разряда соответствует определенной средней частоте поступления сигналов на вход измерителя. Показание прибора при этом не меняется. С его шкалы, а она проградуирована в имп./с, т. е. число импульсов в единицу времени, считывается информация об интенсивности излучения.

В паузах между импульсами диод  $VD_2$  отсекает интегрирующую емкость  $C_{и}$  от дозирующего конденсатора  $C_d$ , поскольку диод закрыт накопленным потенциалом емкости  $C_{и}$ . В таком случае ток разряда конденсатора  $C_{и}$  будет определяться только лишь величиной резистора  $R$ . Диод  $VD_1$

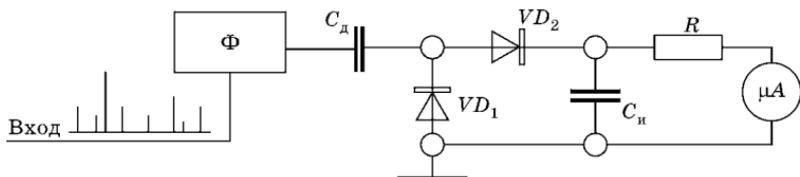


Рис. 41

Структура измерителя скорости счета событий с дозирующим конденсатором:

$\Phi$  — формирователь;  $C_{и}$ ,  $C_d$  — интегрирующий и дозирующий конденсаторы;  $R$  — резистор;  $VD$  — диод;  $\mu A$  — микроамперметр.

обеспечивает достаточно быстрый разряд дозирующего конденсатора  $C_d$  в промежутках между поступающими по входу сигналами. Использование такого конденсатора  $C_d$  способствует более высокой точности измерения данным устройством.

Коммутируя или переключая величину дозирующего  $C_d$  и интегрирующего  $C_i$  конденсаторов, изменяют и устанавливают диапазоны измерения интенсивности. Если между земляной шиной и измерительным прибором включить дополнительный небольшой по величине резистор, то сигнал, снимаемый с него, можно использовать для самописца. Не рассматривая подробно вопросы выбора постоянных времени дозирующей и интегрирующей цепочек, а также ошибки измерения средней частоты поступления сигналов и т. д., стоит отметить лишь некоторые их аспекты.

Для сохранения пропорциональности между входной частотой сигналов и выходным напряжением или током величину интегрирующего конденсатора  $C_i$  выбирают на несколько порядков больше величины дозирующего конденсатора  $C_d$ , т. е.  $C_i \gg C_d$ . В целях повышения линейности преобразования вход-выход в состав устройства, как правило, вводится аналоговый интегратор на базе операционного усилителя.

Выходную интегрирующую цепочку устройства при этом включают в цепь его обратной связи. В ряде устройств такого назначения вместо коммутации дозирующих и интегрирующих цепочек для изменения диапазона измерений могут применяться двоичные счетчики. Выбирая и устанавливая различные коэффициенты их пересчета, меняют диапазон измерений. Их включают непосредственно перед интегрирующим устройством.

Измерение скорости счета может сопровождаться значительными погрешностями. Они обусловлены прежде всего нерегулярным характером поступления входных сигналов. Действительно, интервалы между ними за счет статистического их распределения изменяются от крайне малой до существенной величины. Это дает относительную среднеквадратичную ошибку  $\delta$  измерений:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2n_0RC}},$$

где  $n_0$  — частота входных сигналов;  $R$  — величина разрядного резистора, а  $C$  — величина интегрирующего конденсатора  $C_{\text{и}}$ .

Из соотношения видно, что для снижения ошибки измерения необходимо увеличивать постоянную интегрирования  $RC$ , наращивая, например, величину интегрирующего конденсатора  $C_{\text{и}}$ . Это крайне важно при низких скоростях поступления входных сигналов. В силу этого при низких интенсивностях, чтобы обеспечить стабильные показания измерительного прибора, используется постоянная интегрирования порядка 5 с. Для измерения высоких скоростей поступления событий постоянная интегрирования должна быть существенно уменьшена за счет переключения интегрирующего конденсатора  $C_{\text{и}}$ .

Путем подключения логарифмического усилителя к выходу интегратора можно получить логарифмическую шкалу показаний интенсивности излучения. Аналогичную шкалу можно организовать и получить с помощью специальных дополнительных цепей дозирования и интегрирования. Однако точность таких шкал, как правило, невысока и не превышает нескольких десятков процентов.

### 9.3. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СКОРОСТИ СЧЕТА СОБЫТИЙ

Аналоговым интенсиметрам с их вполне простой схемотехнической реализацией найти адекватный вариант замены достаточно сложно. Тем не менее низкая точность измерений (особенно на границах диапазона), трудности в передаче и учете полученных данных способствовали поиску альтернативы аналоговым методам. Ограниченность возможностей автоматического управления параметрами измерений, оперативного вмешательства в измерительный процесс также содействовали усилиям изыскать

эффективную замену аналоговым методам измерения интенсивности излучений.

Таковыми возможностями обладают цифровые методы измерения средней частоты поступления событий с разных объектов. В практике экспериментальных исследований цифровые методы измерений интенсивности нередко бывают более предпочтительными. Для определения средней частоты нужно зарегистрировать с помощью счетчика число событий  $N$  в пределах заданного времени  $T$ , а затем найти отношение  $n_0 = N/T$ .

Интервал времени  $T$  можно задать с помощью таймерного устройства. При такой ситуации для выполнения вышеупомянутых операций в состав цифрового интенсивметра должны войти счетчик событий, таймер и арифметико-логическое устройство. Для большей эффективности работы приборов такого плана в их состав необходимо вводить и использовать микропроцессорные средства.

В аналоговых структурах измерения средней частоты поступления импульсов рост или спад их интенсивности ведет к изменениям тока разряда интегрирующего конденсатора. Таким путем поддерживается равновесное состояние в измерительном контуре интенсивметра, что демонстрируется показаниями его стрелочного прибора. Если в цифровых измерителях интенсивности сохранить такой же алгоритм работы, то их функционирование можно реализовать следующим образом.

Сигналы, поступающие на вход цифрового измерителя интенсивности излучения, фиксируются в счетчике событий в течение нескольких равных интервалов времени  $T$ , т. е. циклов. В конце каждого из них определенная часть накопленных событий  $\eta N$  вычитается из зарегистрированного числа  $N$ . Полученный код фиксируется в регистре и суммируется с полученными ранее результатами, а зафиксированный итог делится на число циклов. Через некоторое время в результате таких операций будет получено число, соответствующее равновесному состоянию измерительного процесса.

Известен другой вариант цифрового измерителя интенсивности, состоящий из  $k$  одинаковых счетчиков. Они за-

полняются входными сигналами через равные промежутки времени  $T$ . Когда все счетчики заполнились, возвращаются к первому из них, сбрасывают его и за время  $T$  вновь регистрируют в нем поступившее число импульсов. Аналогичную процедуру выполняют со следующим счетчиком и т. д. Таким образом, в измерителе всегда находится информация в виде числа  $\Sigma N_i$ , которое зарегистрировано за время  $kT$ .

Выполнив деление этой суммы на затраченное время, получают величину интенсивности поступления событий на вход цифрового измерителя. Она будет соответствовать равновесному состоянию измерительного процесса. Следует заметить, что по процессу обработки зарегистрированной счетной информации и получению конечного результата оба варианта практически схожи между собой.

Более того, второй вариант цифрового измерения интенсивности можно считать в определенной мере эквивалентным первому, при условии, что  $\eta = 1/k$ . Чтобы нивелировать дискретность смены результатов измерений на различных демонстрационных панелях или табло, величину параметра  $\eta$  необходимо выбирать равную  $1/512$  или  $1/1024$ .

Рассмотрим структурную схему типового цифрового измерителя интенсивности первого типа, один из вариантов которой представлен на рисунке 42. С помощью схемы входного селектора (ВС) в течение заданного времени, которое определяется таймером (Т), сигналы со входа измерителя передаются и регистрируются в счетчике событий (СчС). Схема таймерного устройства задает и фиксирует длительность одного цикла измерений.

Его окончание связано с появлением выходного сигнала таймера, регистрируемого счетчиком циклов (СчЦ). Этот же сигнал запускает устройство управления (УУ) и блокирует работу схемы ВС, прекращая таким образом поступление входных сигналов на счетчик СчС. Схема УУ инициирует запись информации с обоих счетчиков в регистры событий (РС) и циклов (РЦ) соответственно.

Далее сбрасывается счетчик СчС, деблокируется схема ВС и запускается работа таймера Т, после чего начина-

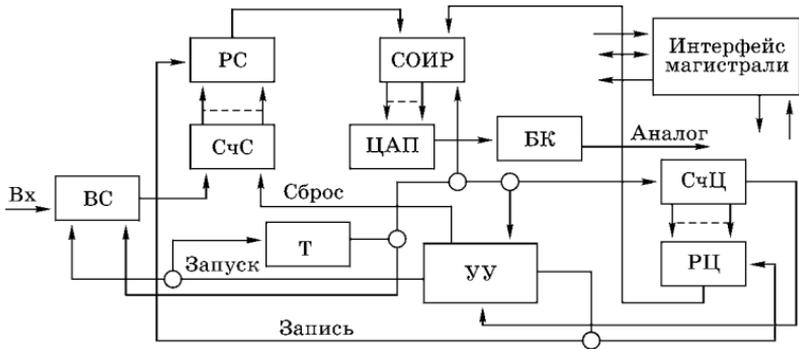


Рис. 42  
Структурная схема цифрового измерителя  
интенсивности первого типа:

БК — буферный каскад; ВС — входной селектор; РС — регистр событий; РЦ — регистр циклов; СОИР — схема обработки и индикации результатов; СчС — счетчик событий; СчЦ — счетчик циклов; Т — таймер; УУ — устройство управления; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь.

ется следующий цикл регистрации в процессе измерения. Параллельно циклу регистрации в схеме обработки и индикации результатов (СОИР) измерений выполняются необходимые действия. При этом используется кодовая информация обоих регистров РС и РЦ соответственно. Первый этап измерений будет завершён при переполнении счетчика СчС.

После выполнения всех текущих операций, включая обработку результатов в составе СОИР, на ее цифровых индикаторах высвечивается полученный результат измерений. При этом кодовая информация о результатах измерения может быть передана по магистрали с помощью схем интерфейса в систему сбора данных или на ЭВМ. Эта же информация с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) появляется на выходе буферного каскада (БК) в непрерывной форме. Таким образом, как и в интенсивметре аналогового типа, здесь можно подключать самописец.

Не вызывает сомнений факт, что цифровые интенсивметры значительно сложнее аналоговых вариантов и превосходят их по стоимости. Однако возможность автоматического выбора параметров измерений, выдача резуль-

татов измерения в цифровой форме, получение их с высокой точностью (более чем на порядок по сравнению с аналоговым вариантом) явно демонстрируют их существенные преимущества.

#### 9.4. СЧЕТНЫЙ МЕТОД — БАЗА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ТЕХНИКА ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Практика решения экспериментальных задач показывает, что счетная информация в любой форме ее представления преобладает в изучении параметров ядерно-физических процессов. Счет числа событий в пределах заданного времени часто остается наиболее важным параметром измерений. Независимо от применяемых методик измерений экспериментальные данные такого вида используются при решении многих проблем фундаментальных и прикладных исследований.

Счетная информация, как правило, доминирует в составе экспериментальных данных, связанных с изучением, измерением и оценкой параметров радиоактивных излучений. Экспериментальные данные о потоках ионизирующего излучения, их плотности, пространственном и временном распределении, а также ряде других параметров содержатся в детекторных сигналах. В таком случае получаемая с помощью счетных устройств информация может быть связана с различными характеристиками изучаемых процессов.

Это может быть просто число событий или интенсивность излучения, количество совпадений или антисовпадений, загрузка по основному или контрольному детектору, набор по «живому» или «мертвому» времени и т. п. В любом случае получаемая счетная информация носит универсальный характер. Она может быть как основной, так и просто дополняющей или вспомогательной. Все это определяется задачами и целями экспериментальных исследований.

Для получения данных эксперимента используются автоматизированные информационно-измерительные системы, обязательной составной частью которых являются различные счетные устройства. С их помощью регистрируется все многообразие счетной информации. Необходимо выделить и отметить наиболее важные функции счетных устройств:

- счет поступающих событий, т. е. операция последовательного суммирования входных сигналов или их вычитание;
- хранение информации о числе зарегистрированных сигналов, как правило, в оперативном режиме;
- вывод и представление зарегистрированных данных в установленном формате или заданном в виде.

Не рассматривая всю совокупность счетных устройств досконально и обстоятельно, отметим лишь наиболее общие их разновидности. Прежде всего это двоичные, десятичные (декадные), быстродействующие, суммирующие и вычитающие. Напомним еще реверсивные, одноканальные, многоканальные и другие счетные устройства. Однако это далеко не полный их перечень, который используется в практике эксперимента. Рассмотрим структуру унифицированного счетного канала, представленную на рисунке 43, и его основной состав.

Счетный канал такого вида можно использовать в составе любого спектрометра на базе той или иной ядерно-

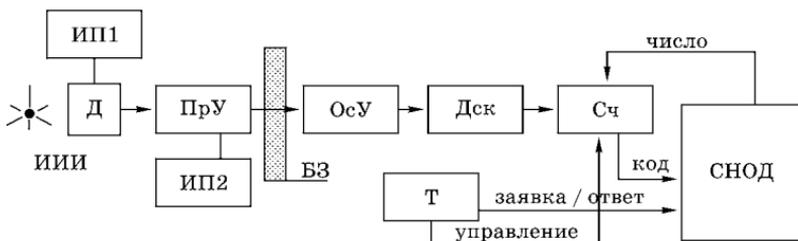


Рис. 43

Схема унифицированного счетного канала:

БЗ — биологическая защита; Д — детектор; Дск — дискриминатор; ИИИ — источник ионизирующего излучения; ИП — источник питания; ОсУ — основной усилитель; ПрУ — предусилитель; СНОД — система накопления и сбора данных; Сч — счетчик; Т — таймер.

физической установки (ЯФУ). Более того, данный канал может иметь собственное применение. Наличие изучаемого ядерно-физического процесса на схеме отражено источником ионизирующего излучения (ИИИ). Часть измерительной системы, ее детектор (Д), предусилитель (ПрУ), источники питания (ИП1) и (ИП2), а также ИИИ находятся в измерительном зале ЯФУ. Такой установкой может быть реактор, ускоритель и т. д.

Для снижения воздействия радиации на персонал установку окружают биологической защитой (БЗ). Для работы детектора необходим источник питания ИП1, как правило, высоковольтный, униполярный и постоянного тока. Величину его выходного напряжения можно регулировать в пределах от 0 до 3000 В, а иногда и выше, до 5000 В. Ее значение нередко задают и устанавливают программным путем.

Другой источник питания ИП2, обычно низковольтный, связан со схемой ПрУ и обеспечивает ее необходимыми напряжениями питания. Использование схемы ПрУ вызвано крайне низкими уровнями сигналов детектора. Все они (кроме сцинтилляционного детектора) непосредственно не могут быть восприняты электронными схемами и структурами для дальнейшей их обработки и регистрации.

Применение ПрУ улучшает отношение сигнал/шум. Как показывает практика экспериментальных исследований, их использование существенно снижает вклад наводок и помех в результаты регистрации. Детектор и основная часть измерительной электроники существенно разнесены, и для их связи и передачи сигналов детектора используется кабель.

Его длина может доходить до сотни и более метров. Это специальный высокочастотный коаксиальный кабель, однако в нем происходит ослабление и затухание сигнала. В таком случае сигналы, поступающие из экспериментального зала ЯФУ, подаются на основной усилитель (ОсУ). В зависимости от детектора и поставленной задачи измерения в модуле ОсУ выбираются цепи формирования сигналов, задается необходимый коэффициент усиления.

Его сигналы поступают на дискриминатор (Дск). Его схема является эффективным средством в борьбе с шумами, наводками и помехами. На ее выходе выделяется стандартный по амплитуде и длительности сигнал, если амплитуда входного импульса превышает уровень дискриминации. Негативные импульсы (шумы, наводки и т. д.) обычно меньше полезных сигналов, и дискриминация исключает их регистрацию.

Сигналы с дискриминатора поступают на счетчик (Сч). Его информационный объем (возможное количество зарегистрированных в счетчике импульсов) должен быть таким, чтобы в счетном устройстве не возникало переполнение. Таймер (Т) помогает выбирать и установить необходимый объем счетчика Сч. Учитывая интенсивность поступления детекторных сигналов, таймер Т фиксирует длительность цикла счета событий.

По истечении заданного времени таймер Т выдает сигнал ЗАЯВКА в систему накопления и обработки данных (СНОД), прерывая процесс регистрации. Этим сигналом инициируется передача счетной информации в виде кода в СНОД. По окончании этого процесса СНОД выдает сигнал ОТВЕТ. В этом случае счетчик Сч сбрасывается, т. е. устанавливается в нулевое состояние, завершая измерение.

В счетное устройство можно занести новое число и измерительный процесс может быть продолжен далее путем запуска очередного цикла регистрации. Такая версия функционирования счетного канала представляет собой общепринятый вариант его реализации. Интересно отметить тот факт, что число счетных каналов в измерительной системе иногда используется в качестве критерия сложности экспериментальных исследований.

Более того, данный параметр может служить показателем эффективности решения экспериментальных задач в целом. В исследованиях по физике ядра средних и низких энергий число счетных каналов доходит до десятка и более. В экспериментах по физике высоких энергий этот показатель существенно выше и составляет десятки, а иногда и сотни таких каналов.

## 9.5.

**ЗАДАЧИ И РОЛЬ МОНИТОРНОГО КАНАЛА**

Организация и проведение экспериментальных исследований в ряде случаев представляет собой весьма сложную задачу, для решения которой служит измерительная система. В ее структуре обычно предусмотрены средства контроля не только за работой самой системы измерений, но и всей экспериментальной установки. Важная роль в составе таких электронных средств контроля отведена счетным устройствам, которые получили название мониторов или мониторные каналы.

Экспериментальные исследования обычно являются последовательностью различных этапов регистрации данных. Техника мониторинга задает и определяет продолжительность измерений в виде стадий, этапов или шагов, т. е. промежутков времени, а также фиксирует их число. Следует заметить, что длительность таких интервалов времени в основном не постоянна и зависит от проводимых исследований.

Эти этапы могут изменяться в процессе измерений по установленному критерию. Данный аспект тоже необходимо учитывать по ходу эксперимента. В качестве мониторов наряду с основными детекторами нередко применяются и дополнительные устройства детектирования. Их сигналы используются для контроля параметров экспериментальной установки.

Такая целенаправленная проверка ее ресурса, иногда непосредственно в ходе эксперимента, необходима для получения надежных результатов измерений. Данную ситуацию можно рассмотреть на примере спектрометра быстрых нейтронов по времени пролета [9]. Нейтроны этого вида получают с помощью ядерной реакции ( $p, n$ ) или ( $d, n$ ) на мишени ускорителя, который работает обычно в импульсном режиме.

Мишень (тонкая фольга из исследуемого материала) является конвертором, где заряженные частицы (протоны или дейтоны) за счет реакции трансформируются в нейтроны. Их регистрируют основным сцинтилляционным детектором (ФЭУ-143, стильбен). После мишени на цилиндре

Фарадея, размещенного в конце ионопровода ускорительной установки, собирается заряд от поступивших частиц.

Величина заряда измеряется с помощью преобразователя «ток — частота» ( $i-f$ ) и также фиксируется мониторным счетчиком, связанным с этим каналом. Количество нейтронов, возникших на мишени, контролируется всеволновым счетчиком в виде относительного числа. Детектор располагается на расстоянии нескольких метров от мишени перпендикулярно пучку заряженных частиц.

Его основой служит пропорциональный счетчик, заполненный газовой смесью  $VF_3$  и окруженный замедлителем быстрых нейтронов в виде парафина или слоев полиэтилена. Это необходимо, поскольку счетчик регистрирует лишь тепловые нейтроны. Усиленные и отобранные интегральным дискриминатором сигналы всеволнового счетчика регистрируются еще в одном мониторном счетчике.

Наряду со счетными мониторами в спектрометре используется контрольный временной измерительный канал. Его сцинтилляционный детектор (ФЭУ-87 и быстрый пластический сцинтиллятор БП-20), ориентированный на дно цилиндра Фарадея, регистрирует гамма-кванты. Оперативная обработка получаемого временного спектра дает информацию о положении, симметрии и разрешении гамма-пика, которые использовались для контроля работы ускорителя в ходе измерений.

При регистрации параметры постоянно обновляются. Если хотя бы один из параметров выходил за установленные пределы, то измерительный процесс прерывали и следовал запрос к оператору. Учитывая конкретные условия, им принималось решение продолжить или прекратить измерение. Если это был последний шаг в цикле и цикл был заключительным, то измерение в таком случае обычно продолжали.

Счетную информацию обоих каналов, всеволнового счетчика, преобразователя ( $i-f$ ) и т. д. регистрируют многоканальным счетчиком (8 входов). Управление экспериментом осуществляется специальным мониторным счет-

чиком, который считает импульсы кварцевого генератора. Счетчик задает длительность шага измерения, число шагов в цикле и число циклов. Это время измерения на одной мишени, которую автоматически меняют после каждого цикла.

## 9.6. ЖИВОЕ И МЕРТВОЕ ВРЕМЯ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ

Среди параметров счетных устройств особое место занимает быстродействие. Это максимальная частота счета сигналов, поступающих на вход, без их просчета. Вместе с тем, быстродействие таких структур еще можно характеризовать параметром, который называется мертвым временем. Мертвое время измерительной системы является временем ее нечувствительности, возникающей при регистрации поступившего сигнала.

Это означает, что любой из поступивших на вход импульсов в течение мертвого времени не регистрируется, а будет проигнорирован или просто просчитан. Необходимо отметить, что всякое реальное счетное устройство обладает конечным быстродействием. В силу этого часть из поступивших на его вход сигналов будет просчитана, т. е. попросту утрачена. В таком случае мертвое время является основным параметром счетных структур, который определяет их количество просчетов.

Пусть при счете сигналов процесс регистрации каждого из них сопровождается мертвым временем, величина которого постоянна и равна  $t_M$ . Допустим, скорость поступления сигналов на вход счетного устройства составляет  $N_0$ . В этой ситуации устройство регистрирует  $N$  импульсов. При этом время нечувствительности счетного устройства будет равно  $N \cdot t_M$ .

Это приведет к тому, что число утраченных сигналов составит  $M = N_0 \cdot N \cdot t_M$ . Помимо этого, число потерянных или просчитанных сигналов в такой ситуации будет равно  $M = N_0 - N$ . Следовательно,  $N_0 - N = N_0 \cdot N \cdot t_M$ . Если мертвое время счетчика равно  $t_M$  и им зарегистрировано

$N$  сигналов, то на его вход поступило число сигналов, равное

$$N_0 = N / (1 - N \cdot t_M).$$

Кроме того, не трудно установить, что если мертвое время  $t_M$  счетной структуры постоянно, то она зарегистрирует число сигналов, равное

$$N = N_0 / (1 + N_0 \cdot t_M). \quad (*)$$

Соотношение (\*) показывает, что в случае роста числа входных сигналов  $N_0$ , будет расти и время нечувствительности счетного устройства. При довольно большом числе входных импульсов начнет проявляться эффект «захлебывания» счетчика. При этом устройство будет регистрировать постоянное число импульсов в единицу времени, равную  $1/t_M$ , даже если на его входе имеет место значительный рост числа сигналов.

Рассмотренная разновидность параметра будет относиться к варианту мертвого времени непродлевающего типа. Ее нередко называют счетной системой первого рода. В ряде случаев используется другая разновидность счетной системы, которая получила название структуры второго вида или счетной системы продлевающего типа. Имеет смысл обсудить некоторые особенности такой счетной структуры.

Ее суть состоит в том, что любой сигнал, поступивший на вход счетного устройства этого вида, инициирует фиксированную длительность мертвого времени независимо от факта его регистрации. Действительно, сигнал может и не зарегистрироваться, но его наличие на входе будет отмечено фиксированным интервалом времени  $t_M$ . Если сигнал на входе совпал с длительностью  $t_M$  от предыдущего импульса, то ее не совпавшая часть просто продлевается на величину  $t_M$ .

При этом интервалы мертвого времени будут иметь различную длительность. Более того, при значительном росте числа сигналов на входе счетного устройства с вариантом, продлевающимся мертвым временем, оно вообще перестает считать, так как его вход будет заблокирован.

Связь между зарегистрированными импульсами  $N$  и сигналами  $N_0$ , поступившими на его вход, имеет вид

$$N = N_0 \exp(-N_0 \cdot t_M).$$

Это действительно так, поскольку согласно закону Пуассона вероятность наблюдения интервала  $t > t_M$ , а именно в этом случае регистрируется входной сигнал, при средней скорости счета  $N_0$  будет равна  $\exp(-N_0 \cdot t_M)$ .

Вариант организации счетной системы определяется, с одной стороны, целями и задачами эксперимента, а с другой стороны, используемой техникой счета событий. Следует отметить, что при низкой скорости счета, т. е. в случае, если  $N_0 \ll 1/t_M$ , оба варианта организации счетной структуры дают примерно один и тот же результат:

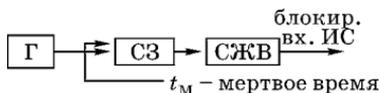
$$N_0 \cong N/(1 - N \cdot t_M) \text{ или } N \cong N_0/(1 + N_0 \cdot t_M).$$

Наряду с учетом мертвого времени в экспериментах имеет место регистрация по живому времени. Живое время  $T_{\text{Ж}}$  — это суммарное время ожидания системы измерения. В измерениях, если организовать разность между истинным текущим временем  $T$  и мертвым временем измерительной системы  $t_M$ , то получим живое время  $T_{\text{Ж}}$ , которое равно  $T_{\text{Ж}} = T - t_M$ . Вести регистрацию событий по данному параметру, т. е. с учетом живого времени, можно с помощью следующей структуры (рис. 44). В представленной схеме при отсутствии сигнала МЕРТВОЕ ВРЕМЯ схема запрета (СЗ) передает импульсы генератора ( $\Gamma$ ) на вход счетчика живого времени (СЖВ). При наличии этого сигнала устройство СЗ уже не пропускает импульсы генератора на вход схемы СЖВ. Таким образом, в схеме СЖВ фиксируется живое время  $T_{\text{Ж}}$ , величина которого равна  $T_{\text{Ж}} = n/f$ , где  $n$  — число зафиксированное в СЖВ, а  $f$  — частота генератора.

Рис. 44

Схема измерения по живому времени:

$\Gamma$  — генератор; СЖВ — счетчик живого времени; СЗ — схема запрета; ИС — измерительная система.



Переполнение счетчика блокирует дальнейшую работу измерительной системы. Характерно, что если не менять емкость счетчика, то независимо от мертвого времени процесс измерения всегда длится одно и то же время. Частота генератора обычно находится в пределах от 50 до 200 Гц. В свою очередь, емкость счетчика живого времени обычно не превышает  $10^6$ .

### 9.7. УНИФИЦИРОВАННЫЕ МЕТОДИКИ РЕГИСТРАЦИИ СЧЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

По результатам счета, зафиксированным в ходе измерений, можно судить о количестве зарегистрированных событий, скорости их поступления, характере изменения интенсивности во времени и т. д. Получаемые данные помогают отслеживать динамику рабочего режима установки или его изменения, а также прогнозировать ее состояние и поведение. С помощью такой информации можно отслеживать возникновение и развитие внештатных ситуаций.

Среди разнообразных вариантов получения счетной информации следует выделить две наиболее масштабные версии, широко применяемые в практике измерений. В одной из них события фиксируются счетчиком в пределах установленного времени. Промежуток времени обычно задается с помощью таймера. При этом таймерное устройство является управляющей структурой по отношению к регистрирующему счетчику.

Спустя заданное время таймер блокирует работу счетчика, прерывая регистрацию поступающих сигналов. Зафиксированная счетчиком информация в виде цифрового кода передается для дальнейшей обработки в ЭВМ. Полученные результаты выводятся на экран и принимаются к сведению, а также могут быть использованы для воздействия на контролируемый объект в целях корректировки режима его работы.

В другой версии реализации счетного метода регистрация сигналов ведется счетчиком до заданного числа, а тай-

мер измеряет время процесса регистрации. При этом счетчик выполняет управляющую функцию. При достижении установленного числа счетчик прерывает измерение и блокирует работу таймера. Полученный интервал времени, затраченный на подсчет счетчиком заданного числа входных импульсов, выводят на экран и передают в ЭВМ.

Данный параметр относится к категории оперативной информации. Она необходима для принятия последующих эффективных решений. Изменение затрат времени при регистрации одного и того же числа событий позволяет судить об интенсивности процессов, которые происходят на контролируемом объекте или установке.

Последняя версия регистрации счетной информации применяется более масштабно, если интенсивность входных сигналов изменяется в пределах нескольких порядков. Такая ситуация обычно связана с динамикой процесса, т. е. выходом аппарата на мощность (реактор, критическая сборка и т. д.) или при импульсном воздействии на объект исследования (мишень коллайдера, накачка лазера и т. п.).

Для второй версии регистрации счетной информации характерна еще одна особенность. Она заключается в том, что счетчик работает в режиме предустановки. Перед началом измерений в него заносят необходимое число. Более того, счетчик при этом нередко функционирует в режиме вычитания. В такой ситуации приход всех триггеров счетного устройства в нулевое состояние вызывает прекращение измерений путем блокировки работы таймера.

Для учета счетной информации устройства регистрации могут функционировать в любом из двух режимов: сложения или вычитания. Выбор режима всегда определяется поставленной задачей или конкретной ситуацией. Нередко счетные устройства реализуют оба режима. Например, сначала используется режим сложения, а затем вычитания или наоборот.

Счетное устройство, поочередно меняющее свой режим работы, относится к категории реверсивных счетчиков. Реверсивный режим работы счетного устройства можно использовать в измерениях для исключения фоновой составляющей. Сначала в режиме сложения счетчик за установ-

ленное таймером время фиксирует сигналы с источника излучения.

Завершив первый этап измерений, счетчик переводят в режим вычитания. Источник при этом убирают или хорошо экранируют и за то же самое время из полученных ранее результатов вычитают события, связанные с фоновым излучением. Такой метод устранения фоновой составляющей относится к измерениям с разнесенными во времени этапами регистрации.

Метод интересен тем, что оба измерения проводятся в одинаковой геометрии, но с наличием источника или без него. Более того, многообразие счетных методик весьма эффективно используется в ядерной физике и ее смежных областях. Такие методики получения счетной информации масштабно применяются в разных структурах и системах контроля и управления объектами ядерной энергетики.

Используя необходимые электронные средства и технику, методики счета служат основой систем управления и защиты для атомных электрических станций (АЭС). Они обеспечивают радиационный контроль и безопасность персонала станции. Эти методики используются при мониторинге окружающей среды и состояния ее природных ресурсов. Их применяют при контроле степени загрязнения различных объектов продуктами ядерных технологий и их отходами.

Счетные методы достаточно просты, но крайне эффективны в получении оперативной, но весьма ценной информации. Специалисты практически всех направлений атомной науки и техники в решении многочисленных экспериментальных и производственных задач широко применяют методы и технику измерения интенсивности излучения. С методиками этого вида можно встретиться во многих сферах, как промышленной направленности, так и научной деятельности.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите области науки и техники, использующие измерения интенсивности излучений.
2. Что такое интенсиметр и в чем заключается цель его применения в измерениях?

3. Для чего служат конденсаторы в интенсиметре аналогового типа, как они соотносятся по величине?
4. Что можно считать достоинством, а что следует отнести к недостаткам интенсиметра аналогового типа?
5. Если сравнить аналоговые и цифровые интенсиметры, то какие выводы можно сделать?
6. Для каких целей служат счетные устройства и их основные функции?
7. Назначение и роль мониторингового канала в составе измерительной системы.
8. Мертвое время в измерении и его виды.
9. Что такое живое время измерения и как его организовать в измерительном процессе?
10. Какие функции выполняет таймер при реализации счетных режимов?
11. Что такое реверсивный режим работы счетчика и применение его в практике эксперимента?



## ГЛАВА 10

# АМПЛИТУДНЫЙ АНАЛИЗ: ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И БАЗОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

В 1960-е гг. амплитудный анализ стал «привилегией» ядерной физики и ее смежных областей. Эти позиции не утрачены до настоящего времени. Зародившись в недрах экспериментальных методов ядерной физики, амплитудный анализ поэтапно проник во все сферы науки и техники и успешно применяется для решения их задач и проблем. Рассмотрим базовые положения этого анализа.

### 10.1. НАЗНАЧЕНИЕ И РОЛЬ АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА

Среди разнообразия методов получения экспериментальной информации наряду со счетными методами наиболее масштабно реализуется амплитудный анализ. При таких измерениях извлекается информация, заключенная в амплитуде детекторного сигнала. В этом варианте регистрации экспериментальных данных фиксируется величина амплитуды сигнала. Она непосредственно связана с потерей в детекторе энергии заряженной частицей, зарегистрированной им.

В рабочем объеме детектора частица, теряя энергию, образует носители заряда. Под действием электрического поля они собираются на электродах детектора, где навоят сигналы в виде тока, напряжения или заряда. Связь между утратой энергии частицей в детекторе и образовавшимся сигналом в основном носит пропорциональный характер. Именно параметры этой связи составляют основу амплитудного анализа.

Практически любой пропорциональный детектор можно использовать при амплитудном анализе. Более того, если физический процесс сопровождается появлением электрического сигнала, амплитуда которого в той или иной мере связана с параметрами процесса, т. е. все основания использовать амплитудный анализ в его изучении. Это весьма эффективный и достаточно точный метод измерения, который может служить для исследований различных физических явлений.

Задача амплитудного анализа состоит в измерении амплитуды сигнала, полученного с детектора ядерного излучения, с необходимой точностью и стабильностью. Помимо перевода аналогового сигнала в цифровой эквивалент, амплитудный анализ позволяет получить информацию об изучаемом явлении в особом виде — в форме амплитудного спектра. Такая зависимость представляется в виде обычной гистограммы. Номер канала откладывается по горизонтали, а по вертикали гистограммы фиксируется параметр, который связан с числом отсчетов в каждом из каналов.

Чем больше амплитуда сигнала, тем дальше от начала спектра будет номер канала. Количество зарегистрированных сигналов с такой амплитудой фиксируется числом отсчетов в этом канале. Измерение амплитудных распределений сигналов является наиболее эффективным решением целого ряда экспериментальных задач. Они связаны с изучением структуры ядра, характера и результатов ядерных взаимодействий, в том числе с учетом формы их проявления.

Можно проследить за потерями энергии, которые могут быть полными, а могут и частичными. С помощью амплитудного анализа можно измерить энергию, которую несет частица, и определить, как она распределяется по каналам детектора.

литудного анализа можно определить энергию, которую уносит частица под различными углами относительно исходного направления поступающего излучения, а также получить ответы на другие вопросы. Для регистрации амплитудных спектров, что было характерно для начального этапа реализации амплитудного анализа, использовалась специальная электронная техника.

Она получила название амплитудного анализатора импульсов (ААИ). Внутреннего размера электронная структура состояла из полутора сотен радиоламп. В ее составе были представлены входной усилитель, преобразователь «аналог — код», адресный счетчик, арифметический регистр, память, устройства отображения информации, а также ее вывода. Последнее появилось несколько позже в виде цифropечатающего устройства, которое фиксировало номер канала и его содержимое.

Если внимательно присмотреться, то амплитудный анализатор импульсов по структуре и выполняемым функциям является одной из первых разновидностей цифрового процессора. На эту роль с успехом могут претендовать его адресный счетчик, память, арифметический регистр, а также часть устройства управления. С их помощью в структуре ААИ выполняются следующие операции: выбор канала, извлечение его содержимого из памяти, добавление к нему единицы и запись в память по тому же адресу.

Не составляет труда понять, что эти устройства и функции, выполняемые ими, демонстрируют признаки элементарного процессора. В составе ААИ присутствуют еще устройства, выполняющие функции ввода-вывода. Преобразователь «аналог — код», т. е. АЦП, является устройством ввода аналоговой информации. Техника отображения информации, т. е. состояние счетчика и регистра, а также цифropечатающее устройство реализуют функции средств вывода данных.

В составе ААИ их выполняет устройство управления по заданным программам. Итак, можно предположить, что, несмотря на свои внушительные размеры (элементарной базой служили радиолампы), ААИ следует считать одним из первых вариантов процессорных средств изме-

рений, функционирующим по разным, но фиксированным программам.

Как показала практика измерений, амплитудный анализ занял ключевые позиции в разных направлениях ядерной физики и ее смежных областях. Его техника в виде ААИ стала весьма эффективным инструментом в таких исследованиях. На первых этапах физики мирились с ручным выводом данных из памяти ААИ, так как число каналов составляло десятки, сотню или две. Огромную неудовлетворенность вызывал факт, что цифровую информацию из памяти ААИ невозможно непосредственно передать в ЭВМ для ее дальнейшей обработки.

Важно отметить, что именно потребности ядерной физики стимулировали появление нового класса вычислительной техники. Это были мини-ЭВМ. Нередко требовались простые формы обработки экспериментальных данных. Это было обычное вычитание или суммирование спектров, стандартные процедуры перевода их в энергетическую шкалу, рутинное умножение на заданный коэффициент и т. п.

Мощных ЭВМ не требовалось, были нужны простые вычислительные средства с минимумом периферийного оборудования. В основном применялись мини-ЭВМ типа PDP-8 и PDP-11 или их аналоги с большим числом модификаций. Позднее эти виды ЭВМ использовались в офисах и бухгалтериях компаний и заводов, а затем на производстве и в цехах в составе станков с ЧПУ (числовым программным управлением).

Амплитудный анализ, получив широкое признание, стал самым эффективным методом измерений не только в ядерной физике, но и во многих областях науки и техники. Его развитие воплотилось в многомерных, многогрупповых, многодетекторных и других его вариантах. Электронная аппаратура продолжает совершенствоваться в виде аналоговых процессоров и интеллектуальных устройств на разных платформах средств вычислительной техники. Ниже будут представлены и раскрыты базовые положения амплитудного анализа, его техника и ее основные параметры.

## 10.2. ТИПОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАКТ ДЛЯ АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА

При амплитудном анализе результаты измерений распределения частиц ионизирующего излучения представляются, как известно, в особой форме. Такая форма зарегистрированных данных называется аппаратным спектром. Проследим основные этапы регистрации сигналов от детектора Д до системы накопления и обработки данных СНОД на примере унифицированного измерительного тракта, представленного на рисунке 45, для амплитудного анализа.

Практически каждая из модульных структур, входящих в состав представленного спектрометрического тракта для амплитудного анализа, достаточно подробно была обсуждена в разделе I. Там же можно найти сведения о назначении, основных функциях и специфике использования электронных средств такой ориентации. Рассматривая функционирование измерительного тракта спектрометра, реализующего амплитудный анализ, отметим лишь основные его аспекты.

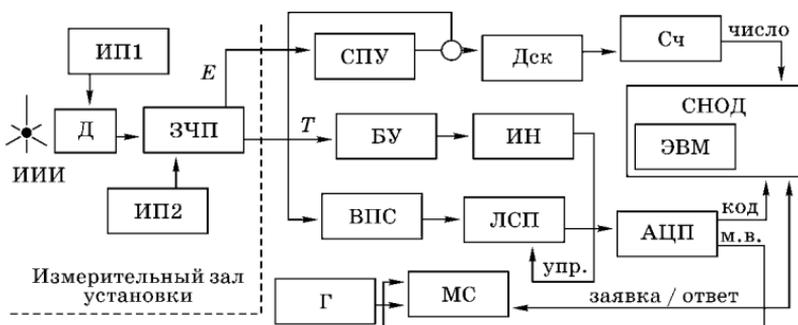


Рис. 45

Схема измерительного тракта:

АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БУ — быстрый усилитель; ВПС — восстановитель постоянной составляющей; Г — генератор; Д — детектор; Диск — дискриминатор;  $E$  — амплитудный выход; ЗЧП — зарядочувствительный преобразователь; ИИИ — источник ионизирующего излучения; ИН — инспектор наложений; ИП — источник питания; ЛСП — линейная схема пропускания; м. в. — мертвое время; МС — мониторный счетчик; СНОД — система накопления и обработки данных; СПУ — спектрометрический усилитель; Сч — счетчик;  $T$  — временной выход; ЭВМ — электронная вычислительная машина.

Сигналы детектора (Д), обусловленные источником ионизирующего излучения ИИИ, поступают на схему зарядочувствительного предусилителя (ЗЧП). Здесь же в измерительном зале установки находятся источники питания (ИП). Один из них ИП1 (высоковольтный) служит для питания детекторного устройства Д. Другой ИП2 (низковольтный) применяется для питания схемы ЗЧП. Использование предусилителя такой схемы улучшает соотношение сигнал/шум измерительного канала, повышая эффективность регистрации в целом.

Следует отметить, что в измерении задействованы оба выхода  $E$  и  $T$  предусилителя. Первый из них ( $E$ ) связан с основным энергетическим каналом измерительного тракта. Информация, получаемая по этому каналу, непосредственно связана с энергией частиц, которые регистрируются детектором. Другой выход ( $T$ ) этой схемы более быстрый и связан с моментом регистрации заряженной частицы.

С его помощью обеспечивается функционирование вспомогательного канала измерительного тракта. Задача данного канала заключается в безошибочном отборе и сортировке регистрируемых данных. В состав основного канала входят электронные модули: спектрометрический усилитель (СПУ), восстановитель постоянной составляющей (ВПС), линейная схема пропускания (ЛСП) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Выбирая величины интегрирования и дифференцирования в модуле СПУ, устанавливают параметры для оптимального формирования и необходимого усиления, добиваясь высокого разрешения в канале регистрации. Модуль ВПС обеспечивает независимость исходного уровня в измерительном тракте от входной загрузки.

Отбор корректных сигналов для анализа осуществляет модуль ЛСП, который в исходном состоянии при данной ситуации открыт. Устройство ЛСП не пропускает сигналы на вход АЦП при наличии управляющего сигнала УПР. Модуль АЦП трансформирует поступающие сигналы в цифровой код. В состав вспомогательного канала входят следующие электронные модули: быстрый усилитель (БУ) и инспектор наложений (ИН).

С помощью схем БУ и ИН ведется контроль над процессами, происходящими в основном канале измерительного тракта. Если в нем происходит наложение входных сигналов, то модуль ИН фиксирует этот факт. На выходе схемы ИН выделяется сигнал, блокирующий функционирование модуля ЛСП. В таком случае на выходе устройства ЛСП сигнала не будет. Следовательно, из процесса регистрации исключаются все сигналы с дефектом наложения.

Итак, вспомогательный «быстрый» канал служит для режекции наложений в измерительном тракте. По основному каналу регистрируется исключительно корректная информация. Счетный канал образуют модули дискриминатора (Дск) и счетчика (Сч), подключенные к выходу схемы СПУ. С помощью схемы Дск выбирают и устанавливают необходимый уровень дискриминации, а модуль Сч фиксирует число поступивших сигналов по основному каналу.

Мониторный канал измерительного тракта составляют модули генератора (Г) и монитормого счетчика (МС). Измерение ведется по живому времени. При заполнении счетчика МС измерение прерывается. В систему накопления и обработки данных (СНОД) следует сигнал ЗАЯВКА, по которому вся измерительная информация переносится и фиксируется на носителях памяти в структуре СНОДа.

В соответствии с программой эксперимента может быть изменена геометрия измерений, введена защита, убран или заменен источник ионизирующего излучения (ИИИ) и т. п. После выполнения тех или иных действий или процедур по загрузке исходных данных в автоматическом или ручном режимах должен последовать сигнал ОТВЕТ, чтобы возобновить измерения. В ряде случаев сигнал ОТВЕТ может указывать на полное завершение измерений.

Насколько можно судить, приведен достаточно упрощенный вариант унифицированного измерительного тракта для амплитудного анализа. В исключительно сжатой форме представлены его составные части и выполняемые ими функции. Кратко рассмотрены основные этапы измерительного процесса. Невзирая на отсутствие счетных

каналов, а также ряда других технических деталей, например электронной техники и средств контроля стабильности работы тракта, представленная информация раскрывает основные аспекты и суть амплитудного анализа.

### 10.3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ТРАКТА

Важная роль в изучении характера и природы ядерных взаимодействий принадлежит спектрометрическим установкам или спектрометрам. Спектрометр — специализированная установка, состоящая из источника излучения, детектора и измерительного тракта, разработанная и организованная для изучения параметров самого источника излучения или ядерных превращений, вызванных им. В составе спектрометра нередко присутствуют несколько источников излучения и ряд детекторов.

Измерительный тракт спектрометра — целевая совокупность средств электронной техники, развернутая для выделения, сбора и накопления данных о параметрах изучаемых ядерных процессов, посредством линейных и нелинейных методов обработки детекторных сигналов. Рассмотрим базовые параметры измерительного тракта, предназначенного для проведения амплитудного анализа.

Амплитуда поступающих сигналов связана с энергией, которую частица потеряла в детекторе. Размеры детектора должны обеспечить полную утрату этой энергии. Энергетический диапазон  $E_d$  регистрируемых частиц будет равен  $E_d = E_{\max} - E_{\min}$ . Максимальному значению утраченной энергии  $E_{\max}$  соответствует такое же значение амплитуды сигнала  $A_{\max}$  и наоборот. Минимальному значению амплитуды  $A_{\min}$  соответствует энергия  $E_{\min}$ . Эта величина энергии называется также порогом регистрации.

Распределение амплитуд сигналов измеряется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Это устройство трансформирует аналоговый сигнал в цифровой код. Величина кода определяется разрядностью АЦП

и обычно составляет 6–12 двоичных разрядов. Для прецизионных измерений (регистрация с высокой точностью) число разрядов может достигать до 13–15 разрядов.

В таком случае, амплитуда сигнала  $A_{\max}$  при минимальной разрядности АЦП будет разделена на 64 ( $2^6$ ) части, а при максимальной — на 4096 ( $2^{12}$ ) частей, т. е. каналов. Наряду с энергетическим диапазоном  $E_d$  измерительный тракт спектрометра допускается характеризовать максимальным числом каналов  $M$ , т. е. ( $64 \leq M \leq 4096$ ). Диапазон изменения амплитуд входных сигналов составляет 0–5 или 0–10 В.

При этом можно говорить о шаге квантования, который в данном случае называется шириной канала  $h$ . Ее величина, равная  $h = A_{\max}/M$ , составляет десятки, единицы и даже сотые доли милливольт. Последние данные о ширине канала характерны для прецизионного амплитудного анализа. Его используют для точного определения изотопного состава технологических смесей на АЭС или обогатительных фабриках, а также на ряде других установок, связанных, например, с производством изотопов.

Ширину канала можно выразить в энергетических единицах, т. е. электронвольтах (эВ). Для этого шкалу спектрометра градуируют с помощью образцовых спектрометрических источников гамма-квантов (ОСИ). Набор источников (обычно 11 изотопов) охватывает диапазон энергий от десятков килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт. Каждый имеет одно или несколько значений моноэнергетических гамма-квантов. В спектре они дают характерные пики. Разность энергии между ними, деленная на число каналов, разделяющих их, дает ширину канала измерительного тракта в единицах энергии (эВ).

Важной характеристикой спектрометрического тракта является его разрешение. Это минимальное расстояние между пиками в спектре, когда их можно идентифицировать как отдельные. Получить такую ситуацию в реальных измерениях достаточно сложно. В силу этого на практике разрешение определяется в единицах энергии (эВ) по параметрам зарегистрированного пика моноэнергетических гамма-квантов  $E_0$ . При этом разрешение опреде-

ляют как ширину пика на его полувысоте, т. е.  $\Delta E_0$ . Принято считать, что для определения данного параметра выше полувысоты пика должно находиться не менее 5–7 каналов.

В практике измерений разрешение представляется в виде параметра ПППВ (полная ширина на полувысоте). Наряду с таким представлением разрешения (в единицах энергии) часто таким параметром служит его безразмерная величина  $\eta$ . Это уже относительное разрешение, которое определяется отношением, т. е.  $\eta = \Delta E_0/E_0$ . Обычно оно выражается в процентах и при этом его величина равна  $\eta = (\Delta E_0/E_0) \cdot 100\%$ . Итак, чем меньше величина относительного разрешения  $\eta$ , тем более тонкие детали спектра можно выделить данным спектрометром.

Характеристику преобразования основного канала измерительного тракта, который является линейной структурой, можно представить в виде

$$E^* = a_0 + h \cdot M,$$

где  $E^*$  — энергия моноэнергетического гамма кванта;  $M$  — номер канала его регистрации;  $h$  — ширина канала;  $a_0$  — порог регистрации АЦП. Характеристику можно получить с помощью ОСГИ при градуировке шкалы спектрометра. По большей части она представляет собой прямую линию.

Ее отклонение от прямой линии связывается с важной характеристикой тракта, которая получила название интегральная нелинейность (ИНЛ). Параметр  $K_{\text{ИНЛ}}$  определяется как отношение максимального отклонения реальной характеристики преобразования от ее идеального вида (прямая линия) к максимальному значению измеряемого параметра:

$$K_{\text{ИНЛ}} = \pm [A(M) - A_{\text{ид}}(M)]_{\text{max}} / A_{\text{max}} \cdot 100\%,$$

где  $A(M)$  — значение реального параметра (амплитуда), попавшего в  $M$ -й канал;  $A_{\text{ид}}(M)$  — значение идеального параметра (амплитуда) соответствующее  $M$ -му каналу;  $A_{\text{max}}$  — максимальное значение измеряемого параметра.

Интегральная нелинейность спектрометрического тракта не превышает сотых долей процента во всем диапазоне изменения параметра. Она влияет на точность линейного преобразования «аналог — код» и характеризует погрешность энергетической шкалы спектрометра при амплитудном анализе. Для измерения ИНЛ применяются генераторы белого спектра. Специализированное электронное средство генерирующее сигналы, амплитуда которых плавно изменяется от минимума до максимума значения.

Другой, не менее важной характеристикой спектрометров является их дифференциальная нелинейность (ДНЛ). Данный параметр  $K_{\text{днл}}$  связан с неоднородностью ширины канала. Ее величина определяется как максимальное относительное отклонение ширины канала  $h$  от среднего от ее значения  $\bar{h}$ :

$$K_{\text{днл}} = \frac{h_i - \bar{h}}{\bar{h}},$$

где  $h_i$  — ширина  $i$ -го канала;  $\bar{h}$  — усредненная по всей шкале ширина канала.

Величину ДНЛ выражают в процентах через соотношение

$$K_{\text{днл}} = \pm \left[ \frac{|N_i - \bar{N}|_{\text{max}}}{\bar{N}} \right] \cdot 100\%,$$

где  $N_i$  — число отсчетов в  $i$ -м канале;  $\bar{N} = \frac{\left( \sum_{i=1}^M \bar{N}_i \right)}{M}$  — среднее число отсчетов по всем  $M$  каналам «белого» спектра.

Для определения величины ДНЛ необходимо зарегистрировать спектр равновероятного распределения амплитуд. Их получают с помощью упомянутого генератора «белого» спектра. Зарегистрированный спектр позволяет определить как  $K_{\text{инл}}$ , так и  $K_{\text{днл}}$ . Величина ИНЛ лежит в пределах  $0,02\% \leq K_{\text{инл}} \leq 0,2\%$ . Величина  $K_{\text{днл}}$ , т. е. последнего параметра, находится в пределах  $0,5\% \leq K_{\text{днл}} \leq 2\%$ . Достижение минимального значения параметра  $K_{\text{днл}}$  для

разработчиков электронных средств данного направления представляет весьма существенную проблему.

Для измерительного тракта характерна максимально достижимая загрузка, когда искажения результата измерений не превышают заданного предела. При высокой интенсивности входных сигналов они проявляются в виде смещения пиков. На конце спектра этот сдвиг не должен превышать одного канала относительно нормальной загрузки в единицу времени.

Важным параметром амплитудного тракта служит быстроедействие, которое связано с мертвым временем. Это время обработки в АЦП предыдущего сигнала, когда последующие сигналы не воспринимаются. Оно бывает разного вида: постоянное, переменное, продлевающего и непродлевающего типа, экспоненциальное по форме и т. д. Величина мертвого времени может изменяться от десятков и менее наносекунд до сотен микросекунд и зависит главным образом от вида АЦП.

Долговременная стабильность измерительного тракта спектрометра относится к категории его основных параметров. Она определяется временем непрерывной работы, когда изменение параметра не превышает заданных пределов. О стабильности судят по пику, обычно находящемуся в конце регистрируемого спектра. Его смещение не должно превышать ширины канала. Этот параметр регламентируется для 8 ч непрерывной работы, изменения температуры окружающей среды от 20 до 30°C и питания сети  $\pm 10\%$ .

#### 10.4.

#### АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТИПА «АМПЛИТУДА — ВРЕМЯ — КОД» (А–Т–С)

Аналого-цифровое преобразование относится к одному из основных этапов амплитудного анализа. Данный вариант преобразования определяет целый ряд весьма существенных параметров: линейность (интегральную и дифференциальную), точность измерения (ширину канала), ее стабильность и т. д. Хотя в основу аналого-цифрового

преобразования положен целый ряд способов его реализации, но особое место среди них занимает метод «амплитуда — время — код» ( $A-T-C$ ).

Для такого преобразования характерны две основополагающие стадии: сначала «амплитуда — время» ( $A-T$ ), а затем «время — код» ( $T-C$ ). Реально эти стадии в процессе преобразования совмещены, но их обособление позволяет четко представить замену непрерывного аналогового сигнала его дискретным эквивалентом, т. е. кодовой величиной.

В основу работы устройств типа  $A-T-C$  положена идея трансформации амплитуды сигнала сначала в длительность, а затем в цифровой код путем заполнения ее импульсами стабильной частоты. Данная версия кодирования, для которой характерны отменная линейность (ИНЛ и ДНЛ) и высокая точность измерений, известна еще как вилкинсоновский метод. Его реализацию и основные этапы преобразования рассмотрим на базе одного из вариантов АЦП, представленного на рисунке 46.

На входе АЦП включено устройство отбора сигналов. Оно содержит линейную схему пропускания (ЛСП), управляемую дискриминатором нижнего уровня (ДНУ). Изменяя уровень дискриминации, исключают поступление сигналов малых амплитуд (шумы, наводки и т. д.) на этап преобразования  $A-T$ . В исходном состоянии ЛСП закрыта, изолируя зарядно-разрядное устройство, т. е. схему  $A-T$ , от некорректных входных сигналов.

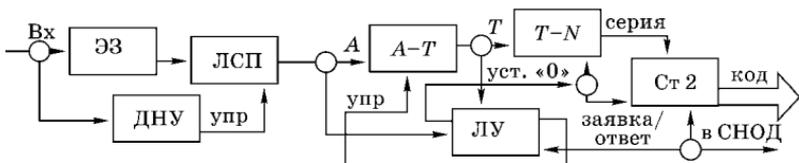


Рис. 46  
Схема АЦП типа  $A-T-C$ :

$A-T$  — преобразователь «амплитуда — время»; ДНУ — дискриминатор нижнего уровня; ЛСП — линейная схема пропускания; ЛУ — логика управления; СНОД — система накопления и обработки данных; Ст 2 — адресный счетчик;  $T-N$  — преобразователь «время — число импульсов»; ЭЗ — элемент задержки.

Схема линейного элемента задержки (ЭЗ) создает необходимые временные соотношения между сигналами на входах ЛСП. Она пропускает аналоговые сигналы только при наличии логического сигнала на управляющем входе ЛСП. Этот сигнал должен поступить раньше сигнала на ее аналоговом входе. Такие условия обеспечиваются схемой ЭЗ. Это, как правило, искусственная линия задержки с сосредоточенными параметрами величиной от 0,2 до 1,0 мкс.

В схему отбора сигналов может входить еще дискриминатор верхнего уровня и логическая схема (на рисунке 46 они не показаны). Такое устройство блокирует поступление на ЛСП логического сигнала управления при срабатывании обоих дискриминаторов (нижнего и верхнего уровня). Данную функцию может выполнить дифференциальный дискриминатор. Таким образом запрещается передача на схему  $A-T$  сигналов экстремальной величины, нарушающих ее функционирование.

Схема  $A-T$  в составе АЦП преобразует амплитуду  $A$  входного сигнала в длительность  $T$ . Между величиной обоих параметров имеет место прямо пропорциональная зависимость во всем диапазоне изменения амплитуд. Такой вид трансформации обычно осуществляется с помощью емкостного элемента. Сначала конденсатор заряжается до амплитудного значения  $A$ , а затем его медленно разряжают. Время разряда, выделенное в виде длительности  $T$ , является эквивалентом амплитуды поступившего сигнала.

В преобразователе  $T-N$  происходит замещение длительности  $T$  числом импульсов  $N$ . Их количество, пропорциональное величине  $T$ , поступает на двоичный счетчик Ст2, именуемый еще адресным счетчиком. Его код по сигналу ЗАЯВКА передается в систему накопления и обработки данных СНОД. Схемы логики управления (ЛУ) формируют сигналы, обеспечивающие функционирование модуля АЦП в целом. Принимая во внимание значимость аналого-цифрового преобразования методом  $A-T-C$  для амплитудного анализа, рассмотрим более подробно основные этапы и схемы его реализации.

### 10.5. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА В ДЛИТЕЛЬНОСТЬ (А–Т)

Способ аналого-цифрового преобразования типа А–Т–С долгое время оставался одним из наиболее востребованных методов амплитудного анализа, включая его прецизионные варианты. Обладая целым рядом достоинств (некоторые из них были уже отмечены ранее), АЦП данного вида с отработанными версиями своей реализации широко применяются в практике экспериментальных исследований. Рассмотрим наиболее важные узлы АЦП такого типа, определяющие ключевые параметры преобразования (линейность, точность, стабильность и т. п.).

Одним из таких устройств в его составе является схема преобразования амплитуды входного сигнала  $A$  в длительность временного интервала  $T$ , т. е. схема А–Т. В большинстве случаев такая структура называется просто зарядно-разрядным устройством (ЗРУ) преобразователя. Рассмотрим функционирование устройства преобразования А–Т на примере одного из вариантов схемы, представленного на рисунке 47.

Входной сигнал заряжает накопительную емкость  $C$  до амплитудного значения  $A$  через схему управления зарядом (СУЗ). В ее качестве могут быть использованы разные схемы пиковых детекторов (пассивных или активных) или устройств выборки и хранения. От их характеристик в значительной степени зависят линейности преобразования, т. е. интегральная и дифференциальная нелинейности АЦП. По окончании заряда схема управления разрядом (СУР) подключает генератор тока разряда (ГТР) к накопительному конденсатору  $C$ .

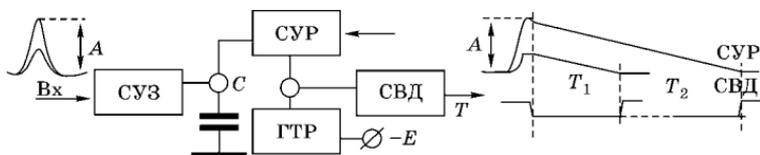


Рис. 47

Схема устройства преобразования А–Т:

ГТР — генератор тока разряда;  $C$  — емкость; СВД — схема выделения длительности; СУЗ — схема управления зарядом; СУР — схема управления разрядом.

Длительность временного интервала  $T$ , пропорциональная амплитуде входного сигнала  $A$ , определяется соотношением

$$T = A \cdot C / I_p,$$

где  $C$  — емкость конденсатора;  $I_p$  — ток его разряда. Из выражения видно, что время разряда конденсатора (т. е. длительность  $T$  интервала времени) определяется лишь величиной тока  $I_p$  разряда. Значение этого тока задается схемой ГТР. Стабильность тока разряда является крайне важным параметром, поскольку его флуктуации ведут к нарушению пропорциональности преобразования, а значит, к снижению точности измерения.

Начало разряда накопительного конденсатора обычно увязывают с управляющим сигналом УПР, который сфазирован с импульсами генератора таймерной серии (ГТС) устройства  $T-N$ . Это в значительной мере снижает цифровую составляющую дифференциальной нелинейности АЦП типа «чет — нечет». Время разряда конденсатора фиксируется схемой выделения длительности (СВД), завершая процесс преобразования типа  $A-T$ .

Итак, рассмотрен стандартный вариант схемы зарядно-разрядного устройства (преобразование  $A-T$ ). Для повышения линейности преобразования, т. е. снижения интегральной нелинейности ЗРУ, схема управления зарядом нередко охватывается отрицательной обратной связью. Ее берут с выхода схемы согласования импедансов, включенной на входе СВД (на рис. 47 это не показано). Следует отметить особую ценность такой связи, так как погрешность в измерении энергии излучения не может быть меньше величины ИНЛ самого модуля АЦП.

## 10.6.

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРВАЛА В ЦИФРОВОЙ КОД ( $T-C$ )

Это преобразование является заключительной стадией процесса кодирования в методе измерения  $A-T-C$ . Особое место на этом этапе преобразования занимает устройство трансформации длительности интервала времени  $T$  в число

импульсов  $N$ . Такую структуру в составе АЦП типа  $A-T-C$  довольно часто называют формирователем таймерной серии. Качество формирования такой серии импульсов должно быть крайне высоким, потому что именно им определяется дифференциальная нелинейность (ДНЛ) амплитудно-кодowego преобразования.

Как считают специалисты, ДНЛ является ключевой характеристикой АЦП, которая имеет первостепенное значение для спектрометрии излучений на основе амплитудного анализа. В спектрометрических АЦП величина ДНЛ обычно составляет (1,5–2,0%). Для прецизионных АЦП значение этого параметра несколько выше (0,8–1,0%), а в АЦП интегрального исполнения ДНЛ будет  $> 50\%$ . В АЦП типа  $A-T-C$  величина ДНЛ зависит от устройства преобразования  $T-N$  (длительности  $T$  интервала времени в число импульсов  $N$ ), схема которого представлена на рисунке 48.

Составной частью преобразователя является схема высочастотного, непрерывно идущего генератора таймерной серии ГТС. Его основой обычно служит кварцевый генератор с частотой следования импульсов 20–400 МГц. Схема фазировки СФ выполняет функцию замещения длительности  $T$  последовательностью (пачкой) импульсов  $N$  данного генератора. Применение устройства СФ исключает из пачки «резанные», т. е. импульсы неполной длительности.

Появление таких импульсов в пачке вызвано наложением их на фронт или срез сигнала поступившей длительности

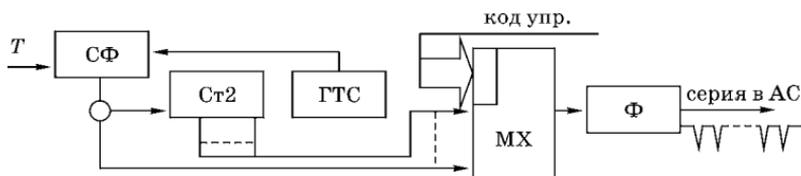


Рис. 48

Схема устройства преобразования  $T-N$ :

ГТС — генератор таймерной серии; МХ — мультиплексор; Ст2 — двоичный счетчик; СФ — схема фазировки; Ф — формирователь.

ности  $T$ . При наличии «резанных» импульсов в пачке происходит масштабный по величине рост (в 2–3 раза, а иногда и более) цифровой составляющей дифференциальной нелинейности всего АЦП типа  $A-T-C$ . Введение в состав преобразователя  $T-N$  устройства СФ в существенной мере уменьшает вклад этого негативного аспекта в величину ДНЛ измерителя типа  $A-T-C$ .

В свое время схемы фазировки создавались на базе схем совпадений и антисовпадений с использованием элементов задержки. Основой современных СФ служат триггеры  $D$ -типа. Используют обычно 2–3 последовательно включенных триггера  $D$ -типа. Если триггеров больше одного, то такие структуры называют многокаскадными схемами фазировки. На вход  $C$  триггера поступают сигналы от ГТС, а на вход  $D$  — длительность измеряемого интервала.

Использование в структуре преобразования  $T-N$  двоичного счетчика (Ст2), выполняющего функцию делителя частоты, и управляемого мультиплексора МХ позволяет изменять ширину канала АЦП в достаточно широких пределах. Диапазон ее изменения определяется «длиной» Ст2 и числом входов схемы МХ. Минимальное значение ширины канала будет получено, если на выход схемы МХ непосредственно передаются сигналы ГТС. Впрочем, ширину канала АЦП можно изменять, варьируя величину тока разряда конденсатора в схеме ЗРУ каскада преобразования  $A-T$ .

Выходной формирователь ( $\Phi$ ) независимо от выбранного коэффициента деления выделяет сигналы одинаковой длительности. Они передаются в виде серии импульсов на адресный счетчик АЦП (см. рис. 46), с триггеров которого получают цифровую информацию об амплитуде поступившего сигнала в виде двоичного кода. Итак, время преобразования типа  $A-T-C$  будет равно

$$T_{\text{пр}} = t_{\text{отб}} + M \cdot T_0,$$

где  $t_{\text{отб}}$  — время отбора сигнала на входе АЦП;  $M$  — число каналов;  $T_0$  — период следования импульсов ГТС.

### 10.7. АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МЕТОДОМ ПОРАЗРЯДНОГО ВЗВЕШИВАНИЯ

Бурное развитие и значительные успехи интегральных технологий способствовали развитию нелинейных методов кодирования. Один из них, известный как метод двоичного взвешивания, получил наибольшее признание (еще его называют метод последовательного приближения, поразрядного уравновешивания, последовательной аппроксимации и т. д.). Главная особенность — разнообразие вариантов названия, основное преимущество — сокращение времени преобразования (более чем на порядок) по сравнению с линейным методом кодирования типа  $A-T-C$ .

Идея метода поразрядного взвешивания состоит в сравнении амплитуды входного сигнала  $A$  с набором эталонов напряжения  $U_0$ , взвешенных по двоичному закону. Такой характер распределения эталонных напряжений обеспечивается специальными схемами: ЦАП и РПП (цифроаналоговый преобразователь и регистр последовательного приближения). Результат сравнения оценивается двумя значениями: либо «0», либо «1». Единичное значение, если  $A > U_0$ . Если  $A < U_0$ , результату сравнения придается нулевое значение. Рассмотрим функционирование АЦП такого типа на схеме, представленной на рисунке 49.

Амплитуда поступившего сигнала  $A$  фиксируется устройством выборки и хранения (УВХ) и подается на компаратор (К). По сигналу ЗАПУСК все регистры АЦП устанавливаются в нулевое состояние и устройство управления (УУ) начинает измерительный цикл. Триггер старшего разряда схемы регистра последовательного приближения устанавливается в единицу, чтобы с помощью ЦАП получить первый эталон сравнения  $U_0$  для схемы К. Его величина равна  $U_0 = U_0/2$ .

На выходе схемы К появляется результат сравнения в виде сигнала. Если  $A > U_0$ , то это будет 1, которая фиксируется в старшем разряде РПП, завершая первый такт измерения. Схема УУ генерирует следующий такт цикла измерения, сдвигая 1 в предыдущий разряд РПП и вновь записывая в старший его разряд 1. Эталон сравнения, рав-

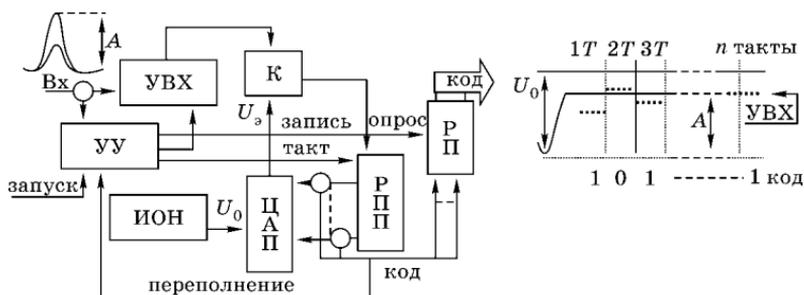


Рис. 49

Схема АЦП поразрядного взвешивания:

ИОН — источник опорного напряжения; К — компаратор; РП — регистр памяти; РПП — регистр последовательного приближения; УВХ — устройство выбора и хранения; УУ — устройство управления; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь.

ный  $U_3^* = U_0/2 + U_0/4$ , поступает на схему К, где сравнивается с амплитудой входного сигнала  $A$ .

При  $A < U_3^*$  в старшем разряде РПП будет записан 0 и схема УУ перейдет к генерации последующего такта измерения. В РПП осуществляется сдвиг на один разряд, а в старший его разряд вновь заносит 1. При этом получают эталон сравнения величиной уже  $U_3^{**} = U_0/2 + U_0/8$ . В третьем такте измерения опять получим 1, так как  $A > U_3^{**}$  и процесс измерения будет продолжен. Ряд тактов измерения дан в правой части рисунка 49. Их окончание связано с сигналом ПЕРЕПОЛНЕНИЕ схемы РПП. Поступая на устройство управления УУ, он прерывает генерацию тактов. Результат измерения из РПП переносится в регистр памяти (РП) и восстанавливается исходное состояние схемы УВХ.

Длительность такта измерения зависит от быстродействия схем, входящих в состав компаратора К и РПП, и может изменяться от десятых долей до нескольких микросекунд. Разрядность РПП, а это интегральная микросхема (ИМС) 155ИР17, равна 12. Ее можно увеличить, включая несколько таких схем последовательно. Используя лишь одну ИМС, получают 12-разрядный АЦП на 4096 каналов. Время преобразования  $T_{пр}$  в АЦП данного вида будет постоянно и равно

$$T_{\text{пр}} = t_0 + nt_{\text{т}},$$

где  $t_0$  — время срабатывания схемы УВХ;  $t_{\text{т}}$  — длительность такта;  $n$  — число тактов. Это время обычно не превышает 3–5 мкс, что существенно меньше, чем в АЦП типа А–Т–С.

Основным недостатком метода поразрядного взвешивания считается существенная неравномерность ширины каналов, т. е. большая дифференциальная нелинейность, достигающая до 50%. Без специальной техники разравнивания ширины канала такой АЦП для измерений в ядерной физике использовать невозможно. Благодаря технике разравнивания ДНЛ можно снизить до 1% (и менее), позволяя использовать эти АЦП в спектрометрии.

### 10.8. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ФОРМЕ ПРЯМОГО КОДИРОВАНИЯ

Масштабные достижения и внушительный прогресс, достигнутые в сфере интегральных технологий, способствовали развитию электронных средств на основе метода непосредственного аналого-цифрового (А-Ц) преобразования. Ключевые положения этого метода были высказаны еще в середине XX в., но требуемый объем электронной техники лишь подчеркивал невозможность практической его реализации на существующей элементной базе. Этот метод, самый быстродействующий из всех известных способов и структур А-Ц преобразования, так и оставался невостребованным до 1980-х гг.

Развитие и совершенствование ряда интегральных технологий способствовало появлению АЦП прямого кодирования. Их основу составляют компараторы, число которых (равное уровням квантования) устанавливается по двоичному закону. Первые АЦП такого вида имели 5–7 двоичных разрядов, что требовало наличия в них 32–128 компараторов. Частота кодирования аналоговой информации достигала почти 100 МГц. В начале XXI в. этот параметр составлял уже гигагерцы.

Характерно, что техника прямого кодирования получила специальное название flash ADC (flash (вспышка) analog to digital converter (FADC)). Ширина канала равна  $h = U_0/2^n$ , где  $n$  — число разрядов АЦП. Уже отмечалось, что число компараторов равно  $2^n$  и такое же количество резисторов одинаковой величины используется в цепи задания для них уровней сравнения. Рассмотрим функционирование АЦП прямого кодирования, который нередко называют еще АЦП параллельного типа, на одном из вариантов схемы его реализации (рис. 50).

Схема УВХ, набор компараторов  $K_1-K_n$  и делитель из одинаковых резисторов  $R$  образуют аналоговую измерительную часть АЦП. Все резисторы включены последовательно между источником опорного напряжения  $E_0$  и земляной шиной. На каждом из них напряжение снижается на одну и ту же величину  $h$ . Она равна ширине канала АЦП и подается на один из входов соответствующего компаратора. Другой вход каждого компаратора  $K_1-K_n$  подключен к выходу схемы УВХ.

В ходе измерений на выходах компараторов фиксируется позиционный код. При этом в зависимости от амплитуды входного сигнала  $A$  на одних выходах будут только единицы, а начиная, например, с компаратора  $K_m$  ( $m < n$ ) на их выходах будут фиксироваться лишь нули. Схема

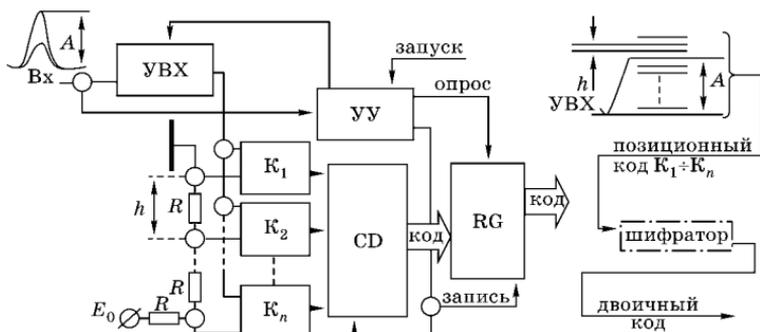


Рис. 50

Схема АЦП прямого кодирования:

$E_0$  — опорное напряжение;  $K_1-K_n$  — компараторы; УВХ — устройство выборки и хранения; УУ — устройство управления; CD — шифратор; RG — регистр.

шифратора (CD) модифицирует этот код в двоичный, который фиксируется в регистре (RG). Основные этапы этих процессов отражены в правой части рисунка 50.

Устройство управления (УУ), а также схемы CD и RG образуют логическую или цифровую части АЦП прямого кодирования. По сигналу ЗАПУСК схема УУ инициирует измерительный процесс. Запускается схема УВХ, которая запоминает амплитуду входного сигнала  $A$  и передает ее на входы компараторов. На их выходах появляется позиционный код, значение которого будет определяться амплитудой поступившего сигнала.

Схема CD переводит его в двоичный эквивалент, который с помощью сигнала ЗАПИСЬ фиксируется в RG. По сигналу ОПРОС выделяемый схемой УУ код RG передается в «быструю» память системы накопления и сбора данных. Высокая частота получения кодовой информации (более 1 ГГц) позволяет практически полностью оцифровать сигнал, поступивший на вход АЦП такого вида. При этом возрастает как объем, так и качество получаемой измерительной информации. Их широко применяют в исследованиях быстропотекающих (нередко однократных) процессов во многих областях науки и техники.

### 10.9. АНАЛОГОВЫЕ ПРОЦЕССОРЫ — СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Ориентация на модульный принцип организации измерительных трактов спектрометров стала одной из характерных тенденций в 1960–1970-е гг. Широкое распространение получили стандарты NIM (Nuclear Instrument Module) и САМАС (Computer Application to Measurement and Control), разработанные для построения измерительных средств ядерной электроники. Модульный принцип, заложенный в их основу, открывал широкие перспективы в создании на их базе различных автоматизированных систем сбора и обработки данных.

Магистрально-модульный принцип организации таких систем обусловил необходимость разделения электронной техники измерительных трактов на отдельные функционально законченные измерительные модули. В состав этой техники входят предусилители, спектрометрические усилители, инспекторы наложений, режекторы таких событий, линейные схемы пропускания, расширители импульсов и т. д. Одним из главных критериев, которому должны удовлетворять все эти устройства, стала их индифферентность к виду детектора, т. е. они обеспечивают высокий уровень параметров независимо от детектора.

Хотя разработчики стремились реализовать эти идеи, но в этой благородной цели явно просматриваются противоречия в виде параллелизма, возобновления и повторения решений. Явно прослеживается тенденция дублирования в их составе целого ряда обязательных частей. Действительно, в каждом из таких устройств необходимы буферные каскады, которые включены как на входе, так и на их выходе. Они предназначены для оптимального согласования их импедансов, т. е. сопротивлений.

Более того, наличие таких каскадов (которые просто необходимы) ведет к росту шумовых составляющих измерительного тракта, а значит, к ухудшению его разрешения. Характерно, что данный параметр тракта зависит как от места включения этих устройств в его структуре, так и их взаимного расположения в составе тракта. Более того, возникла проблема их синхронной работы, которая возрастала с повышением сложности измерительных систем. Изменение экспериментальных задач достаточно тесно увязано с необходимостью корректировки состава тракта, что еще больше усугубляет эти проблемы.

С появлением новых детекторов, особенно их полупроводниковых видов, впервые возникла ситуация, когда параметры измерительного тракта стали существенно ограничивать возможности новых детекторов. Тем самым была нарушена, если так можно выразиться, важнейшая традиция измерений в ядерной физике. Ее основополагающим критерием всегда был и остается тот факт, что параметры электронных средств, входящих в состав измерительного

тракта, в несколько раз превышают возможности детекторных устройств, что, естественно, гарантирует высокий уровень экспериментальных исследований.

В связи с этим была проведена корректировка концепции организации тракта для прецизионных измерений, т. е. измерений с высоким разрешением. Ревизии подвергли концепцию оптимальной декомпозиции средств электронной техники в составе измерительного тракта, которая обуславливалась магистрально-модульными принципами организации измерительных систем. Создание аналоговых процессоров стало эффективным инструментом в решении этих проблем.

Процессоры должны обеспечить прежде всего высокое разрешение и стабильность измерений, что связывалось с определенной совокупностью их свойств:

- 1) конструктивное единство с высоким уровнем объединения критериев оптимального формирования;
- 2) функциональная полнота при минимальной структурной избыточности;
- 3) централизованное управление параметрами с локальным совмещением оперативной их модификации;
- 4) оптимальное распределение функций между отдельными элементами структуры при совмещении их в ряде ее частей;
- 5) наличие дополнительных специальных структур, включая схемы контроля параметров тракта.

Например, в ряде процессорных структур ввели этап преобразования  $A-T$  («амплитуда — время»), были реализованы функции стабилизации тракта, т. е. его порога и коэффициента преобразования. Внедрение таких технических решений в состав аналоговых процессоров и их использование стало практикой прецизионных измерений при амплитудном анализе.

Интересно провести сравнение аналоговых процессоров, ориентированных на промышленную электронику, с процессорами ядерной электроники. В составе последних четко прослеживается основная цель их применения — высокое разрешение измерительного тракта, но их структура и состав почти никак не регламентированы. Анало-

говые процессоры промышленной электроники общие по назначению и с весьма четкой структурой. Их основа — цифровой процессор, функционирующий по заданной программе. Это позволяет оперативно, меняя программу, изменять функции, выполняемые промышленными аналоговыми процессорами.

Эти процессоры являются особым классом устройств, которые осуществляют целенаправленное по виду аналого-цифровое преобразование входных сигналов. Затем они обрабатываются в цифровом виде по установленной программе с дальнейшим цифроаналоговым преобразованием, когда результаты выдаются в аналоговой форме. Такие процессоры стали составной частью автономных контроллеров, локальных автоматических регуляторов, следящих систем, фильтров, интерполяторов и т. д.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что можно сказать о роли амплитудного анализа в экспериментальной физике?
2. Почему возникла необходимость ввода средств вычислительной техники в экспериментальные исследования?
3. Основные компоненты и функция главного канала измерительного тракта.
4. Измерительный тракт, структура и функции счетного канала в его составе.
5. Какова цель градуировки амплитудного измерительного тракта и средства ее осуществления?
6. Разрядность АЦП и ее влияние на параметры измерительного тракта.
7. Что такое разрешение измерительного тракта и как оно определяется?
8. Интегральная и дифференциальная нелинейности измерительного тракта и типовые их значения.
9. АЦП типа  $A-T-C$ : назначение, функциональный состав и его основные компоненты.
10. АЦП прямого кодирования, его реализация, главные достоинства и недостатки.
11. Сравните аналого-цифровые преобразования типа  $A-T-C$  и поразрядного взвешивания, назовите их достоинства и недостатки.



## ГЛАВА 11

# БАЗОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВО ВРЕМЕННОМ АНАЛИЗЕ И ЕГО ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

Для решения широкого круга экспериментальных задач ядерной физики наряду с амплитудным анализом масштабно применяется временной анализ. Его основу составляют разнообразные методики измерений распределения длительностей временных интервалов. Временные и времяпролетные методики в силу их универсальности и относительно простой реализации, но при достаточно высокой точности измерений получили признание во многих областях науки и техники.

### 11.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА

Для временного анализа характерен ряд обстоятельств, среди которых прежде всего отметим факт, что аналоговая информация содержится не только в амплитуде сигнала или его форме, но и в моменте времени его появления. В таком случае рассматриваемый параметр естественно будет связан с физической величиной, которая имеет размерность времени. Это может быть время жизни позитрона, составного ядра, возбужденного состояния и т. п. Кроме того, такая информация может быть еще увязана с энергией, скоростью, временем пролета заданного расстояния и т. д.

Суть временного анализа заключается в следующем. Сначала надо зафиксировать на временной оси момент появления события с приемлемой степенью точности. Затем выделить временной интервал между этими событиями и измерить его величину. При измерении начало временного интервала обычно связывают с появлением сигнала СТАРТ. Окончание интервала времени обусловлено поступлением сигнала СТОП. Определение величины временного интервала, заключенного между этими сигналами, будет представлять собой финальный этап измерений при временном анализе.

Получаемая с помощью временного анализа информация дает ответ на ряд вопросов. Это касается момента и места рождения частицы, направления и параметров ее перемещения в пространстве и времени, а также момента ее попадания в заданную точку пространства и регистрации в ней. Из полученной информации после обработки ее на ЭВМ можно извлечь данные об энергии частицы, ее угловых распределениях и т. д., а затем связать их с характером и параметрами ядерных превращений. Именно эти данные, получаемые с помощью временного анализа, являются целью многих экспериментальных исследований в ядерной физике, атомной науке и технике, а также смежных с ними областях. Основные представления о временном анализе и некоторых аспектах его осуществления можно получить из рассмотрения базовой версии его организации, изображенного на рисунке 51.

Основу базовой версии временного анализа составляет широко известный метод времени пролета. Суть метода состоит в измерении времени, которое затрачивают частицы на пролет фиксированного, точно измеренного расстояния, которое называется полетной базой спектрометра  $L$ .

Рис. 51  
Базовая версия организации  
временного анализа:

1 — источник исследуемого излучения; 2 — детектор излучения; 3 — система выделения и измерения интервалов времени, заключенных между сигналами СТАРТ и СТОП.



Таковыми частицами наиболее часто являются нейтроны. Эти установки получили название спектрометры нейтронов по времени пролета.

Поскольку частицы нейтральны и не обладают зарядом, то влияние магнитного поля Земли практически никак не сказывается на характеристиках их пролета. В свою очередь, для заряженных частиц пролетную базу необходимо надежно защищать от воздействия магнитного поля Земли. Влияние поля ослабляют посредством экранировки пути транспортировки этих частиц. Это условие в значительной мере ограничивает величину пролетной базы, которая для заряженных частиц обычно не превышает одного метра. Для нейтронов пролетная база может составлять несколько сот метров.

Вариант временного анализа (рис. 51) рассмотрим на примере спектрометра нейтронов по времени пролета. Источник излучения 1 (обычно импульсного типа) в момент времени  $t_1$  испускает нейтроны, энергия которых должна быть измерена, на пролетную базу  $L$ . Нейтронный детектор излучения 2, помещенный в конце базы, фиксирует их в момент времени  $t_2$ . Энергия нейтронов  $E_n$  связана с их скоростью  $v_n$  известным соотношением:

$$E_n = m \cdot v_n^2 / 2,$$

где  $m$  — масса нейтрона.

С другой стороны, скорость нейтрона  $v_n$  можно определить, зная время пролета им фиксированного расстояния  $L$ :

$$v_n = L / (t_2 - t_1),$$

где  $t_2$  и  $t_1$  — моменты времени регистрации и испускания нейтрона.

Тогда, подставив второе выражение в первое, получим

$$E_n = m \cdot L^2 / 2 \cdot (t_2 - t_1)^2.$$

В таком случае задача измерения энергии нейтронов  $E_n$  с помощью временного анализа сводится, с одной стороны, к фиксации моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ , а с другой, к измерению длительности временных интервалов типа  $(t_2 - t_1)$ .

Этот последний этап временного анализа осуществляется с помощью измерителя интервалов времени. Их варианты с учетом поставленных задач будут представлены и рассмотрены позже.

## 11.2. СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА И ЕГО БАЗОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Временной анализ является весьма эффективным средством решения широкого круга задач спектрометрии нейтральных и заряженных частиц методом времени пролета. Вопросы фиксации моментов времени уже были рассмотрены ранее. Электронная техника, решающая эти проблемы, известна как устройства временной привязки или формирователи временной отметки, а также как быстрые дискриминаторы. При временном анализе эти устройства используются для выделения сигналов СТАРТ и СТОП.

Применительно к физике ядра средних и низких энергий с помощью анализа такого вида получают крайне важную спектрометрическую информацию. Она позволяет судить о ряде параметров и находить плотности ядерных уровней, силовые функции, сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов и т. д. Приобретенная с помощью временных методик информация используется для уточнения ядерных и нейтронных данных, необходимых для расчета активных зон различных ядерных установок и реакторов.

Полученные данные способствуют изучению структуры ядра, механизма ядерных реакций и процессов деления ядер. Необходимо заметить, что с помощью временного анализа в ряде случаев получают результаты, точность которых невозможно обеспечить другими методами исследований. В экспериментах по физике ядра высоких энергий и физике элементарных частиц в составе измерительных систем временные каналы и методики регистрации занимают лидирующие позиции.

Важно отметить тот факт, что именно в этой области научных исследований технические средства измерения интервалов времени впервые стали выполнять в виде специализированных интегральных микросхем. В основу их технических решений положены прямые методы кодирования, преобразование типа  $t-A$  («время — амплитуда»), а также ряд других методов, суть которых будет рассмотрена несколько позже.

Временные измерения и электронные средства их осуществления масштабно применяются в изучении физико-химических процессов в различных материалах. Техника, обеспечивающая реализацию временных методик, используется при изучении спектрально-кинетических характеристик люминесценции в разных средах. Временные измерения применяются для подпороговой диагностики и в поиске активных сред для лазеров с прямой ядерной накачкой.

Широкий спектр методических и электронных средств используется в активной диагностике плазмы, в исследованиях кинетики распада возбужденных состояний молекул и атомов, процессов передачи энергии в твердом теле и т. п. Освоение весьма коротких временных диапазонов, что характерно для лазерной техники, открыло область оптико-физических исследований по изучению фотосинтеза, динамики биологических объектов и сложных органических молекул и т. д.

Все это далеко не полный перечень направлений, где успешно и эффективно реализуются временной анализ, его методики и техника. Появление, становление и развитие лазерной техники стало еще одним из стимулов расширения сферы временных измерений. Лазерные дальнометры, датчики перемещений, навигационные системы роботов и т. д. являются ярким примером эффективного симбиоза лазерной техники и средств измерения времени.

Лазерные измерители дальности, компактные и высокоточные альтиметры (высотометры) стали неотъемлемой частью специализированных технических средств. Они нашли применение в авиации, навигации в системах ориентации и т. д. В их основу было положено все многообра-

зие временных методик. Опираясь на эти методики, лазерная техника уверенно продвигается в этих сферах, повышая безопасность полетов и точность перемещения объектов во времени и в пространстве и т. п.

Рассмотрим реализацию лазерной дальнометрии на примере локации космических объектов, т. е. определения расстояния до них. Эти измерения проводятся в галактических масштабах, и они весьма далеки от проблем ядерной физики. Однако в них присутствуют и четко просматриваются все атрибуты временного анализа, характерного для ядерно-физических экспериментов. Организация измерений по определению дальности с помощью лазерной локации объектов представлена на рисунке 52.

Сигнал лазера в виде короткого импульса света с помощью передающей оптической системы (ПерОС) излучается в сторону объекта. Лазер запускается информационно-измерительной системой (ИИС), служащей для регистрации и измерения интервалов времени. Светоделитель выделяет часть лазерного импульса на фотоприемное устройство (ФПУ<sub>1</sub>) для формирования сигнала СТАРТ, фиксирующего начало измерения.

Отраженный от объекта сигнал поступает на приемную оптическую систему (ПриОС), передается на другое устройство ФПУ<sub>2</sub> и выделяется в виде сигнала СТОП. Временной интервал, заключенный между сигналами СТАРТ и СТОП, обрабатывается и измеряется в ИИС. Измеренная

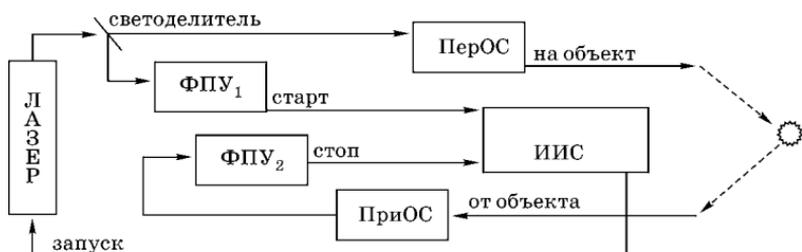


Рис. 52

Структурная схема реализации лазерной дальнометрии:

ИИС — информационно-измерительная система регистрации интервалов времени; ПерОС — передающая оптическая система; ПриОС — приемная оптическая система; ФПУ — фотоприемное устройство.

длительность этого интервала, соответствующая удвоенному времени распространения лазерного импульса до объекта, однозначно определяет дальность до него.

Следует отметить еще одно важное направление — лазерное зондирование атмосферы. Оно обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами. Это прежде всего высокое пространственное разрешение, большая дальность, высокая оперативность измерений при минимальном уровне воздействия на среду. Кроме того, фиксируются параметры, которые говорят о степени загрязненности атмосферы, составе загрязнений, об их перемещениях по высоте и дальности и т. п. В полученных данных заключена еще и метеорологическая информация: содержание влаги, атмосферные фронты, их положение, высота, перемещение, а также наличие турбулентностей и т. д.

Насколько можно судить, представлен краткий и весьма неполный перечень областей науки и техники, где эффективно применяется временной анализ, что лишний раз подчеркивает довольно масштабное его использование. Необходимо определиться с критериями систематизации методов и техники временного анализа. Если в качестве основного критерия использовать ширину канала, то в регистрации интервалов времени можно выделить три основных направления: методы и технические средства измерения микросекундного, наносекундного и субнаносекундного диапазонов. В дальнейшем будет проанализирована и отмечена специфика каждого из них.

### 11.3. ТИПОВОЙ ВАРИАНТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ДЛЯ ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА

Не делая привязки к основным направлениям регистрации интервалов времени, рассмотрим типовую версию обобщенного варианта измерительного тракта для временного анализа. В отличие от амплитудного анализа, где обычно используется только один измерительный канал, для временного анализа обязательно необходимы два канала

отбора событий. Один из них всегда связан с выделением и формированием сигналов СТАРТ. Существование другого канала обусловлено необходимостью селекции и получения сигналов СТОП.

Задачей временного анализа является измерение интервалов времени, заключенных между этими сигналами. При измерении регистрируются экспериментальные данные, которые являются аппаратным временным спектром. Энергетический спектр исследуемого излучения приобретают после обработки на ЭВМ аппаратного спектра. В ходе дальнейшей обработки энергетического спектра получают окончательные результаты экспериментальных исследований.

При выделении сигналов СТАРТ и СТОП можно говорить об их связи, т. е. возникновение одного сигнала должно сопровождаться появлением другого. Однако в ряде случаев это условие нарушается и регистрации не происходит. Следует заметить, что в экспериментальной установке пункты появления или рождения сигналов СТАРТ и СТОП обычно разнесены. Данный факт принято уточнять, указывая их на топологической схеме установки. Схему нередко называют геометрией эксперимента.

Вариант организации измерительного тракта временного анализа и его состав для определения энергии нейтронов представлены на рисунке 53. Ускоренные до задан-

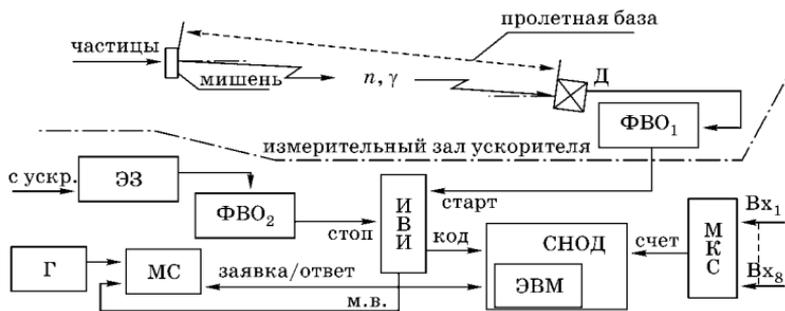


Рис. 53

Измерительный тракт для временного анализа:

Г — генератор; Д — детектор; ИВИ — измеритель временных интервалов; м. в. — мертвое время; МКС — многоканальный счетчик; МС — мониторный счетчик; ФВО — формирователь временной отметки; ЭЗ — элемент задержки;  $n, \gamma$  — нейтроны и гамма-кванты; СНОД — система накопления и обработки данных.

ной энергии заряженные частицы (протоны, дейтоны, электроны и т. п.), взаимодействуя с материалом мишени М, порождают нейтроны и гамма-кванты. Размещенный в конце пролетной базы детектор Д может зарегистрировать лишь те из них, которые попали в него.

Детекторный сигнал, выделенный схемой формирования временной отметки ( $\Phi\text{ВО}_1$ ), служит сигналом СТАРТ, который подается на один из входов измерителя временных интервалов (ИВИ). На другой вход измерителя поступает сигнал СТОП, сформированный схемой  $\Phi\text{ВО}_2$ . Интервал времени между этими сигналами измеряется схемой ИВИ. Результат измерения в виде кода передается в систему накопления и обработки данных (СНОД) для регистрации.

В качестве сигналов СТОП используются нормированные схемой  $\Phi\text{ВО}_2$  сигналы с пикап-электрода ускорителя. Для выбора и установки временных соотношений между регистрируемыми сигналами используется элемент задержки (ЭЗ). Подбирая его величину, добиваются регистрации гамма квантов в самом конце спектра. Такой вид характерен для «обратной» временной шкалы. Она возникает при регистрации интервалов времени, когда в качестве сигнала СТАРТ используются сигналы детектора, расположенного в конце пролетной базы.

Действительно, не все нейтроны и гамма-кванты, возникшие на мишени, попадают в детектор. Режим «обратной» временной шкалы является ярким примером искусственного нарушения причинно-следственных связей между сигналами. Процесс измерения запускается не в момент поступления частицы на пролетную базу, а при регистрации ее в конце этой базы. Такая особенность временного анализа исключает запуск измерений во всех случаях, когда сигналу СТАРТ нет сигнала СТОП.

Это ведет к существенному снижению мертвого времени регистрации, поскольку резко сокращается некорректное число запусков модуля ИВИ. Это происходит, когда в наличии имеется только лишь сигнал СТАРТ, а сигнал СТОП отсутствует. Модули генератора (Г) и мониторингового счетчика (МС) образуют в измерительном тракте монитор-

ный канал, который функционирует в режиме измерения по живому времени.

Такие условия регистрации связаны с прекращением счета в схеме МС. Прерывание счета вызвано блокировкой ее сигналом мертвое время (м. в.). Такой сигнал поступает с модуля измерителя временных интервалов. Спустя установленное время в схеме МС регистрация прерывается. Схема мониторингового счетчика МС выставляет сигнал ЗАЯВКА для системы накопления и обработки данных СНОД.

После завершения программы текущего этапа регистрации (опрос счетных каналов, фиксация результатов в них, их сброс, запись числа в МС и т. д.) по сигналу ОТВЕТ из СНОД происходит запуск следующего этапа измерения. Длительность полного цикла измерения, состоящего из нескольких этапов, также устанавливается с помощью мониторингового счетчика. Вся счетная информация в измерительном тракте временного анализа фиксируется многоканальным счетчиком МКС. Среди счетных устройств такого назначения могут быть различные варианты двоичных и десятичных счетчиков на 2, 4 или 8 входов.

#### 11.4. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

Масштабное использование временного анализа в различных направлениях науки и техники ставит вопрос о методах и средствах измерения длительности интервалов времени. Ограничимся лишь той совокупностью способов и методов, которые ориентированы на применение в ядерной физике и смежных областях. По имеющимся сведениям, ядерно-физические исследования и их методики измерений уверенно проникают в разные сферы нанотехнологий, где временному анализу принадлежит весомая роль.

Рассмотрим специфику и наиболее характерные особенности измерения и регистрации распределений интервалов времени. Как показывает практика применения временного анализа, в его составе можно выделить три

основные тенденции, связанные с измерениями интервалов времени. Среди всей совокупности таких измерений и регистрации длительностей интервалов преобладают три базовых направления: прямые, косвенные и интерполяционные.

Каждый из представленных вариантов измерения интервалов времени должен использоваться с учетом целей и поставленных задач в экспериментальных исследованиях. Их решение должно быть обеспечено необходимым уровнем точности, а также надлежащим быстродействием и требуемой стабильностью измерений. В основу прямого метода кодирования интервалов времени положена идея сравнения длительности интервала времени с эталоном в реальном масштабе времени.

Это является вариантом непосредственного или прямого измерения интервалов времени. Важно отметить, что при таком варианте измерений иногда используется группа эталонов. В отличие от прямых, суть косвенных методов измерения длительностей состоит в том, что временной интервал трансформируется в другой параметр. В этом случае происходит замещение интервала пропорциональным значением какой-либо физической величины (заряд, амплитуда, величина потенциала и т. п.), которая затем измеряется.

Помимо этого, в косвенных методах в процессе измерения интервалов весьма часто осуществляется предварительное изменение их масштаба, что ведет к пропорциональному увеличению их исходной длительности. В основу интерполяционных методов измерения интервалов положена идея совместного использования ряда прямых методов. Ведь часто применяют сочетание прямого и практически любого косвенного метода измерения. Все разнообразие вариантов измерения интервалов времени можно представить в виде обобщенной структуры, схема которой приведена на рисунке 54.

С помощью временного анализа решается широкий круг задач экспериментальной физики. При этом ширина канала измерителей интервалов времени может изменяться в достаточно больших пределах. Она является парамет-



Рис. 54

Обобщенная структура основных методов измерения длительности интервалов (МИДИ) времени

ром, который определяет точность измерения интервала. Для измерения времени жизни возбужденного состояния ядер необходима ширина канала порядка  $10^{-11}$  с, а иногда и менее.

В свою очередь, для измерения параметров кривых распада нередко используется ширина канала от нескольких десятков до сотен секунд. Не вызывает сомнений факт, что охватить такой диапазон изменения и задания ширины канала одним устройством просто нереально. Для каждой измерительной задачи при временном анализе необходимо выбрать устройство кодирования интервалов времени, которое обладает оптимальной величиной ширины канала.

Следует заметить, что выбор измерителя в ряде случаев представляет собой весьма непростую задачу. Действительно, почти всегда приходится искать и находить компромисс между уровнем точности измерений и техническими, а также функциональными возможностями измерителя. Значимым фактором, который необходимо будет учитывать, является его стоимость. Она, как не трудно понять, будет расти как при увеличении его возможностей, так и при повышении точности измерений. Необходимо еще предусмотреть и перспективы дальнейшего использования такой техники.

Наиболее широкое применение среди методов прямого кодирования интервалов времени получил метод последовательного счета, который известен еще как счетно-импульсный, электронно-счетный, время-импульсный, а также как метод прямого счета. Суть метода последова-

тельного счета, а именно так будем называть его в дальнейшем, состоит в том, что в течение длительности измеряемого интервала двоичным счетчиком подсчитывается число импульсов высокостабильного генератора таймерной серии.

Таким образом, в счетчике будет зафиксирован цифровой эквивалент длительности интервала времени в виде двоичного кода, который может быть использован всеми средствами цифровой измерительной и вычислительной техники. Ширина канала  $\Delta$ , т. е. точность измерения, определяется периодом  $T$  следования импульсов генератора таймерной серии. Если частота этого генератора равна  $f$ , то минимальная ширина канала измерителя будет равна  $\Delta = T = 1/f$ .

Очевидно, что параметры измерителя длительности интервалов этого типа зависят в основном от характеристик генератора. Использование в его составе кварцевых резонаторов обеспечивает ему стабильность  $10^{-6}$ – $10^{-7}$ . В таком случае измеритель интервалов времени может иметь число каналов от  $10^5$  до  $10^6$ , при достаточно высокой их идентичности, т. е. с малой дифференциальной нелинейностью.

В составе измерителя двоичный счетчик, осуществляя пересчет выделенных импульсов генератора таймерной серии, в значительной мере определяет его параметры. Такой счетчик обычно называется адресным счетчиком. Его быстродействие зависит от первых триггеров. Именно они определяют и ограничивают предельную частоту следования импульсов генератора таймерной серии.

Если адресный счетчик выполнен на интегральных схемах типа ЭСЛ (эмиттерно-связанной логики), то его рабочая частота составляет 400 МГц. В такой ситуации для измерителя интервалов будет обеспечена ширина канала 2,5 нс. Более высокими счетными характеристиками (до 2,4 ГГц и выше) обладают счетные устройства, выполненные на интегральных схемах на основе арсенида галлия.

Представленная структуризация способов измерения интервалов времени достаточно масштабно используется в электронных методах ядерно-физического эксперимента. В настоящее время достижения интегральной элект-

роники все более настойчиво «размывают» границы между техническими средствами измерения интервалов времени микросекундного и наносекундного диапазонов.

Такие успехи содействуют повышению точности измерений, а также создают условия для появления универсальной техники. С ее помощью весьма эффективно регистрируют длительности интервалов в обоих диапазонах. Положительным моментом для измерителей интервалов времени, работающих в режиме последовательного счета, считается сравнительно простое изменение ширины канала.

Данный параметр обычно модифицируется степенями, изменяясь кратно  $2^n$ , где  $n$  — число разрядов счетчика. Первые его триггеры при этом выполняют функцию делителя частоты основного генератора серии. Более того, в процессе измерения в таких устройствах кодирования довольно просто вводить начальные задержки, осуществлять выбор участка спектра и менять ширину канала программным путем.

### 11.5. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА МИКРОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Одной из основных задач временного анализа является измерение длительности интервалов времени, заключенных между сигналами СТАРТ и СТОП. Характер поступления этих сигналов, задающих границы измеряемого интервала, естественно, связан с методическими аспектами временного анализа как для микро-, так и для наносекундного диапазонов. Немаловажным фактором становится специфика поступления этих сигналов на вход измерителя интервалов времени.

Рассмотрим наиболее характерные варианты взаимосвязи между стартовыми и стоповыми сигналами при временном анализе микросекундного диапазона. В классической версии унифицированного варианта временного анализа, что было отмечено ранее, каждому сигналу СТАРТ

обычно соответствует сигнал СТОП (см. рис. 51). Регистрации не произойдет, если для поступившего сигнала СТАРТ не будет сигнала СТОП.

В данной версии временного анализа (один СТАРТ и один СТОП) независимо от природы их возникновения стартовый сигнал всегда будет связан с первым из поступивших сигналов СТОП. Все последующие из этих стоповых сигналов будут, естественно, проигнорированы. Характерной чертой данного вида временного анализа принято считать его относительно простую реализацию.

Кроме того, это один из наиболее распространенных вариантов анализа в практике временных измерений. Его применяют при всех разновидностях поступления стартовых и стоповых сигналов. Это могут быть случайные сигналы на обоих входах измерителя длительности интервалов времени. Возможны также и другие варианты, когда на один из входов поступают нерегулярные сигналы, а на другой приходит их периодическая последовательность.

Важное место в составе временного анализа микросекундного диапазона занимает еще одна его версия, известная как многостоповый режим регистрации интервалов времени. В этом случае выделяются и кодируются длительности интервалов времени, связанные с сигналом СТАРТ и совокупностью сигналов СТОП. Число последних может достигать до нескольких десятков, так как теоретически никаких ограничений нет.

Не вызывает сомнений тот факт, что реализация данного метода измерений потребует специальной техники измерения интервалов. Для кодирования интервалов прежде всего необходим тот или иной вариант многостопного измерителя интервалов времени. Данный вид измерений распределений интервалов времени имеет существенные преимущества по сравнению с классической разновидностью временного анализа.

Для «классики» характерен одностопный режим регистрации. При многостоповом временном анализе существенно возрастают его функциональные возможности. Более того, в значительной мере расширяется диапазон измерений при единовременном увеличении точности

регистрации. В конечном счете реально увеличиваются объемы измерительной информации. В значительной мере возрастают ее уровень и качество, открывая новые перспективы и варианты для интерпретации получаемых результатов измерений.

Существуют различные версии кодирования интервалов времени при многостоповом временном анализе. Характерно, что базовыми устройствами такого вида служат технические средства, использующие методы прямого кодирования в форме последовательного счета. Понятно, что сложность этих устройств в значительной мере увеличилась за счет применения дополнительных технических решений.

Электронные средства данного вида пополнились модифицированными адресными счетчиками, устройствами быстрой промежуточной памяти. Усложнилась логика и управление передачей кода из адресного счетчика в промежуточную память. Такую процедуру необходимо выполнять всякий раз при поступлении на вход измерителя очередного сигнала СТОП. После этого в адресном счетчике, который работает без сброса, надо корректно модифицировать код. Существует ряд других тонкостей, что необходимо также учитывать.

Многостопный режим регистрации событий наиболее часто используется при спектрометрии нейтронов низких и средних энергий методом времени пролета. Пролетная база, в конце которой происходит регистрация нейтронов, доходит до нескольких сот метров. Измеряются интервалы времени относительно общего начала временной шкалы, которое задается сигналом СТАРТ, а длительности интервалов времени последовательно фиксируются стоповыми сигналами.

Наиболее характерным вариантом измерений при многостоповой регистрации является импульсный режим работы нейтронного источника. Наряду с традиционными многостопными измерениями существует циклично-конвейерный метод измерения и регистрации временных параметров событий в виде промежутков времени.

Данный метод в большинстве случаев предназначен для многостопового временного анализа микросекундного диапазона. Его суть состоит в том, что в последовательности стоповых сигналов каждый из них выполняет двойную функцию, т. е. имеет место бифункциональное использование каждого из этих сигналов. Сначала сигнал СТОП традиционно фиксирует окончание длительности интервала времени, а затем становится стартовым сигналом для нового интервала.

Длительность такого интервала будет уже определять очередной сигнал СТОП. В этом заключается идея бифункционального использования стоповых сигналов в циклично-конвейерном методе измерения интервалов. Суммируя последовательно коды зарегистрированных интервалов, получают информацию в цифровом виде для всех промежутков времени, длительность которых заключена между сигналом СТАРТ и последующими сигналами СТОП.

Завершая рассмотрение методических аспектов временного анализа микросекундного диапазона, отметим еще один момент в этих измерениях. Он заключается в том, что природа появления сигналов СТАРТ и СТОП обычно взаимосвязана. Для эксперимента данный аспект подчеркивается тем, что исследования проводятся в условиях, когда появление одного из них связано с возникновением другого. Взаимосвязь характерна для всех видов временного анализа, включая наносекундный диапазон.

### 11.6. ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ МИКРОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

В основу измерения интервалов времени микросекундного диапазона положен метод прямого кодирования, известный как метод последовательного счета. Длительность интервала, заключенная между сигналами СТАРТ и СТОП, заполняется импульсами от генератора таймерной серии. При этом выделенная серия импульсов является последовательным кодом измеряемого интервала.

Импульсы поступают на двоичный счетчик, где фиксируется их число, образуя двоичный код этого интервала. В измерителе интервалов времени, работающем по методу прямого счета, минимальная ширина канала определяется периодом следования импульсов  $T_0$  генератора таймерной серии. Если длительность поступившего интервала времени равна  $t_{\text{изм}}$ , то в счетчике зафиксируется  $N$  импульсов, т. е.  $N = t_{\text{изм}}/T_0$ .

Диапазон измерений  $D_{\text{изм}}$  входных длительностей зависит от числа разрядов двоичного счетчика  $m$  или числа каналов  $M = 2^m$  измерителя. В таком случае максимальный диапазон измеряемых интервалов будет равен  $D_{\text{изм, max}} = T_0 \cdot M$ . Число каналов измерителя временных интервалов или времяцифрового преобразователя может меняться от нескольких сот до нескольких десятков, а иногда и сотен тысяч.

Практика измерений показывает, что наибольшее число каналов требуется при измерении энергетических спектров нейтронов низких и средних энергий методом времени пролета. В таких измерениях охватывается довольно значительный диапазон энергий нейтральных частиц (тепловых и надтепловых нейтронов). Принято считать, что их энергия находится в пределах от 0,01 эВ до 1,0 кэВ.

Для нейтронов в этой области энергий нередко характерны достаточно узкие резонансные линии. Следует заметить, что к их параметрам ученые проявляют особый интерес. Учитывая, что диапазон энергий резонансов весьма узкий, для их регистрации необходимо иметь более высокую точность измерений. Следовательно, требуется регистрация с достаточно малой шириной канала измерителя.

Временные измерители такого типа имеют две основные разновидности. Они отличаются схемами воспроизводства цифрового эквивалента интервала времени, т. е. генераторами таймерной серии. Одни из генераторов могут работать в ждущем режиме, а другие функционируют в непрерывном режиме. Ждущий генератор запускается только лишь при поступлении сигнала СТАРТ.

Появление импульсов таймерной серии, т. е. их фаза, будет жестко привязано к стартовому сигналу. Поступле-

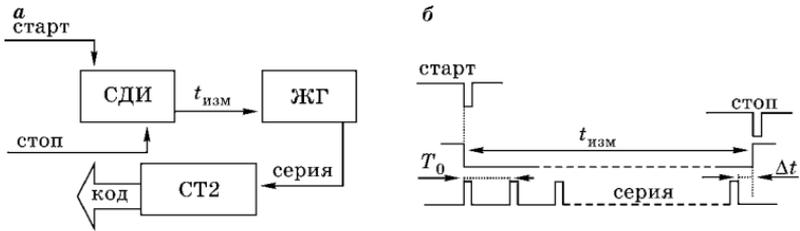


Рис. 55

Структура (а) и временные диаграммы (б) работы измерителя интервалов времени с синхронной серией:

ЖГ — ждущий генератор; СДИ — селектор длительности интервала; СТ2 — двоичный счетчик.

ние сигнала СТОП прерывает работу такого генератора, прекращая генерацию сигналов таймерной серии. Времяцифровой преобразователь такого вида получил название измерителя интервалов с синхронной серией (рис. 55а). Основой ждущих генераторов служат схемы с контуром ударного возбуждения или схемы с задержанной обратной связью.

Погрешность  $\Delta t$  определения величины цифрового эквивалента  $N$  длительности измеряемого интервала времени  $t_{\text{изм}}$  не превышает периода  $T_0$  следования импульсов такого генератора, т. е.

$$t_{\text{изм}} = N \cdot T_0 + \Delta t, \quad 0 \leq \Delta t \leq T_0.$$

Временные соотношения между основными сигналами для времяцифрового преобразователя с синхронной серией представлены на рисунке 55б.

Как показывает практика измерений, ждущие генераторы не в состоянии обеспечить высокую стабильность частоты повторения сигналов ( $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ ). В таком случае число каналов в измерителе обычно не превышает несколько сотен. Характерно, что процесс выхода такого генератора на стационарный режим работы приводит главным образом к увеличению интегральной нелинейности самого измерителя интервалов.

Эти простые по технике исполнения времяцифровые преобразователи такого вида используются в измерениях, где не требуется высокая точность кодирования. Число

каналов в таких устройствах обычно меньше 1000. Другой разновидностью измерителей интервалов времени, функционирующих на основе последовательного счета, являются преобразователи с идущими генераторами таймерной серии.

Структура и временные соотношения между сигналами времяцифрового преобразователя с несинхронной серией, т. е. с непрерывно идущим генератором, приведены на рисунке 56. В состав таких измерителей обычно входят высокостабильные генераторы ( $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ ) с кварцевым резонатором. Они функционируют в непрерывном режиме. Если конструкция такого генератора будет термостабилизирована, то его стабильность в значительной мере возрастает, вплоть до  $1 \cdot 10^{-8}$ .

Погрешность  $\Delta t$  измерения длительности интервала  $t_{\text{изм}}$  связана с неопределенностью появления сигналов СТАРТ и СТОП ( $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  — соответственно) относительно периода  $T_0$  генератора таймерной серии. Ее величина может достигать почти  $2T_0$ . Действительно, величина поступившей длительности  $t_{\text{изм}}$  будет определяться соотношением

$$t_{\text{изм}} = \Delta t_1 + NT_0 + \Delta t_2,$$

где  $0 \leq \Delta t_1 \leq T_0$  и  $0 \leq \Delta t_2 \leq T_0$  (см. рис. 56б).

Интервал времени  $t_{\text{изм}}$ , заключенный между сигналами СТАРТ и СТОП, выделяется схемой селектора длительности интервала (СДИ). При наличии длительности  $t_{\text{изм}}$

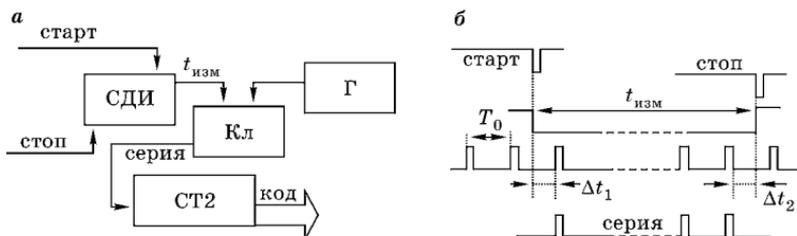


Рис. 56

Структура измерителя интервалов времени с несинхронной серией и временные диаграммы его работы:

Г — генератор таймерной серии; Кл — ключ; СДИ — селектор длительности интервала; СТ2 — двоичный счетчик.

схема ключа (Кл) пропускает сигналы генератора (Г) на двоичный счетчик СТ2. На выходе схемы Кл выделяется серия импульсов генератора Г, пропорциональная поступившему измеряемому интервалу.

Ее регистрирует двоичный счетчик СТ2, который по окончании входной длительности фиксирует величину интервала времени в виде кода. На временных диаграммах (см. рис. 56б) отмечены особенности измерения длительности временного интервала времяцифровым преобразователем типа «время — код» ( $t-C$ ) с несинхронной серией. Измерители этого типа называются еще временными кодировщиками.

Использование в схеме генератора таймерной серии кварцевого резонатора обеспечивает высокую стабильность и однородность генерируемых импульсов. В силу этого число каналов в таких кодирующих устройствах может доходить до нескольких сотен тысяч при весьма малой дифференциальной нелинейности (0,5% и менее). В устройствах этого типа достаточно просто управлять точностью измерений, меняя ширину канала непосредственно в ходе измерений по заданной программе.

### 11.7. НАНОСЕКУНДНЫЙ ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ И ЕГО ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

В ряде направлений ядерной физики и смежных с нею областях методики экспериментальных исследований основаны на измерении коротких интервалов времени. Для измерения времени жизни возбужденных атомов и ядерных состояний, регистрации времени пролета быстрых нейтронов, идентификации частиц и осколков деления и т. д. необходима точность измерений до нескольких десятых долей наносекунд и менее.

При этом диапазон измерений интервалов времени лежит в пределах от десятков наносекунд до нескольких микросекунд. Еще более высокая точность измерений требуется при изучении спектрально-кинетических характе-

ристик люминесценции, диагностики лазерно-активных сред, выявлении дефектов в материалах методами позитронной спектроскопии и т. п.

Характерно, что в последнем случае необходима точность измерений в десятки пикосекунд, а измеряемый диапазон интервалов времени обычно не превышает 2–4 десятков наносекунд. Изучение параметров лазерной и электронной техники часто связано с еще большей точностью, которая доходит до сотых (и менее) долей пикосекунд. В ядерной физике для измерений в наносекундной области используются быстрые детекторные устройства. Это могут быть полупроводниковые детекторы (ППД), обеспечивающие временное разрешение около 0,1 нс.

Однако они не нашли целенаправленного применения во временном анализе наносекундного диапазона. Весьма реальным сдерживающим фактором для таких детекторов служит необходимость применения быстрых усилителей и предусилителей, так как величина сигнала с ППД недостаточна для запуска последующих схем временной отметки. Наиболее существенная роль в этой области измерений принадлежит сцинтилляционным детекторам.

Обычно в их состав входят быстрые пластические или жидкостные сцинтилляторы органического типа с малым временем высвечивания. Вместе с ними используются специальные временные фотоэлектронные умножители (ФЭУ), параметры которых оптимизированы для временных измерений в данном диапазоне. С детекторов этого вида получают сигналы, амплитуда которых достаточна для непосредственного запуска устройств и схем временной отметки.

Одной из отличительных особенностей сцинтилляционных детекторов является их высокое временное разрешение, которое составляет десятые доли наносекунд и выше. Более того, форма сигналов, получаемых от этих детекторов, несет информацию о характере зарегистрированного излучения ( $\alpha$ -частица, нейтрон или  $\gamma$ -квант). Данный факт широко используется на практике в спектрометрии быстрых нейтронов по времени пролета для разделения регистрации нейтронов и гамма-квантов.

На временное разрешение сцинтилляционных детекторов влияет целая совокупность факторов. Среди них следует отметить передачу энергии регистрируемого излучения в интенсивность световой вспышки в сцинтилляторе, конечное время его высвечивания и зависимость его светового выхода от энергии детектируемого излучения. Сказываются флуктуации времени сбора света от вспышки на фотокатоде, его эффективность в образовании электронов и временной разброс в поступлении их на первый диод.

Необходимо принять во внимание время пролета электронов по диодам ФЭУ (~ десятки наносекунд) и его флуктуации, а также вклад устройств временной отметки, т. е. фиксации сигнала на временной оси. Наряду с ППД и сцинтилляционными детекторами в наносекундной области используются ФЭУ на основе микроканальных пластин (МКП). Тонкая пластина из свинцового стекла, обработанная по специальной технологии, на площади  $1 \text{ см}^2$  содержит около  $0,5 \cdot 10^6$  параллельных каналов.

Каждый канал — отверстие  $\varnothing 10\text{--}100$  мкм с длиной участка в 40–100 раз больше, чем диаметр. Итак, каналом является миниатюрная, тонкая стеклянная трубочка со специально обработанной поверхностью, которая имеет способность «размножать» электроны. В любом ее участке, куда попадет электрон, будут высвобождаться вторичные электроны, также обладающие ионизирующей способностью. Таким образом, внутренние участки такой трубочки, т. е. внутренняя поверхность канала, действуют как протяженная диодная система.

Перед такой МКП устанавливают фотокатод, который отделяют от нее тонкой алюминиевой фольгой в несколько микрометров. Выделяемые под действием излучения электроны с помощью электрического поля направляются на МКП. Фольга защищает фотокатод от воздействия возникающих на входе МКП положительных ионов. При отсутствии фольги эти ионы вызвали бы разрушение фотокатода. Внешнее электрическое поле, приложенное к МКП, способствует перемещению электронов внутри канала.

После МКП установлен анод, собирающий каналные электроны в виде сигнала, выделяемого на анодной нагрузке микроканального умножителя одноступенчатого типа. Коэффициент усиления в таком ФЭУ составляет около  $10^4$  и ограничен эффектом насыщения. Основное преимущество ФЭУ на МКП по сравнению с его обычным вариантом — снижение времени транспортировки электронов, которое составляет несколько наносекунд, а его разброс можно уменьшить до 0,1 нс.

Для увеличения коэффициента усиления обычно применяют двухступенчатый вариант. Две МКП включают последовательно так, чтобы их каналы располагались под углом  $\sim 10^\circ$  друг к другу («шеvronная» конфигурация), подавляя тем самым ионную обратную связь и доводя усиление до  $10^7$ . Для микроканального ФЭУ характерно весьма высокое временное разрешение, сравнимое, а иногда даже превосходящее лучшие ФЭУ обычной структуры.

Одноэлектронный импульс (с фотокатода получен один электрон) с микроканального ФЭУ имеет фронт  $\sim 0,35$  нс, а длительность на уровне 0,5 составляет  $\sim 0,52$  нс. Использование временного анализа наносекундного диапазона связано с повышением точности выделения интервалов времени. При такой ситуации точность фиксации сигналов СТАРТ и СТОП на временной оси должна быть по крайней мере в 2–3 раза выше ширины канала измерителя интервалов. Значит, недопустимо использование быстрых дискриминаторов по фронту входного сигнала.

Вместо них следует применять формирователи временной отметки по пересечению нуля или быстрые дискриминаторы по постоянной части сигнала. Логический отбор событий в эксперименте необходимо осуществлять с помощью быстрых схем совпадений и антисовпадений, а задерживать сигналы отрезками коаксиального кабеля. Для усиления сигналов применяются быстрые усилители.

Точность измерения интервалов времени устройством кодирования (измеритель длительности интервалов), т. е. его ширина канала, не должна снижать временное разре-

шение используемых детекторов. Главным требованием к технике измерений остается ее долговременная стабильность. Это важно, так как эксперимент может длиться с небольшими промежутками несколько недель или даже месяцев.

### 11.8. КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ В НАНОСЕКУНДНОЙ ОБЛАСТИ

Задача косвенных методов измерения наносекундных временных интервалов состоит в повышении точности регистрации их длительности. Поставленная цель достигается путем замещения измеряемой длительности пропорциональным параметром. Это может быть заряд, амплитуда или изменение масштаба времени (расширение длительности) исходного интервала времени. Такие манипуляции могут быть осуществлены как аналоговыми, так и цифровыми методами измерений.

Необходимо заметить, что аналоговые методы измерения длительности наносекундных интервалов получили самое большое распространение. Среди них метод преобразования «время — амплитуда» ( $t-A$ ) нашел наиболее широкое практическое применение. В течение длительности поступившего интервала времени независимо от вида применяемого накопительного элемента (конденсатор или индуктивность) запасается электрический параметр в виде амплитуды сигнала.

Величина амплитуды определяется временем заряда индуктивности от источника напряжения или зарядом емкости от источника тока. Данный амплитудный параметр пропорционален длительности поступившего интервала времени. В качестве накопительного элемента наиболее часто используется конденсатор. Уровень накопленного потенциала на емкости в конце ее заряда, обусловленный входной длительностью, измеряется или обычным амплитудным анализатором, или аналого-цифровым преобразователем в системе накопления и сбора данных.

Среди измерительной техники в любой лаборатории, которая проводит исследования по ядерной физике или просто применяет ядерные технологии и методики измерений, имеются приборы для амплитудного анализа. В таком случае, используя измерители типа  $(t-A)$ , можно организовать временной анализ. Это объясняет столь масштабное их распространение.

Преобразователи  $(t-A)$  различаются методами выделения интервала и замещения его амплитудой, а также состоянием ключей, порядком их коммутации и размещением относительно накопительного элемента. Важное место в составе аналоговых методов косвенного кодирования занимает преобразование «время — амплитуда — время — код» типа  $(t-A-T-C)$ .

Суть метода состоит в изменении масштаба времени на одном запоминающем элементе (как правило, конденсаторе) и замещении расширенной длительности цифровым эквивалентом путем преобразования «время — код»  $(T-C)$ . Заряд и разряд конденсатора разными токами, причем  $I_{\text{зар}} \gg I_{\text{раз}}$ , приводит к изменению масштаба времени. Коэффициент преобразования  $k$ , который будет равен  $k = I_{\text{зар}}/I_{\text{раз}}$ , показывает, во сколько возросла длительность исходного интервала, т. е.  $T = kt$ .

Наносекундные измерители интервалов этого типа различаются вариантами построения схем преобразования типа  $(t-A-T)$ . Такие схемы называют еще расширителями или экспандерами интервалов времени. Они подразделяются, в свою очередь, на структуры с разнополярными источниками токов заряда и разряда и схемы с однополярными токами.

Известны устройства изменения масштаба времени с одним источником тока, которые удваивают длительность интервалов, а каскадируя их, можно тоже расширять интервалы времени. Среди косвенных методов измерения интервалов следует выделить внушительную группу, связанную с верньерным методом измерения. В его основу положена идея сравнения динамики двух процессов.

Они оба связаны либо генерацией импульсов (цифровая версия), либо изменением потенциала накопительных

элементов (аналоговый вариант). Стартовый сигнал запускает один процесс, а стоповый другой, динамика которого быстрее первого. Затем фиксируется или совпадение сигналов, или равенство потенциалов. Цифровая версия иногда называется нониусным методом измерения длительности интервалов. Рассмотрим некоторые виды косвенных методов измерения интервалов несколько подробнее.

### 11.9. ИЗМЕРИТЕЛИ ИНТЕРВАЛОВ ТИПА «ВРЕМЯ — АМПЛИТУДА» ( $t-A$ ) И ИХ РАЗНОВИДНОСТИ

Среди аналоговых методов измерения интервалов времени наиболее распространенным является метод преобразования «время — амплитуда» ( $t-A$ ). В его составе важное место принадлежит преобразователям старт-стопного типа. В них сигнал СТАРТ запускает триггер (Тр), а сигнал СТОП возвращает его в исходное состояние. Выделенный триггером сигнал своей длительностью замыкает ключ (Кл), заряжая за время  $t$  конденсатор  $C$  от источника тока (ИТ).

Полученный на емкости  $C$  уровень сигнала при необходимости усиливается и через буферный каскад (БК) передается на амплитудный анализатор. С его помощью измеряется длительность поступившего интервала времени, если была осуществлена предварительная градуировка такого измерительного канала. Структура и временные диаграммы работы преобразователя типа ( $t-A$ ), представлены на рисунке 57.

Схема БК (типа повторителя сигнала), выполняя функцию согласования импедансов в схеме, повышает линейность преобразования в целом. Она в значительной мере снижает паразитные утечки заряда с конденсатора  $C$ , которые естественно возрастают при подключении входа амплитудного анализатора или дополнительного усилителя. Наряду с косвенным преобразованием вида ( $t-A$ ) старт-стопного типа следует отметить устройства такого же назначения, работающие по принципу перекрытия, а также по методу стробирования.

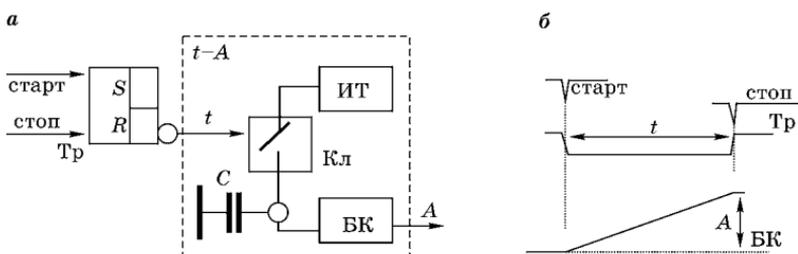


Рис. 57

Структурная схема преобразователя «время — амплитуда» ( $t-A$ ) старт-стопного типа (а) и временные диаграммы (б) его работы:

БК — буферный каскад; ИТ — источник тока; КЛ — ключ; Тр — триггер.

В преобразователях типа ( $t-A$ ), работающих по принципу перекрытия, логика функционирования несколько иная, чем у старт-стопного варианта. В принципе перекрытия выделенный сигнал СТАРТ формирует фиксированный по амплитуде и длительности импульс. Его длительность должна быть достаточно стабильна и равна максимальной величине измеряемого интервала времени  $t_{max}$ .

Выделенные сигналы СТОП формируют аналогичный импульс (амплитуда, длительность, стабильность). С помощью этих импульсов, обработанных операцией логического умножения, на выходе схемы  $I_2$  получают сигнал. Его длительность соответствует величине измеряемого интервала времени  $t$ . Структурная схема такого преобразователя типа ( $t-A$ ) и временные диаграммы его работы приведены на рисунке 58.

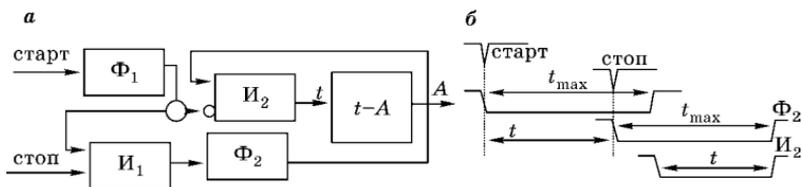


Рис. 58

Структурная схема преобразователя ( $t-A$ ), функционирующего по методу перекрытия (а) и временные диаграммы (б) его работы:

И — логический элемент; Ф — формирователь;  $t-A$  — преобразователь «время — амплитуда».

Сигнал формирователя  $\Phi_1$ , запущенный стартовым сигналом, деблокирует схему  $\text{И}_1$  для запуска другого формирователя  $\Phi_2$  сигналом СТОП. В то же время этот же сигнал, поступив на запрещающий вход схемы  $\text{И}_2$ , не позволяет сработать ей по приходу сигнала формирователя  $\Phi_2$  на другой ее вход. На выходе элемента отбора  $\text{И}_2$  появится длительность измеряемого интервала времени  $t$  лишь по окончании сигнала формирователя  $\Phi_1$ . Эта длительность и будет затем преобразована схемой  $t$ -А в амплитуду сигнала.

Еще одним вариантом преобразования  $t$ -А является стробируемый измеритель интервалов времени. Его структура и временные диаграммы работы представлены на рисунке 59. Поступивший сигнал СТАРТ запускает генератор пилообразного напряжения (ГПН). Выходной сигнал генератора деблокирует формирующую схему (ФС) stopового канала. Линейно нарастающее напряжение поступает на аналоговый вход схемы линейного пропускания (СЛП).

На выходе этой схемы по импульсу ЗАПУСК возникает сигнал с амплитудой, пропорциональной величине интервала, заключенного между сигналами СТАРТ и СТОП. Длительность выходного сигнала измерителя интервалов задается и определяется параметрами каскада ФС (рис. 59б). Отметим, что с помощью модуля такого вида можно измерять длительности интервалов, связанные с несколькими сигналами СТОП. Данный факт считается одной из особенностей метода стробирования, т. е. его многостопового варианта регистрации.

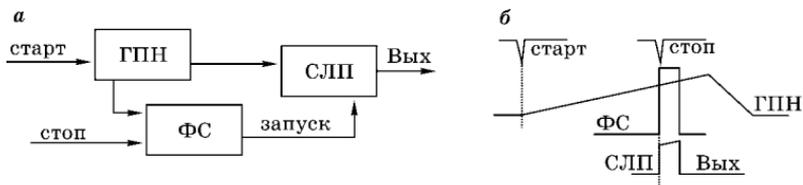


Рис. 59

Структура преобразователя  $t$ -А стробирующего типа (а) и временные диаграммы (б) его работы:

ГПН — генератор пилообразного напряжения; СЛП — схема линейного пропускания; ФС — формирующая схема.

### 11.10. ИЗМЕРИТЕЛИ ТИПА «ВРЕМЯ — АМПЛИТУДА — ВРЕМЯ — КОД» ( $t-A-T-C$ ) И ИХ ВАРИАНТЫ

Важное место в группе методов косвенного кодирования занимает способ преобразования ( $t-A-T-C$ ), т. е. «время — амплитуда — время — код». Его основу составляет широко используемый метод изменения масштаба времени типа ( $t-A-T$ ). За измеряемое время  $t$  осуществляется заряд конденсатора одним током  $I_3$ , а затем последующий его разряд другим, но гораздо меньшим током  $I_p$ . Соразмерность между токами, как уже отмечалось, устанавливается исходя из условия  $I_3 \gg I_p$ .

Отношение между ними, называемое коэффициентом трансформации  $k = I_3/I_p$ , показывает, во сколько раз была увеличена длительность  $t$  поступившего интервала времени. Таким образом, преобразованный интервал  $T$  будет равен  $T = kt$ . Далее эта длительность  $T$  поступает на схему ПВК (преобразователь «время — код»), где переводится в цифровой эквивалент измеряемого интервала времени  $t$ , завершая процесс его измерения.

Структурная схема измерителя наносекундных интервалов времени типа «время — амплитуда — время — код» ( $t-A-T-C$ ), а также временные диаграммы, поясняющие основные этапы его работы, представлены на рисунке 60. Измеряемый интервал  $t$ , заключенный между сигналами

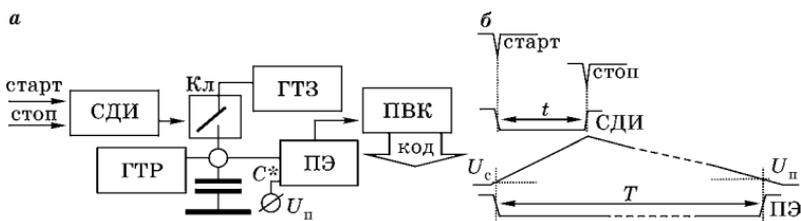


Рис. 60

Структурная схема измерителя наносекундных интервалов времени типа (а) «время — амплитуда — время — код» ( $t-A-T-C$ ) и временные диаграммы (б) его работы:

ГТЗ — генератор тока заряда; ГТР — генератор тока разряда; Кл — ключ; ПВК — преобразователь «время — код»; ПЭ — пороговый элемент;  $C^*$  — конденсатор; СДИ — селектор длительности интервала.

СТАРТ и СТОП, выделяется схемой селектора длительности интервала (СДИ). Интервал времени  $t$  в виде длительности сигнала со схемы СДИ замыкает ключ Кл и конденсатор  $C^*$  заряжается током  $I_3$  от генератора тока заряда (ГТЗ). По завершении длительности со схемы СДИ ключ Кл размыкается. Начинается разряд конденсатора  $C^*$  током  $I_p$ , величина которого определяется генератором тока разряда (ГТР).

Начало заряда конденсатора  $C^*$  и окончание его разряда фиксируется пороговым уровнем  $U_n$ , который задается с помощью порогового элемента (ПЭ). На его выходе выделяется расширенный интервал времени  $T$ , который передается на схему ПВК, трансформирующую длительность этого интервала в цифровой код. Минимальная ширина канала  $\Delta$  (точность измерения) преобразователя такого типа будет равна  $\Delta = T_0/k$ , где  $T_0$  — период следования импульсов таймерной серии в ПВК.

Важно подчеркнуть, что это наиболее распространенный вариант измерителя интервалов времени наносекундного диапазона. В нем реализуется аналоговый принцип изменения масштаба времени. Трансформация исходной длительности интервала осуществляется на одном запоминающем элементе (конденсаторе  $C$ ) посредством использования двух разнополярных источников тока.

Поскольку схема ГТР подключена к накопительному конденсатору  $C$  постоянно, то его заряд осуществляется током  $I_3 - I_p$ . Следовательно, коэффициент трансформации  $k^*$  в таком случае будет равен

$$k^* = (I_3 - I_p)/I_p = (I_3/I_p) - 1 = k - 1.$$

Необходимо заметить, что это не принципиально, так как величина коэффициента трансформации обычно составляет несколько сотен, а иногда до нескольких тысяч и более.

Используя эталонные интервалы времени (кабельные задержки, период следования генераторов с кварцевой стабилизацией), можно весьма точно настроить коэффициент трансформации, регулируя, например, ток разряда в схеме ГТР. Известны другие структуры и методы изме-

нения масштаба времени. В одном из них используется идея заряда конденсатора за временной интервал одним током, а затем его дозаряд, но меньшим током.

В другом методе применяется один источник тока для заряда конденсатора, а затем перезаряда его тем же током. Известен способ использования одного источника тока и двух конденсаторов разной величины, заряжаемых поочередно, и сравнения их потенциалов и т. д. Все эти материалы можно найти в оригинальных статьях и специальных обзорах журналов, связанных с данной тематикой.

### 11.11. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ИНТЕРВАЛОВ НОНИУСНОГО ТИПА

Большую группу в составе косвенных методов измерения интервалов наносекундного диапазона составляют устройства, использующие верньерный метод кодирования. Рассмотрим лишь те из них, в основу которых положены цифровые методы изменения масштаба времени. Заметим, что верньер в измерительной технике то же самое, что и нониус, когда дополнительная шкала измерительного инструмента, например в штангенциркуле, повышает точность измерения в 10 или 20 раз.

Идея измерения состоит в сравнении динамики двух процессов, генерирующих последовательности импульсов, периоды которых незначительно отличаются друг от друга. Стартовый сигнал запускает один процесс, а стоповый инициирует другой, динамика которого идет быстрее первого. В таком случае период повторения импульсов  $T_0^{**}$ , обусловленных сигналом СТОП, меньше периода повторения импульсов  $T_0^*$ , связанных с сигналом СТАРТ, т. е.  $T_0^* > T_0^{**}$ . Измерение завершается при совпадении сигналов обеих последовательностей.

Структурная схема измерителя наносекундных интервалов времени верньерного типа вместе с временными диаграммами его работы приведена на рисунке 61. Устройство селекции сигналов (УСС) выделяет сигналы СТАРТ и СТОП. Стартовый сигнал переводит в рабочее состояние

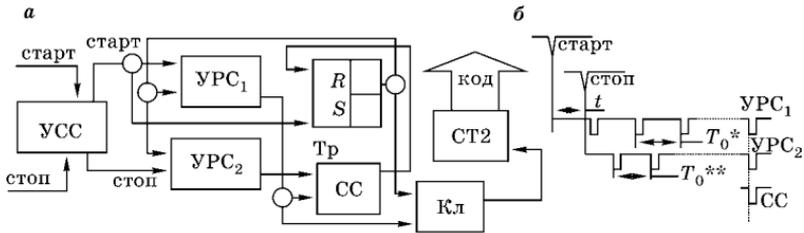


Рис. 61

Структурная схема измерителя наносекундных интервалов времени верньерного типа (а) и временные диаграммы (б) его работы:

Кл — ключ; СС — схема совпадений; СТ2 — двоичный счетчик; Тр — триггер; УРС — устройство регенерации сигналов; УСС — устройство селекции сигналов.

первое устройство регенерации сигналов ( $УРС_1$ ) и взводит триггер (Тр). Его уровень открывает клапан (Кл) для прохождения импульсов со схемы  $УРС_1$  на двоичный адресный счетчик СТ2.

Выделенный схемой УСС стоповый сигнал инициирует работу другого устройства регенерации сигналов  $УРС_2$ . Импульсы обоих устройств регенерации поступают на входы схемы совпадений (СС). Ее выходной сигнал, фиксирующий момент совпадения импульсов на ее входах, возвращает триггер Тр в исходное состояние. Вследствие этого работа обоих устройств регенерации прекращается, а код интервала времени, зафиксированный в адресном счетчике СТ2, передается в систему накопления и обработки данных.

Ширина канала в этом случае определяется не периодом генератора опорной серии, в качестве которого могли бы служить сигналы  $УРС_1$  или  $УРС_2$ . Она задается разностью периодов следования сигналов регенерации, а подсчитывая импульсы одного из них ( $УРС_1$  или  $УРС_2$ ), лишь фиксируют этот факт. При этом точность измерения, т. е. ширина  $\Delta$  канала измерителя, будет равна

$$\Delta = T_0^* - T_0^{**},$$

где  $T_0^*$  и  $T_0^{**}$  — периоды повторения сигналов в устройствах регенерации ( $УРС_1$  и  $УРС_2$ ).

В качестве структур регенерации сигналов можно использовать генераторы ударного возбуждения или структуры с задержанной обратной связью. Стабильность

частоты следования импульсов обоих регенераторов должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить необходимую точность и стабильность ширины канала временного измерителя. В представленном варианте функционирования измерителя величина измеряемого интервала  $t$  должна быть меньше длительности периода  $T_0^*$  следования импульсов в схеме УРС<sub>1</sub>, т. е.  $t < T_0^*$ .

Следовательно, число, которое зафиксировано в адресном счетчике СТ2 при поступлении входного интервала времени  $t$ , заключенного между сигналами СТАРТ и СТОП, будет равно  $n = t/\Delta$ . Однако если  $t \gg T_0^*$ , то требуется более сложная структура устройства для измерения и регистрации интервалов времени. Измерители такого вида получили название «цифровые интерполяционные измерители временных интервалов».

### 11.12.

#### **ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ**

В практике экспериментальных исследований существует целый ряд прикладных задач, для решения которых необходимы прецизионные измерения интервалов значительной длительности. Для таких целей широко применяются интерполяционные измерители интервалов времени. Они позволяют осуществлять регистрацию длительностей нередко более десятка микросекунд с наносекундной точностью, а иногда и выше.

Техника такого назначения создается на базе времяцифрового преобразователя последовательного счета с несинхронной серией, т. е. когда генератор опорной таймерной серии функционирует в непрерывном режиме. В измеритель этого вида вводятся интерполяторы, дающие кодированную информацию о моменте появления сигналов СТАРТ и СТОП относительно периода опорной серии. Структура устройства такого вида и временные диаграммы его работы даны на рисунке 62.

Измеряемый интервал времени  $t$ , заключенный между сигналами СТАРТ и СТОП, выделенный схемой селек-

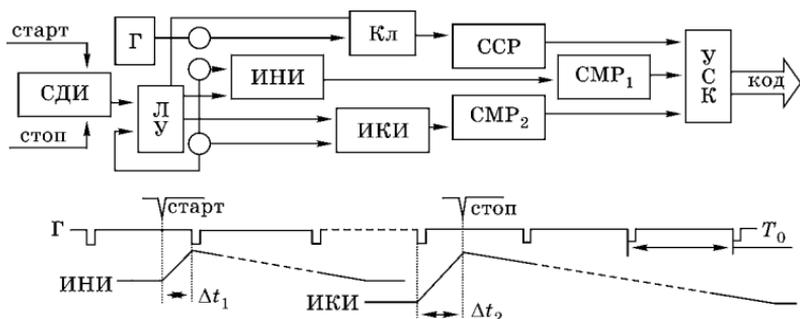


Рис. 62

Структура интерполяционного измерителя интервалов и временные диаграммы его работы:

Г — генератор опорной серии; ИНИ — интерполятор начала интервала; ИКИ — интерполятор конца интервала; Кл — ключ; ЛУ — логическое устройство; СДИ — селектор длительности интервала; СМР — счетчик младших разрядов; ССР — счетчик старших разрядов; УСК — устройство суммирования кодов.

тора длительности интервала времени (СДИ), поступает на логическое устройство (ЛУ). Его схема, взаимодействуя с генератором (Г) опорной серии, фиксирует и передает на соответствующие устройства измерителя всю совокупность длительностей, которые выделяются из измеряемого интервала времени.

Представлен вариант интерполяционного кодирующего устройства, в котором в качестве интерполяторов используются преобразователи типа «время — амплитуда — время — код» ( $t-A-T-C$ ). Один из них является интерполятором начала интервала (ИНИ) и дает кодовую информацию о временном положении сигнала СТАРТ в пределах периода  $T_0$  опорной серии. В свою очередь, интерполятор конца интервала (ИКИ) выделяет кодовую информацию о временном положении сигнала СТОП на временной оси в этом измерителе. Получаемые коды фиксируются в двух адресных счетчиках младших разрядов (СМР<sub>1</sub>) и (СМР<sub>2</sub>). Полное число периодов, на которое разнесены сигналы СТАРТ и СТОП, фиксируется счетчиком старших разрядов (ССР).

По окончании всех процедур кодирования результат измерения поступившего интервала получают на выходе устройства суммирования кодов (УСК). Необходимо заме-

титель, что рассмотренная схема интерполяционного измерителя интервалов на базе интерполяторов аналогового типа ( $t-A-T-C$ ) является наиболее распространенной структурой для прецизионного временного анализа наносекундного диапазона. Несколько меньше используются цифровые интерполяторы верньерного типа, хотя их организация проще аналогового варианта.

Развитие и совершенство интегральных технологий привело к созданию разных вариантов аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с весьма высокими параметрами, которые нашли применение в интерполяционных измерителях временных интервалов. В составе интерполяторов стали использоваться преобразователи типа ( $t-A$ ) и АЦП в интегральном исполнении, с помощью которых получают код младших разрядов. Ширина канала в таких интерполяционных измерителях интервалов времени может быть несколько десятков пикосекунд.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Метод времени пролета (МВП) — основной инструмент при временном анализе. Суть МВП.
2. Критерий систематизации методов и техники временного анализа и его роль в разграничении диапазонов измерения.
3. Структура методов измерения интервалов времени и их своеобразие.
4. Что такое ширина канала и ее роль при временном анализе?
5. Классическая версия временного анализа и ее содержание. Возможен ли анализ при отсутствии сигнала СТОП?
6. Основные положения многостопного временного анализа и варианты его реализации.
7. Измерители интервалов времени с синхронной и несинхронной серией, их схмотехнический состав.
8. Измерители интервалов времени типа ( $t-A$ ) и варианты их реализации.
9. Измеритель интервалов времени типа ( $t-A-T-C$ ), его структура.
10. Нониусный метод кодирования интервалов, его содержание и техника обеспечения.
11. Идея интерполяционного метода измерения интервалов и его реализация на базе преобразования времени типа ( $t-A-T-C$ ).



РАЗДЕЛ IV

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНИКИ  
СПЕКТРОМЕТРИИ,  
ЕЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
И СРЕДСТВ ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ,  
ВКЛЮЧАЯ АВТОМАТИЗАЦИЮ  
ИССЛЕДОВАНИЙ



## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Совершенствование ядерных технологий, расширение сферы их использования в традиционных и смежных областях стимулирует исследования по физике ядра. Результаты таких исследований применяются в энергетике, медицине, космических исследованиях, в контроле окружающей среды, утилизации радиоактивных отходов, в обосновании замкнутого цикла использования ядерного горючего и т. п. Расширение сферы ядерно-физических исследований связано с повышением требований к параметрам ядерных превращений, к увеличению точности ядерных данных. Повышение их точности с 20 до 6% при создании реактора гарантирует экономию средств почти в 10 млн долларов.

Получение новых данных, а также их уточнение ведет к увеличению сложности экспериментальных исследований, к росту числа каналов съема и регистрации измерительной информации. Создаются условия для внедрения и использования новых методик измерений в виде различных вариантов мультифакторного амплитудного и временного анализа. Основные положения и унифицированные версии таких вариантов анализа рассматриваются в материалах данного раздела. Здесь же обсуждаются вопросы и проблемы прецизионных и долговременных измерений для каждого из этих основных направлений анализа, включая технику и электронные средства их обеспечения и реализации.

В последней главе излагаются вопросы автоматизации ядерно-физических исследований. Во второй половине XX столетия на переднем фронте автоматизации таких исследований находилась ядерная электроника. Ее измерительная техника создавалась по модульному принципу (*NIM*, *ВИШНЯ*). Для экспериментальных данных требовалась существенная дальнейшая обработка для выделения необходимой информации. Растущие объемы экспериментальных данных, их оперативная обработка обуславливали использование ЭВМ и средств вычислительной техники в составе автоматизированных систем для научных исследований. Эти системы создавались на основе базовых стандартов магистрально-модульного принципа их построения (*САМАС*, *ВЕКТОР*, *FASTBUS*, *VME* и т. д.), основные положения которых в предельно сжатой форме рассмотрены в конце данного раздела.



## ГЛАВА 12

# **РАЗВИТИЕ БАЗОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Спектрометрия ионизирующих излучений является одним из основных инструментов исследования ядерных превращений. Различают две основные версии спектрометрических измерений: амплитудную и временную. Первая реализуется за счет амплитудного анализа, другая связана с временным анализом, который осуществляется в микросекундном или наносекундном диапазоне. Развитие и совершенствование этих видов анализа идет по пути мультифакторных их вариантов, основные положения которых представлены в данной главе.

### **12.1. ОСНОВНЫЕ МОДИФИКАЦИИ АМПЛИТУДНОГО МУЛЬТИФАКТОРНОГО АНАЛИЗА**

Прежде чем раскрыть суть и некоторые особенности амплитудного мультифакторного анализа, следует отметить необычайно масштабное использование обычного унифицированного его варианта. Области применения амплитудного анализа исключительно разнообразны. Его используют в составе изотопного и активационного анализа, методы которого характеризуются высокой чувствительностью и точностью регистрации. Эти методики измерений на основе электронных средств амплитудного анализа обладают завидной эффективностью и скоростью получения результатов.

Изотопный анализ применяют в различных сферах науки, промышленности, биохимии, медицины, биофизики и т. д. Особенно результативна его реализация при

изучении пути и скорости миграции различных веществ во многих средах естественного и искусственного происхождения. Активационный анализ используется в геофизике, металлургии, машиностроении, химии, биологии, геологии и других областях индустриального и научного производства.

Наиболее эффективно его применение в определении качественного и количественного состава изучаемых веществ. Методики активационного анализа реализуются в производстве и получении сверхчистых материалов в целом ряде областей науки и техники. Амплитудный анализ масштабно реализуется в прикладной  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектрометрии самого разного назначения, включая еще и спектрометрию нейтронов в широком диапазоне энергий.

Это далеко не полный перечень основных направлений эффективного использования амплитудного анализа. Он является важной составляющей большинства методик измерений в ядерной физике и смежных областях науки и техники. Параметры ядерных превращений регистрируются в виде амплитуды, заряда, длительности интервалов времени или обнаруживаются в изменениях формы сигнала и т. д. Единовременная фиксация любой пары таких параметров осуществляется, как правило, в виде многомерного спектра.

Эти спектры регистрируются с помощью специальных электронных средств, которые называются многопараметровые анализаторы или измерительные системы для многомерных измерений. Важно отметить, что основным фактором для любого вида измерений является регистрируемый параметр. Стало быть, при реализации амплитудного анализа главным фактором является амплитуда сигнала. Ее величина определяется энергией, которую частица теряет в детекторе.

Связь зарегистрированного амплитудного спектра и его энергетического аналога устанавливается путем градуировки измерительного тракта с помощью ОСГИ (образцовые спектрометрические гамма-источники). Используя полученные данные, путем специальной обработки получают энергетический спектр распределения частиц. Если

амплитудный анализ дополнить еще одним фактором, то можно говорить об амплитудном мультифакторном анализе (АМФА).

Среди таких дополнительных параметров можно отметить время, угол разлета продуктов ядерных превращений, скорость нарастания фронта сигнала или изменение его спада, двойные или тройные совпадения и т. п. Характерно, что в качестве дополнительного фактора может использоваться амплитуда сигнала, но уже от другого детектора. При такой ситуации экспериментальная информация будет регистрироваться в виде одной из разновидностей многомерного амплитудного спектра, т. е. его двухмерного варианта.

Как показывает практика экспериментальных исследований, реализация любого из вариантов АМФА чаще всего связана с использованием весьма непростой по составу и виду спектрометрической установки. При этом, как правило, наблюдаются увеличение числа детекторных устройств, рост объема и сложности измерительной системы, а также нарастание количества и номенклатуры электронных средств регистрации и обработки экспериментальных данных и т. д.

Следует отметить, что для каждой версии АМФА нужна глубокая проработка методики измерений независимо от того, в какой форме реализуются эти измерения: многомерные, многогрупповые, многодетекторные или другие их комбинации и виды на основе амплитудного анализа. В качестве примера рассмотрим организацию АМФА в форме двумерного варианта «амплитуда — амплитуда» (А–А), представленного на рисунке 63.

Такая модификация методики измерений может использоваться в исследованиях строения ядра посредством его возбуждения. Ее можно реализовать при изучении характера и пути снятия возбуждения. Аналогичный вариант измерений может применяться в изучении параметров спонтанного или вынужденного деления ядер. Необходимо отметить, что в демонстрируемой структуре измерительной системы не представлены ее счетные каналы регистрации.

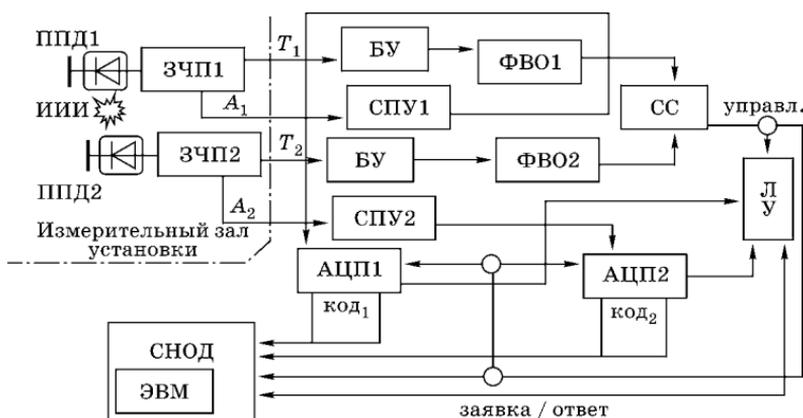


Рис. 63

Схема организации амплитудного мультифакторного анализа в форме двумерного его варианта «амплитуда — амплитуда» (А-А):

АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БУ — быстрый усилитель; ЗЧП — зарядочувствительный предусилитель; ИИИ — источник ионизирующего излучения; ЛУ — логическое устройство; ППД — полупроводниковый детектор; СНОД — система накопления и обработки данных; СПУ — спектрометрический усилитель; СС — схема совпадений; ФВО — формирователь временной отметки; ЭВМ — электронно-вычислительная машина.

В состав системы регистрации входят два идентичных измерительных канала, содержащие полупроводниковые детекторы ППД1 и ППД2. Они регистрируют частицы и гамма-кванты от источника ионизирующего излучения (ИИИ). Сигналы обоих детекторов подаются на два зарядочувствительных предусилителя (ЗЧП1 и ЗЧП2). В измерении используются их оба выхода, связанные с энергией  $E$  и временем  $T$ .

Сигналы с выхода  $E$  поступают на два спектрометрических усилителя (СПУ1 и СПУ2). Эти устройства осуществляют оптимальное формирование и усиление сигналов с каждого детектора. С помощью двух аналого-цифровых преобразователей (АЦП1 и АЦП2) сигналы преобразуют в цифровой код. Его регистрируют в системе накопления и обработки данных (СНОД) в виде двумерного спектра.

Сигналы с временного выхода  $T$  каждой из схем ЗЧП1 и ЗЧП2 поступают на быстрые усилители (БУ1 и БУ2). Выходные сигналы, усиленные этими устройствами, затем

выделяются схемами формирования временной отметки (ФВО1 и ФВО2) и поступают на схему совпадений СС. Она выделяет сигнал УПРАВЛЕНИЕ, который необходим для логического устройства (ЛУ), инициирующего процесс преобразования и регистрации амплитуды сигналов обоих детекторов. При отсутствии данного сигнала с устройства СС регистрация не производится.

Для любого варианта АМФА характерен ряд положительных аспектов. Каждая версия АМФА способствует более глубокому изучению исследуемых процессов. Возникают и создаются условия для установления нового уровня причинно-следственных связей между измеряемыми величинами. При этом существенно повышается качество получаемой информации, растут ее весомость и ценность. Расширяются возможности и варианты интерпретации результатов эксперимента с учетом возникших (ранее неиспользуемых) форм и версий их общей взаимосвязи.

## 12.2. СВОЕОБРАЗИЕ ФОРМ ВРЕМЕННОГО МУЛЬТИФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

В спектрометрии ядерных излучений наряду с большим разнообразием вариантов амплитудного анализа широко используется временной анализ. Его основные положения, базовые направления, области и сферы применения, а также реализуемая техника измерений были рассмотрены ранее. Как показывает практика использования методов и техники этого направления, наиболее сложные виды измерений реализуются в составе разных вариантов и форм временного мультифакторного анализа (ВМФА).

Среди их разнообразия отметим прежде всего многомерные варианты. Это двумерные версии «время — амплитуда», «время — заряд», «время — время», «время — угол разлета частиц» и т. п. Сюда же надо включить различные модификации многостоповых и многостартовых измерений. Важное место среди этой техники занимают системы многодетекторного временного анализа. Данный анализ можно считать наиболее перспективным в составе

ВМФА, поскольку измерения реализуются как в микросекундном, так и в наносекундном диапазонах.

Многостоповые измерения характерны для спектрометрии нейтронов по методу времени пролета в диапазоне тепловых и резонансных энергий (0,025–1,0 кэВ). Регистрируются интервалы времени между общим сигналом СТАРТ и последующими сигналами СТОП. Это унифицированный стандартный вариант многостопового временного анализа, обычно применяемый для решения типовых задач. При многостартовом временном анализе наблюдается обратная ситуация: интервалы начинаются разными сигналами СТАРТ, а заканчиваются одним сигналом СТОП.

Необходимо отметить еще один вариант многостоповой регистрации, который называется циклично-конвейерным методом измерений. Для него характерно нетрадиционное бифункциональное использование стоповых сигналов. Каждый последующий сигнал СТОП фиксирует окончание предыдущего интервала времени и становится сигналом СТАРТ для последующей длительности интервала. Процесс измерения завершается фиксацией заданного числа стоповых сигналов или по истечении установленного времени.

Результат измерений получают, суммируя коды зарегистрированных интервалов. Окончательный результат фиксируется в виде временного спектра при достижении заданного числа циклов, обусловленных программой измерений. Одним из примеров ВМФА может служить его вариант двумерного анализа «время — амплитуда», структурная схема которого приведена на рисунке 64.

Аналогичная форма анализа использовалась в составе времяпролетного спектрометра быстрых нейтронов на базе каскадного ускорителя, работающего в импульсном режиме [20]. Установка использовалась для исследований неупругого рассеяния нейтронов на ядрах делящихся элементов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и т. п.). Экспериментальные исследования в этой области связаны с решением задач по определению сечений взаимодействия нейтронов с ядрами исследуемых материалов и изучением спектров нейтронов неупругого рассеяния.



Его сигналы усиливаются предусилителем (ПРУ) и выделяются на его выходах, связанных со временем  $T$  и энергией  $E$ , т. е. амплитудой сигнала. Временные сигналы ПРУ, усиленные быстрым усилителем (БУ), поступают на схему ФВО1 и выделяются виде сигналов СТАРТ. Они подаются на измеритель временных интервалов (ИВИ) и схему совпадений (СС). Длительность поступившего интервала времени, заключенная между сигналами СТАРТ и СТОП, трансформируется схемой ИВИ в цифровой код.

Этот параметр задает одну из координат двумерного регистрируемого спектра, фиксируемого в СНОД. Другую координату спектра формируют, используя код аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Схема АЦП преобразует амплитуду сигнала спектрометрического усилителя (СПУ) в цифровой эквивалент (цифровой код). Сигналы со схемы СПУ поступают на дискриминатор (Д), выходные импульсы которого подаются на другой вход схемы совпадений.

Если ее входные сигналы в пределах установленного времени совпадают, то выходной сигнал УПРАВЛЕНИЕ разрешает преобразование и регистрацию измерительной информации. Регистрацией управляет логическое устройство (ЛУ), выставляя сигнал ЗАЯВКА на обслуживание измерительных модулей и передачи кодов ИВИ и АЦП в СНОД. По окончании регистрации из СНОД на блок ЛУ поступает сигнал ОТВЕТ, завершая регистрацию кодов. Если совпадений нет, то сигнала УПРАВЛЕНИЕ на выходе СС не будет. В такой ситуации не будет процесса преобразования и регистрации.

### 12.3. МНОГОДЕТЕКТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ — ОДНА ИЗ ФОРМ АМПЛИТУДНОГО ИЛИ ВРЕМЕННОГО МУЛЬТИФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

Многодетекторные системы регистрации параметров ядерных превращений привлекают к себе внимание возможностью в значительной мере сократить время проведения эксперимента. Это считается характерной чертой

таких измерений, поскольку в ходе эксперимента регистрируется информация с нескольких, как правило, идентичных детекторов. Все детекторы, используемые в составе измерительной системы (их число может достигать десяти и более), обрабатывают и фиксируют один и тот же параметр, связанный с определенным типом излучения.

Измерения этого вида можно отнести к одной из разновидностей многомерного анализа с двумя координатами («номер детектора и параметр измерений») в виде кода амплитудного или временного анализа. Устройство, кодирующее номер детектора (КНД), является бифункциональным, поскольку одновременно служит цифровой и аналоговой структурой. Оно выполняет функцию шифратора или кодера.

С его помощью определяют двоичный код номера детектора, с которого поступил сигнал. Кроме того, устройство выполняет функцию аналогового мультиплексора. Схема КНД передает амплитуду поступившего детекторного сигнала на вход аналого-цифрового преобразователя. При измерении может возникать ряд негативных факторов. Наиболее неприятный из них — утрата однозначности связи цифрового кода с КНД с его аналоговым выходом. При этом результаты измерений будут искажены.

Возникшие искажения невозможно учесть или скорректировать, поскольку окончательные данные измерительного процесса получают путем достройки кода аналого-цифрового преобразования кодом номера детектора. Отметим определенные преимущества многодетекторных измерений, которые заключаются в значительном увеличении общей скорости регистрации, что приводит к существенному сокращению продолжительности измерительного процесса.

Имеет место основательное увеличение объема регистрируемых данных. Все это обуславливает заметный рост эффективности экспериментальных исследований. В измерениях такого рода появляются новые возможности в установлении корреляционных связей в совокупности изучаемых процессов. При реализации других методик измерений такие связи вряд ли были бы обнаружены. Следует

обратить внимание на практически полную идентичность параметров и характеристик для всех детекторных устройств в составе системы регистрации.

Такая ситуация в существенной мере упрощает как предварительный анализ результатов эксперимента, так и окончательное установление их величины. Наряду с целым рядом положительных аспектов, которые связаны с данной методикой измерений, можно отметить и некоторые негативные ее моменты: сложность системы и достаточно высокая стоимость ее создания, что обусловлено существенным ростом числа детекторных устройств, включая дополнительное оборудование их обслуживания в ее составе.

Организацию измерений такого плана рассмотрим на примере установки для временного мультифакторного анализа в форме многодетекторной системы регистрации. Ее структурная схема в виде одного из вариантов энергоугловых измерений по исследованию распределений быстрых нейтронов по этим параметрам представлена на рисунке 65. Для всех детекторных устройств  $D_1 - D_n$  используется один и тот же измеритель временных интервалов (ИВИ).

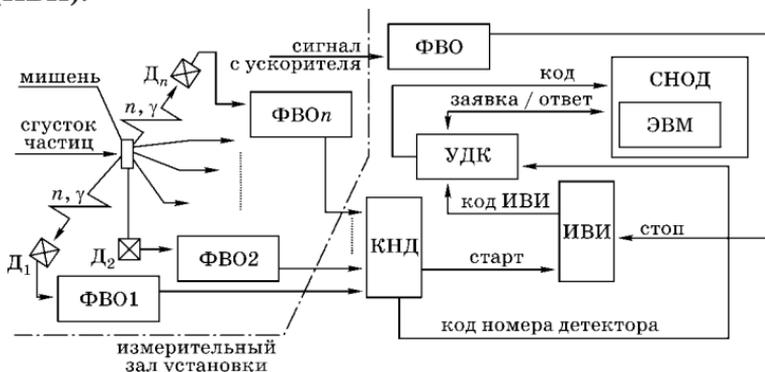


Рис. 65

Структурная схема установки для временного мультифакторного анализа в форме многодетекторного варианта по изучению параметров энергоугловых распределений нейтронов:

$D_1 - D_n$  — детекторы; ИВИ — измеритель временных интервалов; КНД — кодировщик номера детектора; СНОД — система накопления и обработки данных; УДК — устройство доработки кодов; ФВО — формирователь временной отметки; ЭВМ — электронно-вычислительная машина.

В такой ситуации обеспечивается полная идентичность характеристик измерительного тракта одновременно для всех детекторов. Сигналы с детекторов  $D_1 - D_n$  (как правило, сцинтилляционного типа), установленные в конце пролетной базы, через формирователи временной отметки ФВО1–ФВО $n$  поступают на кодировщик номера детектора (КНД). Его схема выдает код номера детектора, с которого поступил сигнал, и выделяет стартовый сигнал для измерителя временных интервалов (ИВИ). Модуль ИВИ трансформирует длительность интервала времени, заключенного между сигналами СТАРТ и СТОП, в цифровой код, который передается в устройство достройки кода (УДК).

В схеме УДК к величине кода зарегистрированного временного интервала добавляется в виде старших разрядов код номера детектора. По сигналу ЗАЯВКА полученная величина кода поступает в систему накопления и обработки данных (СНОД). В зависимости от номера детектора, с которого приходит сигнал СТАРТ (кода схемы КНД), информация о величине интервала времени регистрируется в разных группах памяти СНОД.

По завершении регистрации из СНОД выдается сигнал ОТВЕТ и дальнейший процесс измерения и регистрации может быть продолжен. Несмотря на отмеченные недостатки и некоторые сложности в реализации мультифакторного временного анализа в виде многодетекторных измерений, отметим ряд положительных моментов: реальное ускорение регистрации событий, а также заведомый комфорт в установлении причинно-следственных связей между ними.

Последний аспект обусловлен совместной их регистрацией. Явное снижение затрат времени на регистрацию и заметный рост объемов получаемой информации. Состав измерительных электронных средств абсолютно идентичен для всех детекторов. Данную разновидность многодетекторной регистрации при такой форме временного анализа можно считать одним из перспективных направлений ядерно-физических исследований в плане их развития и совершенствования.

#### 12.4. ОСОБЕННОСТИ МНОГОДЕТЕКТОРНОГО ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Одной из наиболее характерных особенностей многодетекторных измерений параметров временных распределений в данном диапазоне следует считать повышение результативности проводимых исследований. Увеличение объема получаемой экспериментальной информации обусловлено общим ростом эффективности регистрации, которая ведется в более высоком темпе. Повышение скорости регистрации связано с поступлением сигналов от нескольких детекторных устройств, размещенных под определенными углами относительно пучка ускоренных заряженных частиц (см. рис. 65).

Как уже отмечалось, все выделяемые длительности заключены между сигналами СТАРТ и СТОП и измеряются с помощью одного и того же временного аналого-цифрового преобразователя (ВАЦП). Этот измеритель интервалов времени обычно типа  $t-A-T-C$  (т. е. «время — амплитуда — время — код») используется при кодировании коротких интервалов времени. Естественно, что в этом случае в значительной мере упрощается анализ зарегистрированной информации.

Хотя ее получают от совокупности детекторных устройств, но для измерений используются одни и те же средства выделения и кодирования длительности временных интервалов. Точность измерений выделенных интервалов времени (ширина канала ВАЦП) обычно не превышает одной наносекунды, однако нередко составляет 0,2–0,5 нс. Диапазон измеряемых интервалов времени лежит в пределах 0,2–2,0 мкс. Его величина определяется периодом следования сигналов СТОП.

Диапазон изменения частоты их повторения, как правило, лежит в пределах 0,5–5 МГц. Эти сигналы получают от ускорителя заряженных частиц (протоны, дейтроны и т. д.), работающего в импульсном режиме. В большинстве случаев их снимают с пикап-электрода ускорителя,



ционных детекторных устройств. Схема СЛУ содержит четыре идентичных по составу канала Вх1–Вх4, каждый из которых состоит из преобразователя уровня (ПУ1–ПУ4) типа NIM–ЭСЛ и схемы пропускания И1–И4 в виде логических элементов И.

Информация, поступающая в виде сигналов с каждого из четырех детекторных устройств, хранится во входном регистре (ВР). С помощью логической схемы ИЛИ1 и формирователя Ф выходные сигналы схемы ВР (перепады уровней ЭСЛ, т. е. интегральных схем типа эмиттерно-связанная логика) трансформируются в импульсы фиксированных параметров. Их длительность (~ 20 нс), полярность (отрицательная) и амплитуда NIM (~ 20 мА). Они выделяются на быстром выходе схемы СЛУ и используются в ВАЦП в качестве сигналов СТАРТ.

Другой логический элемент ИЛИ2 передает входные сигналы на схему режекции наложений (СРН), которая исключает возможность некорректного запуска триггеров ВР. Случайный характер поступления детекторных сигналов по входам Вх1–Вх4 может вызвать их наложение на конец сигнала «блокировка» от ВАЦП. В этом случае будет происходить запуск триггеров ВР укороченным входным сигналом.

В такой ситуации будет нарушено временное положение быстрого выходного сигнала со схемы Ф, что приведет к изменению длительности поступившего временного интервала, регистрируемого модулем ВАЦП. Если шаг квантования интервала времени соизмерим с длительностью сигнала СТАРТ или больше его, то измерение интервала не сопровождается искажениями регистрируемого временного спектра.

При спектрометрии быстрых нейтронов по методу времени пролета длительность сигнала СТАРТ составляет обычно десяток и более шагов квантования, т. е. ширины канала ВАЦП. Это ведет к искажениям регистрируемых временных распределений, которые проявляются в перераспределении фиксируемой информации в измеряемых спектрах. Все негативные моменты такого рода можно

обнаружить в асимметрии пиков в спектре, а также они проявляются в форме ухудшения разрешения.

Для уменьшения этих искажений в составе СЛУ применяется специализированный каскад — схема режекции наложений (СРН) с особым алгоритмом работы. Она продлевает блокировку всех входов СЛУ на несовпавшую с концом сигнала БЛОКИРОВКА ОТ ВАЦП часть длительности детекторных сигналов. Это позволяет исключить запуск триггеров ВР входными сигналами неполной длительности, что устраняет искажения такого рода.

Для получения информации о номере входа поступления детекторного сигнала используется многоходовый приоритетный дискриминатор (МПД) [2]. Его применение позволило эффективно решить проблему перекрестных искажений, так как схема МПД обладает высоким разрешением лучше 0,1 нс. Такие искажения возникают, когда любая пара детекторных сигналов разделена малым промежутком времени. Это, как правило, ведет к формированию ошибочного кода номера детектора.

Первый из пришедших с ВР сигналов однозначно устанавливает схему МПД в состояние, которое не может быть больше изменено никакими последующими сигналами ВР. Выходные уровни схемы МПД через клапаны (К) по сигналу, сформированному устройством управления (УУ) из фронта сигнала КОНЕЦ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВАЦП, передаются на схему преобразователя кода ПК1. Это устройство трансформирует позиционный код номера детектора в двоичный параллельный код.

Другая схема ПК2 служит для преобразования параллельного кода в последовательный. Применение схем ПК двух видов упрощает адаптацию модуля СЛУ в таких измерительных системах временных спектрометров. По окончании сигнала БЛОКИРОВКА ОТ ВАЦП схемой СРН производится установка триггеров ВР в исходное состояние. При этом снимается сигнал БЛОКИРОВКА с логических элементов И1–И4.

Таким образом, завершается взаимодействие модуля СЛУ с одним из входных детекторных сигналов, которые поступают по четырем его входам. Устройства, входящие

в состав модуля СЛУ, выполнены в основном на микросхемах серии К500, а в схемах ПК1 и ПК2 применялись микросхемы серии К155. Один из рассмотренных вариантов СЛУ (модуль КАМАК единичной ширины, т. е. 1 М) использовался в составе электронной аппаратуры информационно-измерительной системы (ИИС).

Данная система являлась основой для многодетекторного спектрометра быстрых нейтронов, функционирующего по методу времени пролета. Обладая высокими параметрами, представленный модуль СЛУ обеспечил надежную регистрацию информации сразу с нескольких детекторов. Более того, ухудшения основных параметров спектрометра: его интегральной ( $\leq \pm 0,1\%$ ) и дифференциальной ( $\leq \pm 1\%$ ) нелинейностей, включая разрешение (лучше 2,5 нс), отмечено не было.

## 12.5. МУЛЬТИСКАЙЛЕРНЫЙ АНАЛИЗ В ИЗМЕРЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЙ

Регистрация интенсивности излучения в виде числа событий в единицу времени была и остается весьма важным параметром. Она служит составной частью измерений для многих направлений экспериментальных исследований. Такие измерения необходимы при решении как исследовательских, так и инженерных задач. Их реализуют в работе с радиоактивными материалами, изотопами, в отслеживании, например, их миграции с помощью различных компонентов, проб, мазков и т. п.

Без измерений данного параметра не могут обойтись ядерная физика, физика реакторов и быстрых нейтронов и их экспериментальные методы. Без таких процессов не обходится все многообразие приложений в смежных областях науки и техники. При регистрации интенсивности излучения успешно используются методы и техника мультискайлерного анализа, известного как многоканальный счет событий.

Такая разновидность анализа позволяет отслеживать весьма важный аспект, а именно динамику изменения

интенсивности излучения во времени. Результат измерений получают в виде счета событий в пределах заданного времени экспозиции одного канала. Регистрируя в объеме заданного числа каналов счетную информацию, фиксируют окончательный результат измерений в виде характерного спектра исследуемого процесса в форме изменения интенсивности во времени.

Шириной канала служит установленный промежуток времени экспозиции. Его величина может быть постоянной или меняться в ходе эксперимента. Совокупность таких каналов представляется в виде зарегистрированного спектра. Его форма и счетная информация в нем, зафиксированная в виде отсчетов событий, предоставляет возможность отслеживать скорость ее изменения во времени. Структурная схема организации модифицированного варианта такого анализа для исследования кривых спада активности в облученных образцах приведена на рисунке 67.

Образец сначала подвергается облучению, а затем транспортируется в специальное помещение, где находится

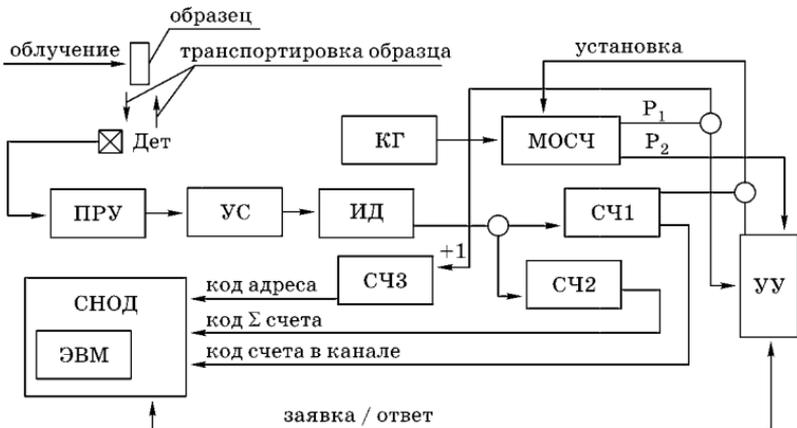


Рис. 67

Структурная схема организации мультискайлерного анализа для исследования спада наведенной активности в облученных образцах: Дет — детектор; ИД — интегральный дискриминатор; КГ — кварцевый генератор; МОСЧ — мониторный счетчик; ПРУ — предусилитель; СНОД — система накопления и обработки данных; СЧ — счетчик; УС — усилитель; УУ — устройство управления; ЭВМ — электронно-вычислительная машина.

детектор (Дет). Для транспортировки применяют различные манипуляторы. Кроме того, данную процедуру можно осуществлять с помощью пневмопочты. В качестве облучателя в большинстве случаев используется либо реактор, либо ускоритель. В последнем случае образец чаще всего служит мишенью. В ней за счет ядерной реакции концентрируется наведенная активность, поскольку мишень выполняет функцию конвертора.

Сигналы детекторного устройства Дет увеличивают по амплитуде сначала схемой предусилителя (ПРУ), а затем основным усилителем (УС). Его сигналы поступают на вход интегрального дискриминатора (ИД). Выбирая в нем уровень дискриминации, минимизируют вклад шумовых составляющих в тракте обработки и регистрации детекторных сигналов. Выходные сигналы модуля ИД подаются на входы счетчиков (СЧ1 и СЧ2) и регистрируются в них в виде счетной информации, т. е. в форме кода счета событий.

Электронные устройства — кварцевый генератор (КГ) и мониторный счетчик (МОСЧ) — выполняют функцию таймера. С их помощью задают параметры измерений, связанные со временем, т. е. длительность цикла регистрации и величину временного окна (ширину канала регистрации). Величину окна можно изменять и регулировать в довольно широких пределах, выбирая частоту следования сигналов в модуле КГ, а также задавая коэффициент пересчета в схеме МОСЧ, который определяет момент появления сигнала  $P_1$ .

Длительность одного цикла измерений тоже устанавливается схемой МОСЧ и завершается с появлением сигнала  $P_2$  на другом выходе данного модуля. Измерительный процесс, а точнее, его цикл, осуществляется следующим образом. Сначала устанавливают в схеме МОСЧ параметры  $P_1$  и  $P_2$  — ширину канала и длительность цикла измерений (число каналов). Затем перед началом регистрации все счетчики СЧ1–СЧ3 устанавливают в нулевое состояние.

Поступающая с детектора Дет счетная информация фиксируется в счетчике СЧ1. Регистрация событий в нем ведется до появления с выхода МОСЧ сигнала  $P_1$ , который

добавляется в счетчик СЧЗ и запускает работу первого этапа измерительного цикла. В соответствии с программой измерений зарегистрированная в схеме СЧ1 счетная информация в виде кода событий по сигналу ЗАЯВКА с устройства управления (УУ) передается и фиксируется в памяти СНОД.

Затем ее сигналом ОТВЕТ счетчик СЧ1 устанавливается в нулевое состояние, а в схеме МОСЧ регенерируется код величины окна и процесс регистрации сигналов с детектора Дет будет продолжен. Аналогичные этапы регистрации будут выполняться до тех пор, пока не возникнет сигнал  $P_2$  с другого выхода схемы МОСЧ. Появление сигнала  $P_2$  связано с завершением общего измерительного цикла в системе мультискайлерного анализа.

В этой ситуации схема УУ также выставляет сигнал ЗАЯВКА для СНОД, по которому происходит передача в нее счетной информации в виде окончательного кода измерения со счетных устройств СЧ1 и СЧ2. Затем счетные устройства СЧ1–СЧ3 приводят в исходное состояние и эксперимент можно продолжить (образец обратно транспортируют и вновь помещают под пучок ускорителя для облучения) или же начать новую серию измерений, заменив образец. Результат измерений — кривая спада интенсивности во времени для наведенной активности образца и суммарный счет зарегистрированных событий.

## 12.6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАКТ С ОЦИФРОВЩИКОМ СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРНЫХ УСТРОЙСТВ

В последнее время наблюдается тенденция масштабного роста задач по выделению информации в условиях импульсных, редко повторяющихся событий. Особенность происхождения таких процессов заключается в чрезмерном их быстродействии. Эти обстоятельства стимулировали развитие особого направления в измерительной технике, которое получило название цифровые регистраторы формы импульсных сигналов, т. е. оцифровщики формы сигналов (ОФС).

Для всего многообразия таких процессов характерна импульсная реакция датчиков, которая отражается в виде возникновения однократных выходных электрических сигналов. Исследователей интересует характер процесса, информация о параметрах которого заключена в форме импульса, получаемого с датчика, т. е. в его амплитуде, времени ее нарастания и спада, а также длительности, времени появления и т. д. Такие процессы, как показывает практика исследований, доминируют в физике плазмы, в лазерных системах, в физике высоких энергий.

Их можно обнаружить в ускорителях накопительного типа, в импульсных реакторах, в изучении ряда химических реакций, а также в некоторых структурах неразрушающего контроля и т. п. Ранее при изучении таких процессов с их высокой степенью сложности широко использовались специальные осциллографические системы. Они дополнялись особыми структурами фоторегистрации. Эти технические средства предопределяли дальнейшую, как правило, ручную расшифровку и обработку полученных результатов исследований.

Невысокая точность такой регистрации, сложные и достаточно трудоемкие процедуры получения конечных результатов исследований обусловили необходимость поиска новых методик измерений. Среди них наибольшее развитие и распространение получили быстрые цифровые методы измерений. Их реализация стала возможной в результате бурного развития структур и средств интегральной электроники, а также целого ряда ее схемотехнических решений.

Непосредственное выделение информации о параметрах одного сигнала получило название оцифровка формы сигнала. При этом фиксировалась практически вся информация о параметрах импульса. Более точное наименование данной измерительной процедуры — цифровая регистрация формы импульсных сигналов. Базовые устройства, используемые в решении измерительных задач такого уровня, содержат различные варианты быстрых устройств выборки и хранения (УВХ) [4], а также АЦП прямого кодирования.

Эти электронные средства кодирования более известны как flash (вспышка) analog to digital converter (FADC) [5] с частотой дискретизации в сотни мегагерц и выше. В свою очередь, использование таких электронных средств привело к развитию технологий непосредственной цифровой обработки импульсов. Они получили название цифровых методов обработки сигналов (ЦМОС). Практика их применения показывает, что они постепенно начинают дополнять, а в ряде случаев и вытеснять известные и самые распространенные аналоговые методы обработки сигналов (АМОС).

Развитие и совершенствование электронной техники прямого кодирования параметров сигналов весьма высокого уровня связано со стремительной эволюцией средств вычислительной техники в виде персональных компьютеров (ПК). Ключевым фактором стал рост их разрядности и быстродействия, повышения производительности и вычислительных возможностей.

Другим важным фактором следует считать появление и широкое внедрение в составе ПК различных дополнительных систем внешней памяти достаточно внушительных объемов (флеш-памяти, дискеты, жесткие диски и т. п.). Потенциал вычислительной техники на базе ПК бурно развивался практически без существенного повышения их стоимости. Все это обеспечило уверенное продвижение и эффективное внедрение этих технических средств для различных направлений научных исследований, включая ядерно-физические эксперименты.

Рассмотрим вариант методики измерений на базе ОФС в составе времяпролетного спектрометра быстрых нейтронов (БН), структурная схема которого приведена на рисунке 68. В эксперименте измерялись временные спектры БН в наносекундном диапазоне с одновременной регистрацией формы сигналов фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) с помощью ОФС [6]. Методика измерений была модифицирована и отличается от стандартного ее варианта обратной временной шкалы.

Стартовые сигналы получали с динода, а не с анода ФЭУ, поскольку параметры отобранных сигналов с анода

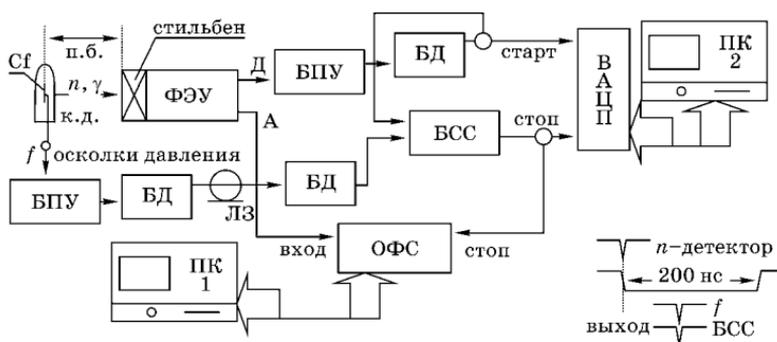


Рис. 68

Структурная схема времяпролетного спектрометра быстрых нейтронов с использованием цифрового метода обработки сигналов:

А — анод ФЭУ; БД — быстрый дискриминатор; БПУ — быстрый предусилитель; БСС — быстрая схема совпадений; ВАЦП — временной аналого-цифровой преобразователь; Д — диод ФЭУ; к. д. — камера деления; ЛЗ — линия задержки; ОФС — оцифровщик формы сигнала; п. б. — пролетная база; ПК — персональный компьютер; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; Cf — калифорний 252;  $n$  — нейтроны;  $\gamma$  — гамма-кванты;  $f$  — деление.

получали с помощью ОФС. Источником излучения нейтронов служила калифорниевая камера деления (к. д.) с изотопом  $^{252}\text{Cf}$ . Нейтроны и  $\gamma$ -кванты спонтанного деления этого изотопа регистрировались сцинтилляционным детектором (стильбен + ФЭУ). Сигнал с диода ФЭУ усиливался быстрым предусилителем (БПУ) и формировался быстрым дискриминатором (БД).

Он служил импульсом СТАРТ для временного аналого-цифрового преобразователя (ВАЦП). Стоповые сигналы для ВАЦП получали с выхода быстрой схемы совпадений (БСС). Ее запускали стартовыми сигналами, выделяя при этом временное окно  $\sim 200$  нс, чтобы пропустить на выход сигналы, которые были связаны с осколками деления. Временные соотношения между последовательностью сигналов, поступающих на вход БСС, приведены в правом нижнем углу рисунка 68.

Сигналы, усиленные в БПУ и сформированные другой схемой БД, получали с камеры деления. Их средняя интенсивность составляла около  $22 \cdot 10^3$  импульсов в секунду. Они задерживались кабельной линией задержки ЛЗ, чтобы попасть во временное окно БСС, и дополнительно

формировались еще одной схемой БД. Все схемы БД были быстрыми дискриминаторами по постоянной части сигнала [7].

Пролетная база (п. б.) спектрометра (около 1,8 м) определялась расстоянием от к. д. до сцинтилляционного детектора. Сигналы с анода ФЭУ непосредственно поступали на вход схемы ОФС. В качестве устройства использовался waveform digitizer DP111 (фирмы Acqiris Digitizer) с полосой пропускания 500 МГц. В диапазоне измерений от 0,1 до 0,4 В, установленном в оцифровщике, амплитуда входных сигналов модифицировалась в семиразрядный код обоих знаков, от -128 до +128.

Амплитуда каждого из входных сигналов превращалась в цифровой аналог, который представлял собой выборку из 1024 значений. Процесс оцифровки, инициируемый входным сигналом, всякий раз прерывался при поступлении на устройство ОФС сигнала СТОП. Эксперимент обслуживался двумя ПК. Один из них (ПК1) был связан с каналом оцифровки сигналов. В его памяти накапливали и хранили результаты преобразования формы сигналов в цифровой код.

Это был цифровой эквивалент формы амплитуд сигналов, снимаемых с анода ФЭУ. Временной канал спектрометра, связанный с ПК2, обслуживал модуль ВАЦП. В памяти этого компьютера накапливали и хранили информацию о времяпролетных спектрах нейтронов и гамма-квантов. Чтобы снизить вклад гамма-квантов в регистрируемые в ходе измерений спектры, сцинтилляционный детектор размещался в свинцовом домике.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных показали весьма высокую эффективность реализованного варианта ЦМОС (цифровые методы обработки сигналов). Было получено хорошее качество разделения нейтронов и гамма-квантов вплоть до энергии 60 кэВ. Ранее при использовании самых эффективных вариантов АМОС эта граница в лучшем случае лежала в пределах 120–150 кэВ.

Восстановление нейтронного спектра и спектра гамма-квантов из результатов оцифровки сигналов показало

их хорошее совпадение. Было установлено и отмечено их вполне корректное соответствие со спектрами, которые регистрировались с помощью модуля ВАЦП. Расхождений практически не наблюдалось вплоть до разрешения, которое определяется по зарегистрированному пику гамма-квантов.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение и суть амплитудного мультифакторного анализа (АМФА).
2. При регистрации каких параметров ядерного излучения можно использовать АМФА?
3. Сущность временного мультифакторного анализа (ВМФА) и варианты его реализации.
4. Многоstopовые временные измерения как разновидность ВМФА, их виды и формы осуществления.
5. Можно ли считать многодетекторные измерения одним из видов АМФА или ВМФА? Если да, то почему?
6. Какое электронное средство необходимо для осуществления многодетекторных измерений?
7. Что такое перекрестные искажения при многодетекторных временных измерениях наносекундного диапазона и за счет чего снижается их вклад в результаты измерений?
8. Цель применения мультискайлерного анализа и суть методики его реализации.
9. Какая информация и в каком виде может быть получена при осуществлении мультискайлерного анализа?
10. В каких параметрах детекторного сигнала заключается информация о ядерном излучении?
11. Какие электронные средства могут вести регистрацию формы импульсных сигналов?

## **ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ И ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Варианты измерений данного направления востребованы как при амплитудном, так и при временном анализе. Практика измерений демонстрирует, что их реализация непосредственно связана с применением особых методов, а также специальных технических средств, используемых при их организации. Следует заметить, что без соответствующего уровня технического обеспечения проведение как долговременных, так и прецизионных измерений будет весьма проблематично, а в ряде случаев просто нереально. На некоторых проблемах и определенных трудностях, возникающих при таких измерениях, сконцентрировано внимание этой главы.

### **13.1. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ТРАКТА**

Снижение параметров измерительного тракта спектрометра (ухудшение их со временем) обусловлено воздействием различных дестабилизирующих факторов. Особенно это характерно при длительных измерениях, когда спектрометрическая установка и ее измерительная система функционируют достаточно продолжительное время в непрерывном режиме работы. Действительно, в соответствии со стандартом ГОСТ 24657-81 «Спектрометры энергий ионизирующих излучений. Типы и основные параметры» регламентируется время непрерывной работы таких структур в пределах от одной рабочей смены (8 ч) и почти до 30 сут.

Действие дестабилизирующих факторов (флуктуации температуры, напряжения питания, изменение чувствительности детекторных устройств и т. д.) обычно проявляется в виде уширения пиков и их сдвигов в регистрируемых спектрах. Нестабильности дают о себе знать в течение определенного периода времени. Если этот промежуток времени меньше продолжительности эксперимента, то вклад нестабильностей можно учесть и скорректировать периодической калибровкой.

В противном случае необходима целенаправленная коррекция параметров измерительного тракта спектрометра, которая осуществляется непосредственно в ходе эксперимента. Эти процедуры реализуются с помощью специальной техники, образующей подсистемы стабилизации параметров тракта. Такими параметрами обычно являются «нуль», т. е. начало шкалы и коэффициент передачи спектрометрического тракта.

Нестабильность первой составляющей (нуля) обусловлена дрейфом исходного уровня различных схем усиления, дискриминации, линейного пропускания, а также аналого-цифрового преобразования и т. д. В составе этих устройств данный параметр, фиксируя начало шкалы измерений, проявляется в виде нестабильности порога измерительной системы. Такие флуктуации можно обнаружить в виде смещения моноэнергетических пиков во всем регистрируемом спектре на одну и ту же величину, т. е. на одинаковое число каналов.

Девиация пиков в пределах регистрируемого диапазона энергий не зависит от их расположения в спектре, т. е. в начале или в его конце. Такой дрейф обычно составляет несколько каналов в ту или иную сторону и будет всегда одинаковым. Нестабильность шкалы измерений (коэффициента передачи тракта) является причиной изменения данного параметра в схемах усиления, пропускания и аналого-цифрового преобразования.

Флуктуации параметров этих устройств непосредственно ведут к смещению пиков, а также ухудшают разрешение в измерительном тракте. Их дрейф в начале и в конце шкалы будет неодинаковым, неравномерным и отли-

чаться во всем диапазоне регистрируемых энергий. Более того, пики в конце спектра будут смещены больше, чем в его начале. Такая ситуация вызвана изменением наклона характеристики преобразования измерительного тракта.

При этом, как показывает практика измерений, возникают условия для неодинакового смещения пиков, а также для разного их уширения в спектре. Наиболее значительные изменения будут происходить на конце зарегистрированного спектра, т. е. в его высокоэнергетической области. Менее заметные, но все же негативные модификации такого плана наблюдаются в начале спектра, т. е. в его низкоэнергетической области.

Нестабильность положения пиков в спектре и ухудшение разрешения в них обусловлены девиацией коэффициента передачи детекторного сигнала в измерительном тракте. Такая ситуация характерна при нестабильности коэффициента преобразования для измерительной системы. Независимо от реализации того или иного вида анализа (амплитудного или временного) цели и задачи по обеспечению высокого уровня параметров измерительного тракта регистрации нередко совпадают. Для каждого вида существуют свои системы стабилизации измерительных трактов.

Системы стабилизации будут в значительной мере различаться даже при использовании единой формы обработки детекторных сигналов, например с помощью амплитудного анализа. Такие отличия определяются видом используемого детекторного устройства. При амплитудном анализе системы стабилизации измерительного тракта их структура и состав для ионизационного детектора (камера, счетчик), сцинтилляционного или полупроводникового детектора будут в существенной мере отличаться.

Различие будет определяться глубиной или степенью охвата измерительного тракта петлей системы стабилизации. Охват считается полным, если в петле системы стабилизации, помимо измерительных модулей тракта, находится еще и само детекторное устройство. Такая ситуация характерна для различных спектрометров энергий на базе амплитудного анализа с использованием сцинтилля-

ционных детекторов. Эти условия необходимо учитывать при выборе системы стабилизации.

Важно заметить, что независимо от состава детекторных устройств, вида используемого анализа (амплитудного или временного) в обобщенной системе стабилизации тракта можно выделить определенную совокупность блоков. В состав такой структуры должен входить источник опорного или реперного сигнала. Если такой источник отсутствует, то коррекцию параметров тракта чаще всего выполняют по естественным моноэнергетическим пикам регистрируемого спектра.

При использовании опорных сигналов в спектре появляются реперные пики, по которым осуществляется автоподстройка параметров измерительной системы. В таком случае в составе системы стабилизации необходим нуль-орган или датчик для выделения сигнала рассогласования по результатам выполненных циклов стабилизации. Кроме того, нужно устройство, фиксирующее результат сравнения, получаемый в циклах стабилизации заданного параметра.

Требуется схема регулировки стабилизируемого параметра (порог и коэффициент преобразования измерительной системы спектрометра). Необходима структура, т. е. электронная схема, инициирующая запуск циклов стабилизации непосредственно в ходе измерений. Данный перечень компонентов далеко не полный. Его состав зависит от варианта системы стабилизации, который должен учитывать специфику измерительного тракта как при амплитудном, так и при временном анализе.

### 13.2.

#### **ПРЕЦИЗИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ**

Практика реализации прецизионных измерений (измерения с высокой точностью) в спектрометрии ионизирующих излучений достаточно обширна и весьма многогранна. Сохраняется тенденция расширения сферы использования таких измерений. Для различных направлений научных

исследований на основе спектрометрии высокого разрешения необходима электронная аппаратура с таким же отменным уровнем измерительных параметров. Одним из примеров использования аппаратурных средств такого плана может служить активационный анализ.

Основные методики его измерений и технические средства их обеспечения результативно используются в разных направлениях химии, биологии, медицины и т. д. Базовые положения этого анализа эффективно применяются во многих сферах производства, науки и техники. Весьма важная роль в прецизионной спектрометрии отводится полупроводниковому детектору (ППД). Параметры регистрации, которые обеспечивает его применение, до сих пор остаются непревзойденными другими детекторными устройствами.

Появление такого детектора, его широкое внедрение в практику экспериментальных ядерно-физических исследований, а также дальнейшее развитие данной техники детектирования обусловили возникновение нового и важного направления в изучении ядерных превращений — спектрометрии высокого энергетического разрешения. По диапазону регистрируемых энергий, по величине разрешения измерения на основе ППД практически сравнялись с высокими параметрами магнитной спектроскопии, а в отдельных случаях даже превзошли ее.

Принципиальное значение имеет весьма высокая стабильность ППД, которая обеспечивает надежность длительных измерений. Данный фактор крайне важен при работе с очень слабыми источниками излучения. Более того, исследования параметров источников излучения такой интенсивности с помощью других методик измерений были бы практически невозможны. Высокое энергетическое разрешение и эффективность регистрации, которые обеспечивают детекторы данного вида, обуславливают аналогичный уровень требований к параметрам всего тракта регистрации спектрометрической установки.

В составе аппаратурных средств, как правило, используются аналого-цифровые преобразователи на 13–15 двоичных разрядов и более. Такая точность стала характер-

ным признаком прецизионной спектрометрии. Столь высокие характеристики ППД обеспечиваются физикой процессов, происходящих в таких детекторах, и связаны со спецификой образования в них пар носителей заряда (электрон и дырка) при облучении.

Энергия, которая расходуется на возникновение одной пары зарядов в ППД, составляет в среднем всего лишь 3 эВ. В ионизационной камере или в пропорциональном счетчике на аналогичный процесс (электрон и положительно заряженный ион) затрачивается почти около 30 эВ, т. е. на порядок больше. В сцинтилляционном детекторе на инициирование световой вспышки необходимо уже 300 эВ и более. Именно данным фактом объясняется высокое энергетическое разрешение, получаемое при регистрации продуктов ядерных превращений с помощью ППД.

Эти детекторные устройства на базе ППД широко применяются в прецизионных измерениях, реализуемых в составе экспериментальных методов ядерной физики. В исследованиях на их основе отмечается значительный рост таких измерений. Практика применения электронной техники данного вида ориентирована на амплитудный анализ высокой точности. В свою очередь, временные прецизионные измерения широко используются в экспериментах по изучению времени жизни возбужденных состояний ядер, а также применяются в изучении дефектов в структуре исследуемых материалов методом позитронной спектроскопии.

Структурные дефекты материалов могут быть вызваны самыми различными факторами. Это может быть просто нагрев или деформация (сжатие, удар и т. п.), а также воздействие различных ионизирующих излучений и т. д. В качестве основных детекторов используются быстрые сцинтилляторы и быстрые фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Точность измерений, которая необходима при таких исследованиях, нередко составляет несколько десятков пикосекунд и менее. Такой же уровень точности должна обеспечить экспериментальная установка в исследованиях времени жизни возбужденных состояний ядер.

Для временного анализа такого уровня, как и в случае долговременных измерений, необходима стабилизация основных параметров тракта. Независимо от варианта прецизионного анализа (амплитудного или временного) необходимо контролировать начальную точку шкалы измерений (ее порог), а также коэффициент преобразования. Воздействие дестабилизирующих факторов вызывает флуктуацию этих параметров, что ведет к возникновению дополнительных погрешностей регистрации.

Наиболее эффективным способом кардинального снижения вклада таких погрешностей в результаты измерений является применение различных систем стабилизации основных параметров. С их помощью выполняется коррекция основных характеристик измерительных систем, что повышает точность в прецизионных измерениях. Корректирующее воздействие можно использовать в одном из измерительных модулей системы, например в аналого-цифровом преобразователе.

В практике измерений известны различные варианты коррекции параметров трактов. Во всех случаях используется информация, которую получают непосредственно в циклах стабилизации. Затем выполняют необходимые изменения того или иного параметра (порога или коэффициента передачи тракта измерения), обеспечивая для них высокий стабильный уровень. Будут представлены разные версии реализации структур стабилизации, а также примеры коррекции параметров трактов, где отмечаются некоторые их особенности.

### 13.3.

#### **СТАБИЛИЗАЦИЯ ТРАКТА ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СПЕКТРОМЕТРА ЭНЕРГИЙ**

Стабилизация измерительного тракта спектрометра энергий на основе ППД имеет одну важную особенность. Она заключается в том, что, в отличие от всех остальных детекторов, ППД исключают из петли регулирования параметров тракта при их стабилизации. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, средняя энергия

образования пары носителей заряда (электрон — дырка) достаточно стабильна ( $\sim 3$  эВ).

Во-вторых, детекторные устройства данного типа эксплуатируются при весьма низкой температуре, которая практически не меняется. Более того, для охлаждения детектора используется специально разработанная структура на основе сосуда Дьюара, наполненного жидким азотом ( $-196^\circ\text{C}$ ). К тому же, применение зарядочувствительного предусилителя практически полностью нивелировало главный источник нестабильности ППД — зависимость и изменение его емкости от величины приложенного напряжения питания.

Использование специальной электронной техники для стабилизации тракта с ППД можно считать еще одной отличительной чертой детекторов данного вида. В практике измерений при решении таких проблем применяются электронные средства целевого назначения, получившие название генераторы точной амплитуды (ГТА). С их помощью размещают в начале и конце регистрируемого спектра (в пределах  $1/8$  и  $7/8$  диапазона измерений) реперные пики.

Такое положение обоих пиков на шкале измерений связывают с порогом и коэффициентом тракта передачи. Такой вариант размещения их в спектре облегчает коррекцию данных параметров измерительного тракта в циклах стабилизации. Для стабилизации тракта можно использовать естественные монолинии, присутствующие в регистрируемом спектре, т. е. пики, уже находящиеся в нем. Они должны иметь примерно такое же положение, которое было отмечено ранее.

Однако в ряде случаев их в спектре может и не быть. Кроме того, они могут иметь недостаточную интенсивность, а их положение в спектре может оказаться крайне неудобным для этих целей и т. п. Тем не менее такие варианты стабилизации измерительного тракта спектрометра все же применяются на практике. Более того, для стабилизации тракта могут быть использованы дополнительные, вспомогательные источники излучения с известным набором монолиний.

Такой вариант стабилизации тракта вполне реален, однако в практике его реализации имеются определенные трудности. Прежде всего они связаны с интенсивностью излучения дополнительного источника излучения. Подобрать и установить оптимальную ее величину от внедренного источника — весьма непростая задача. Статистический характер поступления опорных сигналов также будет затруднять отбор и размежевание их с рабочими сигналами тракта.

Данный аспект тоже следует считать негативным моментом такого варианта стабилизации. Кроме того, всегда необходимо корректировать интенсивности излучения дополнительного источника при изменении направления или задач экспериментальных исследований. В силу этого более рационально и эффективно для этих целей использовать ГТА. Рассмотрим один из вариантов структуры стабилизации измерительного тракта, входящего в состав спектрометра энергий на базе ППД, схема которого приведена на рисунке 69.

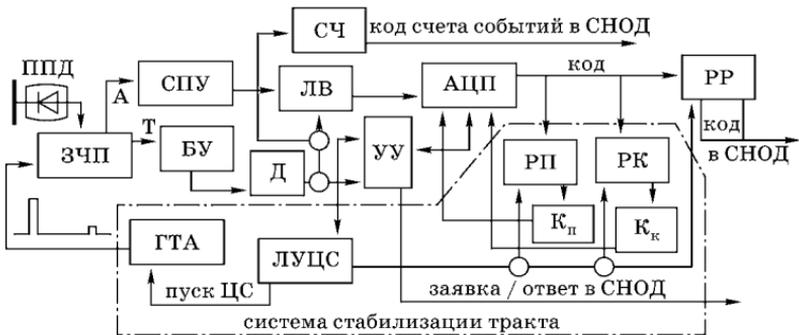


Рис. 69

Структурная схема стабилизации измерительного тракта с ППД:

АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БУ — быстрый усилитель; ГТА — генератор точной амплитуды; Д — дискриминатор; ЗЧП — зарядочувствительный предусилитель;  $K_k$  — коррекция коэффициента передачи;  $K_n$  — коррекция порога; ЛВ — линейные ворота; ЛУЦС — логика управления циклом стабилизации; ППД — полупроводниковый детектор; РК — регистр коэффициента передачи; РП — регистр порога; РР — результат регистрации; СНОД — система накопления и обработки данных; СПУ — спектрометрический усилитель; СЧ — счетчик; УУ — устройство управления.

В общепринятую структуру унифицированного измерительного тракта, реализующую амплитудный анализ, введена система стабилизации его основных параметров. Не рассматривая работу данного тракта в целом, ознакомимся только лишь с функционированием системы стабилизации в его составе. Параметры тракта стабилизируются по двум точкам его амплитудной характеристики (порогу и коэффициенту передачи). Необходимые реперные сигналы получают при помощи ГТА.

Данный генератор по очереди вырабатывает пару импульсов. Их амплитуда, выбранная в соотношении 1:8, передается на контрольный вход ЗЧП. Частота поступления этих импульсов обычно составляет несколько десятков (10–100) Гц и задается логикой управления циклами стабилизации (ЛУЦС). Импульсы, выделенные ГТА, обрабатываются теми же схемами тракта, что сигналы ППД, а цикл стабилизации проходит аналогично процессу измерения.

Результаты циклов стабилизации в виде кода фиксируются в разных структурах — в регистре порога (РП) или в регистре коэффициента (РК) соответственно. Цифровой код каждого из регистров РП и РК трансформируется схемами коррекции  $K_n$  и  $K_k$  в сигналы регулировки соответствующего параметра. Схемой  $K_n$  служит обычный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), аналоговый выход которого по результату цикла его стабилизации изменяет величину порога.

В представленном варианте данный параметр регулируется в схеме аналого-цифрового преобразователя (АЦП), хотя это не единственная версия. Его можно изменять за счет регулировки и в других схемах тракта, например в схеме линейных ворот (ЛВ). Код регистра РК с помощью схемы  $K_k$  управляет величиной коэффициента передачи. Обычно это тоже ЦАП, аналоговый выход которого применяется для регулировки коэффициента передачи тракта, например в схеме АЦП.

Это достаточно просто, если АЦП вилкинсоновского типа, т. е. работающий по принципу амплитудно-временной трансформации. При этом изменяют ток разряда

запоминающего конденсатора схемы зарядно-разрядного устройства в АЦП. Возможен еще другой вариант регулировки коэффициента передачи тракта. Его обычно связывают с автоматическим изменением коэффициента усиления. При этом параметры изменяются и регулируются, но уже в схемах спектрометрического усилителя (СПУ).

Сигналы рассогласования, указывающие на отклонение параметров измерительного тракта, выделяются схемами РП и РК. Наиболее простой алгоритм функционирования системы стабилизации представляет собой выделение знака отклонения параметра (обычно больше или меньше). Структура, работающая по такому принципу, известна как система коррекции параметров релейного типа. Шаг или ступень изменения регулируемого параметра не превышает одной четверти ширины канала измерения или шага квантования в АЦП.

Известен и другой вариант коррекции параметров, где регулирующее воздействие может быть пропорционально величине отклонения контролируемого параметра. При реализации пропорциональной версии система стабилизации значительно быстрее приходит в устойчивое состояние. Как показывает практика, применение таких систем стабилизации параметров спектрометрического тракта обеспечивает необходимую надежность измерений и, что важно, повышает достоверность получаемых экспериментальных данных.

#### 13.4. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ЭНЕРГИЙ И ОСОБЕННОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЕГО ТРАКТА

Более полувека сцинтилляционные детекторы были и остаются наиболее востребованными устройствами регистрации ионизирующих излучений. Детекторы этого профиля применяются как для амплитудного, так и для временного анализа в разных направлениях ядерной физики и смежных ее областях. Они доминируют в спектрометрии быстрых нейтронов по времени пролета. Более того,

другой альтернативы в этой области ядерно-физических исследований пока не существует.

Рассмотрим специфику использования этих детекторов при амплитудном анализе. В состав детекторного устройства входит сцинтиллятор и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Известно, что сцинтиллятор преобразует энергию гамма-квантов или других частиц ядерного излучения в вспышку света, которая затем с помощью ФЭУ трансформируется в электрический сигнал. Интенсивность вспышки света определяются и зависят от величины энергии, которую утрачивает в сцинтилляторе зарегистрированное излучение.

Чем интенсивнее вспышка, тем большее число фотоэлектронов будет выбито из фотокатода ФЭУ. Далее они поступают на его динодную систему. Данная система непосредственно выполняет функцию усиления. Она увеличивает количество электронов, уходящих с каждого динода, по отношению к поступившему их числу. Принято считать, что каждый пришедший электрон выбивает из динода не менее двух электронов.

Данный аспект проявляется в известном процессе их умножения, реализуя таким образом функцию усиления. На параметры выходных сигналов ФЭУ влияют самые различные факторы. Сказываются статистический характер возникновения вспышки и фотоэлектронов, образования вторичных электронов, разброс в ходе их транспортировки по динодной системе и т. д. Проявляется негативное влияние внешних факторов (температура, влажность, магнитные, электрические поля и т. п.).

Это ведет к нестабильности коэффициента усиления, непостоянству светового выхода сцинтиллятора и его спектральной характеристики и т. д. Наиболее значимый вклад в нестабильность параметров спектрометрической установки вносит сам умножитель. В таком случае включение ФЭУ в цепь стабилизации совершенно необходимо.

В системе стабилизации надо иметь опорную линию, создаваемую оптическим источником излучения импульсного типа. Его короткие вспышки света направляются на фотокатод ФЭУ. Вариант системы стабилизации изме-

рительного тракта сцинтилляционного спектрометра приведен на рисунке 70. Представлена одна из версий стабилизации измерительного тракта, корректирующая его параметры по спектральной линии вспомогательного реперного излучения.

Источником такого излучения служит светодиод (СД). С этой целью периодически с частотой несколько десятков герц схема логики управления циклами стабилизации (ЛУЦС) запускает генератор импульсов точной амплитуды (ГИТА). Его схема вырабатывает сигнал, вызывающий свечение светодиода СД, расположенного вблизи фотокатода ФЭУ.

Воздействие светового импульса на фотоэлектронный умножитель вызывает появление в нем фотоэлектронов. Поступая далее на диодную систему ФЭУ, они вызывают появление сигнала на его выходе. Полученный сигнал

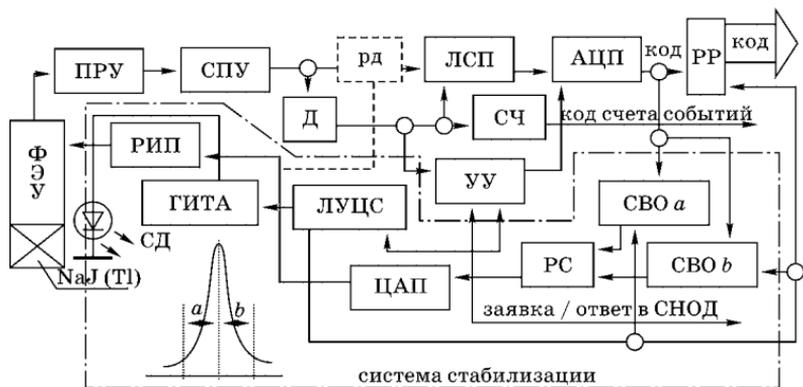


Рис. 70

Структурная схема стабилизации измерительного тракта сцинтилляционного спектрометра с вариантом выбора амплитудных окон на реперном пике вспомогательного излучения:

АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ГИТА — генератор импульсов точной амплитуды; Д — дискриминатор; рд — регулируемый делитель; ЛСП — линейная схема пропускания; ЛУЦС — логика управления циклами стабилизации; ПРУ — предусилитель; РИП — регулируемый источник питания для ФЭУ (высоковольтный); РР — регистр результата; РС — реверсивный счетчик; СВО<sub>a</sub>, СВО<sub>b</sub> — схема выделения окна (*a* и *b* соответственно); СД — светодиод; СНОД — система накопления и обработки данных; СПУ — спектрометрический усилитель; СЧ — счетчик; УУ — устройство управления; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; NaJ(Tl) — органический сцинтиллятор.

передается и поступает в измерительный тракт спектрометра. Перечень его компонентов практически ничем не отличается от состава тракта, который используется при регистрации ядерного излучения.

На выходе регистра результата (РР) код не появится, поскольку регистр заблокирован сигналом со схемы ЛУЦС. В циклах стабилизации код АЦП фиксируется двумя схемами выделения окна (СВО). Оба устройства в виде СВО (*a* и *b*) связаны со своим участком спектра. В зависимости от результата измерений код будет зарегистрирован или в СВО*a*, или в СВО*b*. В реверсивный счетчик (РС) будет добавлена или вычтена единица.

Изменившийся код в схеме РС поступает на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Его аналоговый выход с помощью регулируемого источника питания (РИП) изменяет напряжение на ФЭУ. Известна сильная зависимость его коэффициента усиления от питающего источника высокого напряжения, что особенно важно при спектрометрических измерениях. Обычно эти источники питания обладают высокой стабильностью (лучше 0,01%) и могут регулироваться внешним воздействием в аналоговой или в цифровой форме.

Помимо представленного варианта управления коэффициентом усиления в измерительном тракте, возможен и другой подход к решению этой задачи. Выход ЦАП может воздействовать на другие участки тракта, например, используя для этих целей схему регулируемого делителя (РД), включенного между спектрометрическим усилителем (СПУ) и линейной схемой пропускания (ЛСП), т. е. линейными воротами.

На структурной схеме эта версия регулирования отражена пунктирной линией. В нижнем левом углу этой схемы показано положение окон выбора кода. Воздействуя на светодиод сигналами разной амплитуды, можно менять интенсивность его излучения и размещать реперный пик в любой части спектра. Если автоматически изменять амплитуду сигналов с ГИТА, а это в нем обычно реализуется, то можно осуществлять контроль порога измерительного тракта.

В этом случае необходимо привлечение дополнительных электронных средств. Нужно определиться с местами в тракте и ввести корректное регулирование необходимых его параметров в составе экспериментальной установки. Стабилизация основных параметров спектрометрического тракта в существенной мере повышает достоверность проводимых исследований. Помимо опорных монолиний в спектре, получаемых с помощью импульсных источников света, существуют и другие их варианты.

Следует отметить применение дополнительных радиоактивных препаратов с подходящими интенсивностями и необходимыми моноэнергиями. Для этих же целей можно использовать пики в регистрируемом спектре излучения. В зависимости от варианта получения реперных пиков будет отчасти меняться структура и состав системы стабилизации измерительного тракта сцинтилляционного спектрометра.

### 13.5. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕННОГО СПЕКТРОМЕТРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Нестабильность измерительного тракта временного спектрометра, обладающего прецизионным уровнем параметров, зависит от целой совокупности внутренних и внешних негативных факторов. Один из них связан с изменением формы детекторных сигналов и их флуктуацией, с дрейфом уровней формирования сигналов временной отметки, с нестабильностью изменения масштаба времени и т. д.

Эти факторы, внутренние по сути, негативно проявляются в разных модулях тракта временного спектрометра. Это далеко не полный перечень отрицательных аспектов, возникающих в трактах высокого разрешения. Следует еще отметить деструктивное влияние внешней среды на параметры временных спектрометров высокого разрешения (перепады температуры и напряжения питания, старение элементной базы и т. д.).

Все это, как и практика продолжительных измерений, вызывает неуправляемое изменение характеристик измерительного тракта. Такая ситуация ведет к снижению качества и уровня экспериментальных исследований. Во всех структурах электронной техники данного назначения широко используются методы и схемотехнические решения, которые нивелируют влияние негативных факторов.

Реализуются разнообразные варианты отрицательной обратной связи, методы и техника температурной компенсации, элементы параметрической стабилизации и т. п. Радикальным подходом к решению этих проблем является стабилизация основных параметров спектрометра. Структурная схема одного из вариантов прецизионного временного спектрометра с системой стабилизации тракта приведена на рисунке 71.

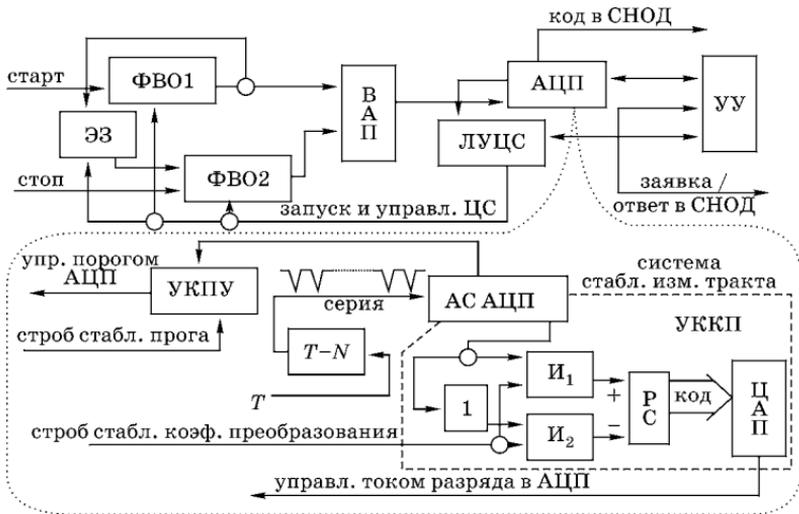


Рис. 71

Структурная схема прецизионного временного спектрометра с системой стабилизации тракта:

АС — адресный счетчик; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ВАП — время-амплитудный преобразователь; И — логический элемент; ЛУЦС — логика управления циклами стабилизации; РС — реверсивный счетчик; СНОД — система накопления и обработки данных; Т — длительность трансформированной амплитуды сигнала ВАП; Т-Н — преобразователь длительности сигнала в число импульсов (т. е. их серию); УККУП — устройство коррекции коэффициента преобразования; УКПУ — устройство коррекции порогового уровня; УУ — устройство управления; ФВО — формирователь временной отметки; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; ЭЗ — элемент задержки; I — инвертор (логический элемент).

Реперные (опорные) интервалы времени обычно формируют, используя отрезки радиочастотного кабеля. Интервалы выделяются с помощью схемы элементов задержки (ЭЗ), которая состоит из двух отрезков кабеля, включенных параллельно друг другу. Подбирая величину их задержки, получают два интервала. Один из них размещается в начале регистрируемого спектра и связан с порогом тракта, другой — в конце спектра и ассоциируется с коэффициентом передачи тракта.

Дополнительная погрешность задержки кабеля при изменении температуры окружающей среды составляет  $\sim 0,01\% / ^\circ\text{C}$ , что позволяет использовать его в качестве эталона. Такая система коррекции параметров охватывает практически все основные структуры измерительного тракта за исключением детекторов. Периодически с частотой несколько десятков герц логика управления циклами стабилизации (ЛУЦС) инициирует и запускает процесс коррекции параметров тракта.

Блокируя схемы формирования временной отметки (ФВО), схема ЛУЦС выделяет сигнал СТАРТ, связанный с ЦС, и подает его на устройство ФВО1. Схема формирователя передает его на вход время-амплитудного преобразователя (ВАП) и схему ЭЗ. Импульс, задержанный на заданную величину одним из элементов ЭЗ и сформированный схемой ФВО2, используется для преобразователя в качестве сигнала СТОП в циклах стабилизации. Длительность, заключенная между сигналами СТАРТ и СТОП, является одним из эталонных интервалов и трансформируется схемой ВАП в амплитуду, реализуя таким образом функцию преобразования «время — амплитуда», т. е.  $(t-A)$ .

Полученная амплитуда с помощью АЦП сначала модифицируется в длительность  $T$ . Затем посредством преобразования  $T-N$  (время — число импульсов) и с помощью адресного счетчика (АС) АЦП выделенная длительность трансформируется в цифровой код. Однако в систему накопления и обработки данных (СНОД) полученный код не передается, поскольку устройство управления (УУ) в этом случае заблокировано схемой ЛУЦС и сигнал ЗАЯВКА В СНОД не вырабатывается.

Если ВАП выдал большую амплитуду, то ее величина будет соответствовать реперному интервалу времени, который связан с коэффициентом передачи тракта. При такой ситуации в системе стабилизации измерительного тракта спектрометра будет функционировать устройство коррекции коэффициента передачи (УККП). Оно подключено к последнему триггеру АС, уровень которого управляет передачей импульса стробирования со схемы ЛУЦС на суммирующий или вычитающий вход реверсивного счетчика (РС). Его код по результатам циклов коррекции изменяется и с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) управляет током разряда накопительного конденсатора в схеме зарядно-разрядного устройства в составе АЦП.

Данный ток либо увеличивают, если триггер АС находится во взведенном состоянии, либо уменьшают, если последний триггер АС остался в исходном состоянии. Аналогично функционирует схема устройства коррекции порогового уровня (УКПУ). Для записи кода в реверсивный счетчик схемы УКПУ по результатам цикла коррекции порога, как правило, используют уровень с одного из триггеров АС (обычно от 4–6) схемы АЦП.

В цикле коррекции порога применяется уже другой ЭЗ меньшей величины. При этом на выходе ВАП выделяется сигнал малой амплитуды, который преобразуется схемой АЦП в код. Его значение в схеме УКПУ реализуют для управления величиной порога в схеме АЦП. Такой вид коррекции коэффициента передачи и порогового уровня в измерительном тракте является системой стабилизации релейного типа.

### 13.6. СТАБИЛИЗАЦИЯ ТРАКТА ПУТЕМ СРАВНЕНИЯ ЕГО ЗАДЕРЖКИ С ЭТАЛОНОМ

Рассмотренные ранее структуры и техника стабилизации измерительных трактов спектрометров ядерного излучения независимо от варианта используемого анализа (амплитудный или временной) являются довольно слож-

ными системами. В их составе наблюдаются достаточно многочисленные связи между разными модулями, а также их частями. Как показывает практика использования таких систем, в их составе необходимы два эталона, наличие которых определяется контролируемыми параметрами тракта (порог и коэффициент передачи).

В системах коррекции этих параметров, как показали представленные варианты их реализации, присутствуют связи с адресным счетчиком АЦП. Кодовая информация этого счетчика применяется в коррекции параметров тракта независимо от вида или варианта используемого анализа. Для прецизионного временного анализа появились системы стабилизации измерительного тракта, где утрачена связь с преобразованием длительности в цифровой код.

Более того, адресный счетчик в составе АЦП, как ключевой компонент унифицированных систем стабилизации, при этом не используется. В основу функционирования такой системы стабилизации положена идея контроля задержки распространения реперного сигнала в измерительном тракте. По результатам циклов стабилизации корректируется, т. е. изменяется и регулируется, величина задержки непосредственно в самом измерительном тракте спектрометра.

При таком варианте стабилизации эталоном сравнения служит величина задержки коаксиального радиочастотного кабеля заданной длины. В качестве каскада сравнения величины эталона и длительности задержки самого тракта, т. е. установления соотношения между ними, используется одна из разновидностей устройств на базе приоритетного дискриминатора. Структурная схема стабилизации стартового канала временного спектрометра приведена на рисунке 72.

Схема устройства приоритетного дискриминатора с высокой точностью (не хуже 20 пс) определяет порядок поступления сигналов по своим входам. При этом выходные уровни устройства однозначно связаны и определяют очередность поступления входных сигналов, т. е. устанавливают вход, по которому сигнал поступил первым. Следовательно, как показала практика измерений, почти с такой

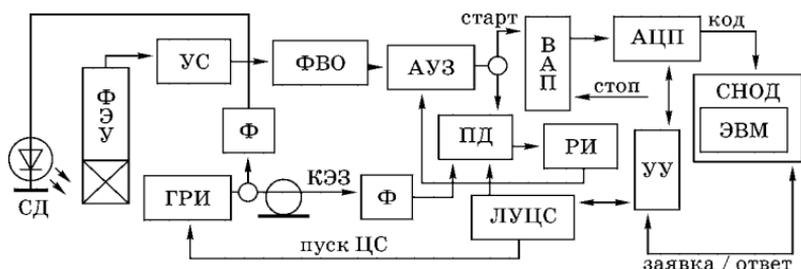


Рис. 72

Структурная схема стабилизации стартового канала  
временного спектрометра:

АУЗ — аналоговая управляемая задержка; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ВАП — время-амплитудный преобразователь; ГРИ — генератор реперных импульсов; КЭЗ — кабель эталонной задержки; ЛУЦС — логика управления циклами стабилизации; ПД — приоритетный дискриминатор; РИ — разностный интегратор; СД — светодиод; СНОД — система накопления и обработки данных; УС — усилитель; УУ — устройство управления; Ф — формирователь; ФВО — формирователь временной отметки; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; ЭВМ — электронно-вычислительная машина.

точностью появилась возможность поддерживать величину задержки распространения сигналов по измерительному тракту временного спектрометра.

Представленная система стабилизации практически полностью охватывает стартовый канал временного спектрометра, включая его сцинтилляционный детектор. Схема логики управления циклами стабилизации (ЛУЦС) периодически с частотой нескольких десятков герц иницирует циклы стабилизации задержки распространения стартового сигнала. Схема ЛУЦС деблокирует схему приоритетного дискриминатора (ПД) и запускает генератор реперных импульсов (ГРИ).

Сигнал этого генератора поджигает светодиод (СД) через формирователь Ф. Его схема формирует импульсы необходимой полярности, длительности и амплитуды для СД, обеспечивая требуемые параметры «поджигающему» импульсу. Возникшая в СД световая вспышка регистрируется сцинтилляционным детектором и выделяется в виде сигнала на выходе ФЭУ. Усиленный схемой УС и сформированный устройством формирования временной отметки (ФВО) сигнал через схему аналоговой управляемой

задержки (АУЗ) поступает на один из входов приоритетной схемы ПД.

На другой вход схемы ПД приходит тот же сигнал с устройства ГРИ, сформированный схемой Ф и задержанный кабельной эталонной задержкой (КЭЗ). Состояние схемы ПД с весьма высокой точностью (лучше 20 пс) указывает на вход, где сигнал поступил раньше. Это состояние фиксируется устройством разностного интенсивметра (РИ), которой используется для коррекции величины задержки в стартовом канале тракта посредством регулировки ее величины в схеме АУЗ.

По зафиксированному результату сравнения величины КЭЗ и задержки стартового канала АУЗ в каждом цикле стабилизации изменяется ее величина. В циклах стабилизации, которые иницируются структурой ЛУЦС через схему устройства управления (УУ), блокируется работа АЦП и не допускается появление сигнала ЗАЯВКА для системы накопления и обработки данных (СНОД). Рассмотренная система коррекции задержки распространения стартового сигнала охватывает все составные части измерительного канала, включая детектор.

Система стабилизации такого вида достаточно эффективна. Ее применение в четырех каналах времяпролетной системы регистрации обеспечивало поддержание средней задержки распространения сигналов в пределах ее изменения не более 50 пс в течение шести месяцев измерений [8]. Подобную систему стабилизации можно использовать и для коррекции параметров стопового канала со своей величиной КЭЗ. Рассмотренную систему коррекции параметров измерительного тракта также следует отнести к известным системам стабилизации релейного типа.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие факторы негативно влияют на параметры спектрометрических установок? Назовите некоторые из них.
2. Как проявляется действие деструктивных факторов при изменении спектров ядерного излучения?
3. Какие параметры измерительного тракта необходимо регулировать при стабилизации?

4. В чем суть прецизионной спектроскопии и какие области науки и техники ее используют?
5. Почему полупроводниковый детектор можно не охватывать петлей стабилизации параметров измерительного тракта?
6. Что такое ГТА и какую функцию он выполняет в измерительном тракте?
7. Виды систем стабилизации и форма регулировки параметров с их помощью.
8. В чем состоит особенность стабилизации тракта сканирующего спектрометра?
9. Что можно использовать в качестве реперных сигналов в системе стабилизации при использовании амплитудного анализа?
10. Какая структура в составе АЦП является датчиком, определяющим результат цикла стабилизации?
11. Что может служить эталоном при стабилизации тракта временного спектрометра наносекундного диапазона?

## **ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ СПЕКТРОМЕТРОВ**

Электронные средства и техника, представленные ниже, применяются при оперативном контроле основных параметров спектрометрических трактов как амплитудного (АА), так и временного анализа (ВА). С их помощью можно вести предварительную настройку данной аппаратуры, определять положение начальной точки шкалы преобразования, устанавливать минимальные и максимальные амплитуды сигналов или диапазон измеряемых интервалов времени и т. д. Рассматриваемая электронная техника служит для получения всех импульсов, необходимых в таких ситуациях. Эти электронные средства можно отнести к категории сервисных модулей обеспечения АА и ВА.

### **14.1. ТЕХНИКА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ВЫСОКОСТАБИЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ**

Как показывает практика измерений, для стабилизации прецизионного спектрометрического тракта на базе амплитудного анализа необходимы реперные или опорные сигналы. Три основные их разновидности могут быть использованы при выполнении таких функций, т. е. служить опорными импульсами. Это могут быть сигналы, принадлежащие моноэнергетическим линиям собственно регистрируемого спектра.

Однако более характерна ситуация, когда таких пиков в регистрируемых спектрах не наблюдается, поскольку их просто не существует. Такие же сигналы можно получить от внешних дополнительных источников излучения. Обычно это специальные источники типа ОСГИ (образцовые спектрометрические гамма-источники). Их своеобразие состоит в том, что все они имеют точно установленные характерные монолинии хорошо известных энергий.

В третьем варианте реперные сигналы могут быть получены с помощью специальных генераторов, которые достаточно часто применяются для этих целей. Оба варианта использования сигналов от радиоактивных источников для стабилизации измерительного тракта нередко сталкиваются с совокупностью проблем. Их энергия в целом ряде случаев не удовлетворяет условиям эксперимента, поскольку ее положение в спектре не совсем удачно и корректно.

Более того, они не всегда могут располагаться в пределах необходимой части спектра, а их интенсивность часто не соответствует реальности, т. е. она либо низкая, либо слишком высокая. Однако система стабилизации приобретает важную функциональную особенность охватывать обратной связью практически весь измерительный тракт, включая детектор. При использовании дополнительных источников излучения нередко возникают трудности, обусловленные необходимостью идентификации поступающих реперных сигналов.

Их трудно отличить от обычных рабочих сигналов детектора, что может привести к сбоям и нарушению функционирования системы стабилизации. При стабилизации тракта с помощью сигналов от специализированных генерирующих устройств таких проблем не возникает, поскольку обеспечивается достаточно четкое разграничение их с детекторными сигналами. Система стабилизации по реперным сигналам, получаемым с этих устройств, отличается предельной гибкостью.

Она достаточно универсальна, удобна в применении и относительно проста в реализации. Однако при всех достоинствах таких структур стабилизации следует обратить

внимание на ее главный недостаток. Основным несовершенством данного варианта стабилизации считают тот факт, что детектор исключен из петли регулирования. При использовании полупроводниковых детекторов такую ситуацию вряд ли можно считать существенным недостатком.

Как уже отмечалось, эти детекторы эксплуатируются при постоянной температуре глубокого охлаждения  $-196^{\circ}\text{C}$  (температура жидкого азота), которая в существенной мере нивелирует проявление негативных факторов. Следовательно, такой детектор без всяких осложнений может быть исключен из петли регулирования, которая обычно охватывается системой стабилизации. Требования к средствам формирования реперных сигналов для стабилизации амплитудного тракта весьма скрупулезно рассмотрены авторами одной из монографий [9].

Прежде всего ими было отмечено не совсем удачное название этой техники, которая именуется как генераторы точной амплитуды. Естественно, что такие электронные структуры следовало бы назвать генераторами сигналов высокостабильной амплитуды (ГВСА), поскольку именно в этом заключается основная функция данных устройств. Структурная схема одного из вариантов такого устройства приведена на рисунке 73.

Основой структуры ГВСА является источник опорного напряжения (ИОН). Его стабильность обеспечивает основополагающие характеристики такого генератора, которые

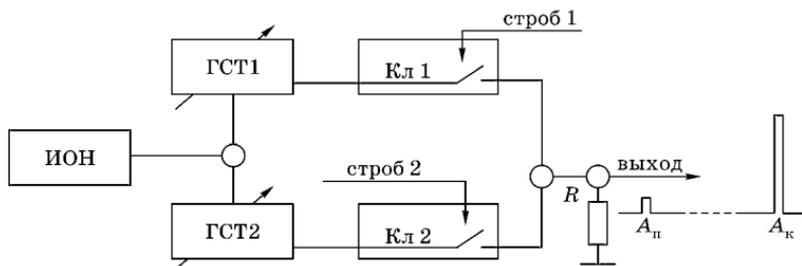


Рис. 73

Структурная схема генератора сигналов высокостабильной амплитуды (ГВСА):

ГСТ — генератор стабильного тока; ИОН — источник опорного напряжения; Кл — ключ.

определяют уровень и качество прецизионных измерений. С другой стороны, нестабильность является одним из основных препятствий в снижении погрешностей спектрометров.

Именно этот параметр создает существенные ограничения для достижения высоких результатов в практике экспериментальных исследований. Для получения высоких параметров выходных сигналов схема ИОН, а иногда и весь генератор термостатируется. При такой ситуации в этих структурах долговременная точность поддержания температуры обычно составляет  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  и выше, на уровне  $45\text{--}55^\circ\text{C}$ .

Схема ИОН используется для функционирования двух регулируемых генераторов стабильного тока ГСТ1 и ГСТ2. С их помощью в течение длительности сигналов «строб1» и «строб2» через соответственно замкнутый ключ Кл1 или Кл2 на резисторе  $R$  выделяются сигналы стабильной амплитуды. Эти сигналы в зависимости от очередности поступления импульсов «строб» будут связаны либо с порогом  $A_n$ , либо с коэффициентом преобразования  $A_k$  спектрометрического тракта.

Изменяя величину тока в схемах ГСТ1 и ГСТ2, можно устанавливать необходимое значение для каждой из амплитуд выходного сигнала. Таким образом осуществляется размещение реперных сигналов в начале и конце стабилизируемого амплитудного спектра. Характерно, что, выполняя свои функции, выделяемая последовательность таких сигналов в спектре не регистрируется.

## 14.2. ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНОСТИ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ТРАКТА

Наряду с генераторами высокостабильной амплитуды к категории специальной электронной техники, применяемой для контроля параметров спектрометрического тракта, относятся генераторы белого спектра (ГБС). Это особый достаточно специфический вид электронной техники. С их помощью получают равномерное распределение

амплитуд сигналов, которое получило название белого спектра.

С его помощью контролируют и определяют величину интегральной (ИНЛ) и дифференциальной нелинейностей (ДНЛ) спектрометрического тракта. Первый вид нелинейности ИНЛ служит критерием отклонения измерительной характеристики спектрометра от аппроксимирующей прямой. Ее величина для прецизионных трактов обычно лучше 0,02%. В свою очередь, величина ИНЛ для унифицированных трактов регистрации составляет, как правило, около 0,5%.

Критерием гомогенности или равномерности каналов является ДНЛ. Она характеризует относительное отклонение их ширины от среднего значения. По величине данный параметр несколько больше ИНЛ, и у лучших измерительных трактов составляет  $\pm 0,5\%$ . Типовое значение  $\text{ДНЛ} \leq 1,5\%$  для обычных трактов измерения. Важно отметить, что электронные средства, с помощью которых измеряются данные параметры, а это различные структуры ГБС, должны иметь ИНЛ и ДНЛ по крайней мере в 3 раза лучше, чем в прецизионном тракте измерений.

Рассмотрим схему генератора белого спектра. Один из его вариантов представлен на рисунке 74. Основной его частью является генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), состоящий из управляемого интегратора (УИ) на основе операционного усилителя (ОУ) со схемами коммутации S1 и S2. пилообразное напряжение со схемы УИ через буферный каскад (БК) и схему линейного пропускания (СЛП) передается на выход ГБС.

В исходном состоянии каскад СЛП закрыт и сигналы на его выходе отсутствуют. Следующие с частотой от 0,1 до 30 кГц импульсы задающего генератора (ЗГ) открывают каскад СЛП, на выход которого проходит сигнал со схемы ГЛИН. Длительность выходных сигналов ГБС задается и регулируется с помощью схемы одновибратора (ОДН). На выходе СЛП выделяется последовательность положительных импульсов.

Естественно, что их амплитуда будет пропорциональна в каждый момент времени напряжению на выходе схе-

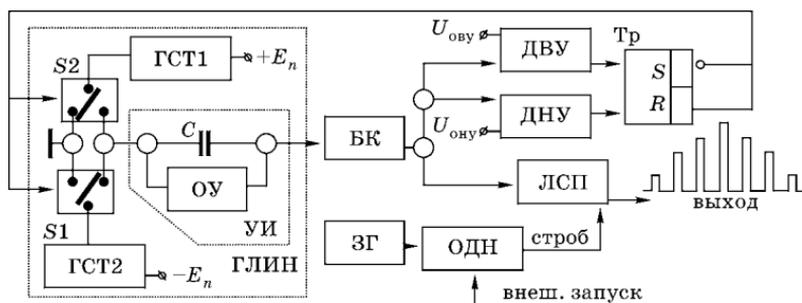


Рис. 74

Структурная схема генератора белого спектра:

БК — буферный каскад; ГЛИН — генератор линейно изменяющегося напряжения; ГСТ — генератор стабильного тока; ДВУ — дискриминатор верхнего уровня; ДНУ — дискриминатор нижнего уровня; ЗГ — задающий генератор; ЛСП — линейная схема пропускания; ОДН — одновибратор; ОУ — операционный усилитель; Тр — триггер; УИ — управляемый интегратор; С — конденсатор; S — переключатель;  $U_{\text{ову}}$  — опорное напряжение верхнего уровня;  $U_{\text{ону}}$  — опорное напряжение нижнего уровня.

мы УИ. Сигнал с БК подается на схемы дискриминаторов верхнего и нижнего уровней (ДВУ) и (ДНУ) соответственно. Отслеживая превышение пилообразным напряжением этих уровней, выходные сигналы дискриминаторов всякий раз меняют состояние RS-триггера. Его уровни, управляя переключателями S1 и S2, меняют направление интегрирования емкости С.

Заряд и разряд этого конденсатора от разнополярных генераторов стабильного тока, т. е. схем ГСТ1 и ГСТ2, является выходным пилообразным напряжением ГЛИН. Схема ОДН, которая управляет ЛСП, может запускаться внешними сигналами. Применение аттенюаторов создает условия для введения сигналов ГВС практически в любую структуру амплитудного спектрометрического тракта. Это позволяет оценить параметры того или иного его участка, связанного с одним из видов обработки сигналов, т. е. усилением, дискриминацией или аналого-цифровым преобразованием.

Известны другие варианты контрольных генераторов такого назначения [10]. В ряде устройств этого вида нередко пытаются совместить некоторые измерительные функции, что является характерной чертой для испыта-

тельного оборудования такой направленности. Этим оборудованием могут быть различные универсальные устройства, бифункциональные по назначению, способные совместно решать измерительные задачи, которые свойственны лишь блокам ГВСА и ГВС в отдельности.

Одним из направлений развития электронной техники, обеспечивающей реализацию испытательных функций, считается их совмещение в одном модуле. Хотя стоимость этих универсальных средств диагностики параметров спектрометрического тракта имеет тенденцию заметного роста, но получаемые преимущества весьма существенны. Реальностью стала весьма удобная разновидность технических средств для контроля основных параметров амплитудных спектрометрических трактов.

### 14.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ В РЕШЕНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Для детекторных устройств ядерного излучения характерны нерегулярные импульсные последовательности сигналов. В большинстве случаев для их моделирования используются специальные генераторы случайных сигналов. С их помощью выделяют нерегулярные во времени сигналы, которые широко используются при тестировании средств измерения счетной информации. В составе этой техники отметим декадные и двоичные счетчики, различные интенсиметры и разнообразные пересчетные устройства.

Электронные средства со спонтанным характером выделения сигналов применяются при временном анализе. Они имитируют сигналы СТАРТ или СТОП в измерениях интервалов времени. Это могут быть импульсные последовательности сигналов со случайным сигналом СТАРТ и периодическими стоповыми сигналами. Период следования определяет диапазон измеряемых интервалов времени. Нередко используют обратный вариант подачи этих сигналов. Возможно одновременное использование случайных сигналов для входов СТАРТ и СТОП измерителей интервалов времени.

Эти генераторы в перечне специальных электронных средств относятся к разновидности тестового оборудования. С их помощью контролируют, проверяют и диагностируют параметры измерительных систем или их составных частей. Это необходимо при восстановлении работоспособности электронного оборудования и его отладке. Рассмотрим вариант схемы устройства генерации сигналов случайной последовательности, представленной на рисунке 75.

Источником шума (ИШ) служит стабилитрон (КС215Ж), сигналы которого через усилительный каскад (Ус) поступают на два пороговых элемента ПЭ1 и ПЭ2. Им служат компараторы типа К597СА1, придающие своеобразие техническому решению, состоящему из двух взаимосвязанных структур формирования сигналов случайной последовательности. Схема ПЭ1 через формирователь Ф работает на два выходных канала, что расширяет функциональные возможности устройства.

С этой же целью один из них (канал 2) сделан управляемым. Для выполнения этой функции служит логический элемент И1, который работает при воздействии уровней ЭСЛ (интегральных схем эмиттерно-связанной логики). Схема ПЭ2 через каскад Ф связана с третьим выходом устройства (канал 3). Он тоже выполнен управляемым за счет

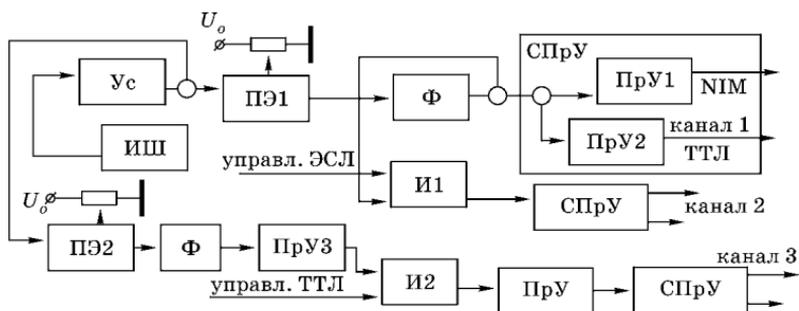


Рис. 75

Структурная схема устройства генерации сигналов случайной последовательности:

И — логический элемент; ИШ — источник шума; ПрУ — преобразователь уровня [ПрУ1 (ЭСЛ-NIM), ПрУ2 (ЭСЛ-ТТЛ), ПрУ3 (ТТЛ-ЭСЛ)]; ПЭ — пороговый элемент; СПрУ — специализированный преобразователь уровней; Ус — усилитель; Ф — формирователь.

использования схемы И2. Для его функционирования нужны уровни ТТЛ (интегральных схем транзисторно-транзисторной логики).

Режимы работы обоих каналов обеспечиваются внешними сигналами. Возможность управления работой генератора логическими уровнями разных интегральных схем расширяет сферу его целевого применения. На выходе всех каналов генератора включены специализированные преобразователи уровней (СПРУ), выделяющие сигналы в уровнях NIM и ТТЛ. Первые из них нужны для временных измерений в наносекундном диапазоне, а вторые обслуживают различные счетные устройства.

Наряду с обычными устройствами традиционного назначения существуют более сложные их модификации. Если необходима долговременная стабильность средней частоты следования импульсов случайной последовательности, то применяют дополнительные меры по коррекции частоты в этих структурах. Устройство генерации импульсов случайно распределенных во времени [11] представлено на рисунке 76. Цифры на рисунке (8 и 9) обозначают число разрядов используемых двоичных счетчиков. В одном случае с реверсивного счетчика РС берется 8 разрядов. В другом случае с двоичного счетчика СЧ2 используется 9 разрядов.

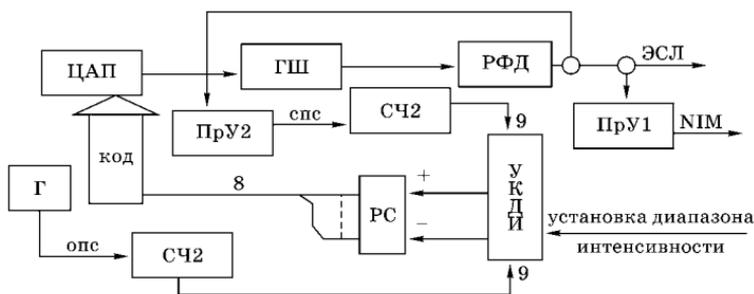


Рис. 76

Генератор импульсов случайно распределенных во времени:

Г — генератор; ГШ — генератор шума; опс — опорная последовательность сигналов; ПрУ — преобразователь уровня [ПрУ1 (ЭСЛ-NIM), ПрУ2 (ЭСЛ-ТТЛ)]; РС — реверсивный счетчик; РФД — регулируемый формирователь длительности; спс — случайная последовательность сигналов; СЧ2 — двоичный счетчик; УКДИ — устройство коммутации диапазона интенсивности; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь.

В составе устройства, помимо генератора шума ГШ, используется генератор Г опорной последовательности сигналов, т. е. генератор стабильной частоты. Сигналы обоих генераторов поступают на двоичные счетчики СЧ2 одинаковой разрядности. Их кодовая последовательность через схему устройства коммутации диапазона интенсивности (УКДИ) сравнивается на реверсивном счетчике (РС). Его код управляет работой цифроаналогового преобразователя ЦАП (К572ПА1), с помощью которого регулируют величину тока, протекающего через источник шума (диод 1Г401Б), подстраивая таким образом среднюю частоту генерации шумовых сигналов.

Таким образом, обеспечивается стабильность средней частоты случайных сигналов, длительность которых устанавливается схемой регулируемого формирователя (РФД). Эти сигналы выделяются на выходе генератора в уровнях ЭСЛ и NIM. Следует заметить, что почти случайную последовательность импульсов можно получить цифровым способом [12]. Основой таких устройств, формирующих псевдослучайную последовательность, служат генератор тактовых импульсов, сдвиговый регистр, сумматор по модулю 2 и выходной формирователь.

#### 14.4. СТАБИЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ В РЕВИЗИИ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ

Реперные интервалы времени широко используются при контроле параметров спектрометра, а также для проверки функционирования его составных частей. Стабильность работы измерительного тракта временного спектрометра необходима для получения надежных экспериментальных результатов. В таких измерениях важно регулярно контролировать работу спектрометра, измерительного тракта и его электронных средств, что особенно важно при высоком разрешении экспериментальной установки.

Было отмечено, что для выделения опорных интервалов времени используются линии задержки в виде отрезков

коаксиального радиочастотного кабеля. Длительность интервала, выделяемого с их помощью, измеряется временем распространения сигнала в этих отрезках ( $\sim 5$  нс/м). Массогабаритные показатели таких задержек являются основным фактором, который в значительной мере ограничивает сферу их использования. Тем не менее эти структуры находят свое применение.

Известны и другие устройства, которые используются для получения опорных интервалов времени. Основой таких структур служат высокостабильные генераторы, дающие возможность изменять длительность и частоту выделяемых импульсных последовательностей. Приращением их величины служит период следования импульсов генератора. Их частота стабилизируется кварцевым резонатором. Получаемая длительность интервала времени пропорциональна целому числу периодов импульсов генератора. Структурная схема одного из устройств формирования интервалов времени представлена на рисунке 77.

Выходная длительность интервала изменяется дискретно и фиксируется сигналами, выделяемыми на двух его выходах (вых. 1 и вых. 2). Период следования импульсов

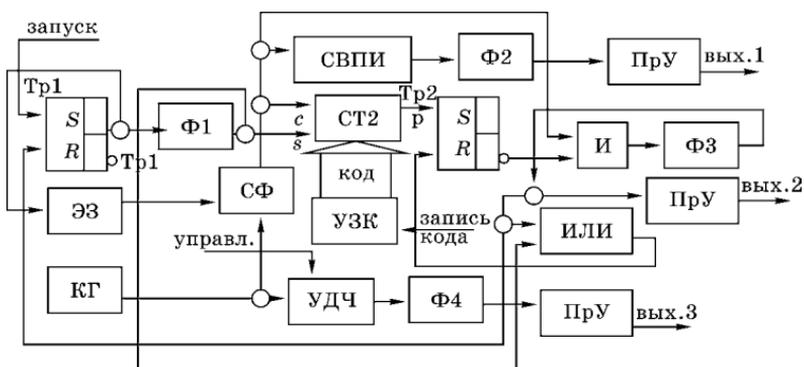


Рис. 77

Структурная схема устройства формирования интервалов времени:

И, ИЛИ — логические элементы; КГ — кварцевый генератор; ПрУ — преобразователь уровня (ЭСЛ-NIM); СВПИ — схема выделения первого импульса; СТ2 — двоичный счетчик; СФ — схема фазировки; Тр — триггер; УДЧ — управляемый делитель частоты; УЗК — устройство задания кода; Ф — формирователь; ЭЗ — элемент задержки.

кварцевого генератора КГ служит мерой для изменения величины длительности выходного интервала в устройстве. Диапазон ее перестройки, т. е. модификации ее величины, определяется емкостью двоичного счетчика СТ2.

Данный параметр может устанавливаться в пределах от  $T_0$  до  $mT_0$ , где  $T_0$  — период следования импульсов в схеме КГ, а  $m = 2^n$ , где  $n$  — число разрядов счетчика СТ2. Устройство задания кода (УЗК) управляет величиной выделяемого интервала. С помощью этого устройства в пределах объема схемы СТ2 устанавливают величину интервала в виде фиксированной длительности. Интервал появляется при запуске триггера Тр1. Из его перепада формирователь Ф1 выделяет сигнал занесения кода из схемы УЗК в счетчик СТ2.

Этот же сигнал через логический элемент ИЛИ подтверждает состояние триггера Тр2. Величина записанного кода определяет длительность выходного интервала времени. Немного задержанный элементом задержки (ЭЗ) перепад триггера фазирован устройством фазировки СФ с импульсами схемы КГ. Длительность, выделяемая триггером Тр1, замещается импульсами КГ, которые поступают на счетчик СТ2, а также на схему выделения первого импульса (СВПИ).

Ее сигнал через формирователь Ф2 и схему преобразования уровней (ПрУ) типа ЭСЛ-NIM выделяется на первом выходе устройства (вых. 1). Сигнал переполнения счетчика СТ2 взводит триггер Тр2, уровень которого деблокирует схему пропускания И. На ее выходе выделяется импульс КГ, который нормируется схемой Ф3. Этот сигнал, пройдя схему ПрУ, выделяется на другом выходе устройства (вых. 2).

Сигнал схемы Ф3 возвращает структуру устройства в исходное состояние, сбрасывая оба триггера Тр1 и Тр2. Схемы Ф4, ПрУ и управляемого делителя частоты (УДЧ) расширяют сферу применения устройства. С их помощью формируют еще на одном выходе (вых. 3) сигналы дискретно изменяемой частоты. Они могут использоваться в качестве импульсов СТОП при измерениях коротких интервалов времени.

### 14.5. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВРЕМЕННОМ АНАЛИЗЕ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

При временном анализе наряду с определением дифференциальной (ДНЛ) и интегральной нелинейности (ИНЛ) необходима градуировка временной шкалы (определение ширины канала). Для градуировки амплитудного тракта применяют образцовые спектрометрические источники гамма-излучения (ОСИ). С их помощью решить такие задачи временного анализа невозможно, поскольку необходимы источники сигналов специальных импульсных последовательностей.

Для определения ДНЛ во временных трактах применяются источники сигналов, обеспечивающие равновероятное распределение интервалов времени. Их можно получить с помощью двух генераторов со случайным характером появления выходных импульсов. Источником сигналов в таких генераторах шума (ГШ) могут служить шумовые диоды, операционные усилители, стабилитроны, транзисторы и т. д.

В состав ГШ обычно входят источник шумового сигнала, масштабный усилитель, фильтр нижних частот и интегральный дискриминатор. Диапазон изменения средней частоты ГШ лежит в пределах от 20 Гц до 200 кГц. Импульсы формируют и подают на измеритель интервалов времени (ИВИ) в виде сигналов СТАРТ. При измерении ДНЛ сигналами СТОП служат импульсы, период повторения которых несколько меньше диапазона измерения в модуле ИВИ. Контроль параметров тракта можно осуществить, используя унифицированное устройство, схема которого приведена на рисунке 78.

В качестве источников сигналов используются генераторы импульсов с частотой следования 50, 100 МГц и выше при высокой ее стабильности. Этим условиям лучше всего удовлетворяют кварцевые генераторы (КГ), частота которых стабилизируется кварцевым резонатором. С их помощью регистрируется временной спектр в виде

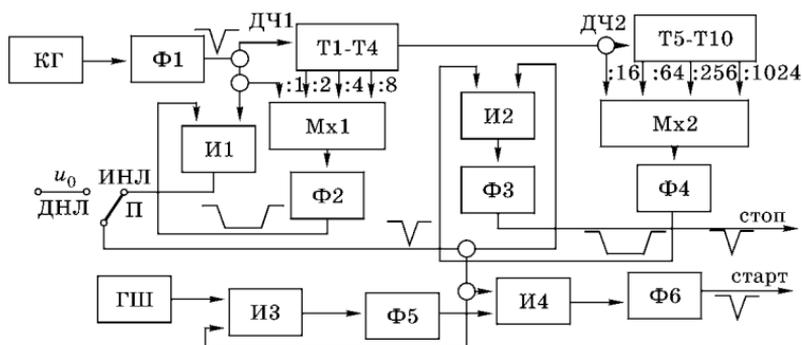


Рис. 78

Структурная схема унифицированного устройства для контроля линейности временного спектрометра наносекундного диапазона:

ГШ — генератор шума; ДНЛ — дифференциальная нелинейность; ДЧ — делитель частоты; И — логический элемент; ИНЛ — интегральная нелинейность; КГ — кварцевый генератор; Мх — мультиплексор; П — переключатель; Т — триггер; Ф — формирователь.

линий, отстоящих друг от друга на величину  $T$ . Такая форма регистрируемых интервалов времени получила название градуировочный линейчатый спектр, а параметр  $T$  — шаг градуировки. Величина  $T$  является периодом следования импульсов КГ.

Такой спектр, помимо решения вопроса о ширине канала в системе регистрации, можно использовать в оперативном контроле ее параметров. По флуктуациям положения пиков в спектре можно судить о стабильности порога или коэффициента преобразования временного измерительного тракта либо об одновременной их нестабильности. Если все пики в спектре смещаются в одну сторону и на одну и ту же величину, то это верный признак нестабильности порога в измерительной системе.

Если дрейф пиков в конце спектра больше, чем в его начале, то нестабилен коэффициент преобразования. Хотя эта ситуация может означать одновременную нестабильность обоих параметров. Устройство, представленное на рисунке 78, можно использовать при градуировке шкалы временного спектрометра, а также для измерения в нем ИНЛ и ДНЛ. В его составе находятся два канала: один из

них выделяет сигналы СТОП, а другой формирует сигналы СТАРТ.

В стоповом канале используются схемы кварцевого генератора КГ и формирователя Ф1 коротких импульсов. Здесь же применяются два делителя частоты (ДЧ1) и (ДЧ2) на счетных триггерах (Т1–Т4) и (Т5–Т10). Первый из них задает и устанавливает шаг градуировки. С помощью мультиплексора Мх1 и первой схемы ДЧ1 можно выбрать кратность шага в пределах от  $T$  до  $8T$ . Второй делитель частоты ДЧ2 вместе со схемой Мх2 позволяет задавать диапазон регистрируемых интервалов времени в пределах от  $16T$  до  $1024T$ .

Если использовать КГ с частотой 100 МГц, то диапазон изменения интервалов будет от 160 до 10 240 нс. С такими же периодами на выходе схемы Ф3 будут появляться импульсы СТОП. Схемы логических элементов И1 и И2 вместе с Ф2 и Ф4 отбирают сигналы в соответствующие моменты времени, которые определяются схемами ДЧ1 и ДЧ2 совместно со схемами Мх1 и Мх2. Сигналы СТАРТ получают в канале их формирования и выделяют на выходе схемы Ф6.

Они связаны с генератором шума ГШ и с помощью схем логического элемента И3 и формирователя Ф5 стробируют логический элемент И4, поступая на выход Ф6. Режим измерения ДНЛ выбирается переключателем П, устанавливающим разрешающий уровень  $U_0$  на соответствующие логические элементы устройства. При этом утрачивается связь стартового канала со схемой КГ. На выходе Ф3 выделяется периодическая последовательность импульсов схемы КГ, период следования которых задается схемами ДЧ2 и Мх2.

В таком режиме работы устройства они являются сигналами СТОП. На выходе схемы Ф6 выделяется случайная нерегулярная последовательность сигналов, связанная со схемой ГШ. Они служат сигналами СТАРТ в этом режиме измерений. Данное унифицированное устройство позволяет оперативно контролировать параметры измерительных трактов временных спектрометров наносекундного диапазона.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Варианты выделения опорных сигналов для стабилизации параметров амплитудного тракта.
2. Почему полупроводниковый детектор (ППД) можно не включать в состав системы стабилизации измерительного тракта?
3. Какие сигналы получают с помощью генератора высокостабильной амплитуды (ГВСА) и для чего их используют?
4. Какие параметры амплитудного тракта можно контролировать сигналами ГВСА?
5. Каким образом сигналы ГВСА вводятся в измерительный тракт спектрометра с ППД?
6. Для какой цели применяется генератор белого спектра ГБС при амплитудном анализе?
7. Какая структура в составе ГБС служит его основой и на каких компонентах она обычно строится?
8. Какие сигналы получают с помощью ГБС?
9. Какие задачи призваны решать опорные интервалы времени (ОИВ) при временном анализе?
10. Назовите структуры, которые могут использоваться для получения ОИВ в наносекундном диапазоне.
11. Последовательности импульсных сигналов, которые используются при контроле параметров временного тракта.
12. Различаются ли входные сигналы измерителя интервалов времени при контроле его дифференциальной нелинейности?

## **СТАНДАРТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Создание и использование автоматизированных информационно-измерительных систем в ядерной физике тесно связано с применением той или иной разновидности модульной структуры [12], [13]. Каждый модуль в их составе выполняет предназначенную ему функцию. Оптимальное сочетание основных измерительных функций и комплексная их реализация определяются тем, что система состоит из совокупности модулей одного стандарта. Базовые положения основных стандартов ядерной электроники (NIM, САМАС), которые будут представлены далее, демонстрируют идеологию и ключевые аспекты их реализации в технике измерений параметров ядерных превращений.

### **15.1. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ И СТАНДАРТИЗАЦИИ В ЯДЕРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Для решения всего многообразия экспериментальных ядерно-физических задач необходимы электронные средства различного назначения, способные реализовать весьма масштабный перечень функций (усиление, выделение, формирование, отбор, счет, кодирование и т. п.). Состав

этой техники определяется тематикой исследований, а она достаточно многогранна, поэтому требуются как обычные электронные измерительные средства, так и уникальные их варианты.

Повседневная практика организации и проведения измерений привела к необходимости стандартизации электронной аппаратуры такого назначения. Эти электронные средства, получившие название ядерная радиоэлектроника, существенно раньше, чем в других областях науки и техники, стали создаваться на основе модульного принципа их построения. Каждый электронный модуль выполняет определенную измерительную функцию, имеет установленные габариты и комплектуется соответствующими деталями и компонентами.

Это позволяет из совокупности таких модулей создавать и собирать различные по сложности измерительные системы. Все это осуществлялось с максимальным учетом как специфики эксперимента, так и объекта исследований [13]. Такие варианты комплектации измерительных систем позволяли достаточно оперативно их модифицировать при изменении, как в направлениях экспериментальных исследований, так и целей в решении измерительных задач.

Специалисты-физики приняли модульные структуры в виде набора кубиков, дающего им возможность создавать достаточно сложные системы. При этом не требовались специальные знания об устройстве самих модулей. Их структура отождествлялась с моделью «черного ящика», выделяющего сигналы в зависимости от соотношений и комбинаций их на входе, и выполнением модулем измерительных функций.

Параметры входных и выходных сигналов для каждого модуля регламентировались стандартом, что упрощало решение задач по линейной и нелинейной обработке детекторных сигналов, а также и их регистрацию. Потребности экспериментальных методов ядерной физики предопределили одно из перспективных направлений развития вычислительной техники, которое в последствии получило название мини- и микро-ЭВМ. Раньше среди средств

вычислительной техники в основном преобладали универсальные ЭВМ.

Они имели достаточно высокую стоимость, обладали заметной избыточностью для непосредственного использования их в эксперименте. Более того, такая «техника» требовала весьма внушительного штата специалистов для ее обслуживания. Тем не менее их функциональные возможности все же были ограничены. Не было возможности организовать отдельные режимы работы, поскольку отсутствовал прямой доступ к памяти, не была развита система прерываний и т. д.

Кроме того, «вычислительные» возможности данной техники вряд ли можно было использовать в полном объеме. Характерно, что в ее состав входили вспомогательные, но весьма дорогие средства (перфораторы, считывающие устройства, широкоформатная цифропечать и т. п.), которые вряд ли нужны для исследований. Эти факторы, совместно с острой необходимостью и заведомой целесообразностью применения ЭВМ в процессах обработки экспериментальных данных, обусловили появление мини-ЭВМ. Одной из первых ЭВМ такого уровня стала PDP-8.

Магистральный путь развития автоматизации научных исследований проходил через развертывание и организацию измерительных центров. Они создавались на базе ускорителей, исследовательских ядерных реакторов и других крупных физических установок. Последние из них обеспечивали исследования в области элементарных частиц и физики высоких энергий, а также в изучении процессов термоядерного синтеза.

Создавались различные физические и реакторные измерительные центры (ФИЦ и РИЦ). Их основой служили универсальные ЭВМ или их процессоры. Такие структуры дополняли значительными объемами оперативной и долговременной памяти. Для долговременного хранения данных использовались жесткие диски и магнитные ленты. В состав мощных ИЦ входили несколько ЭВМ, которые объединялись в иерархические структуры разного назначения и вида.

Средствами коллективного пользования ИЦ были разнообразные устройства ввода-вывода (многомерные графические дисплеи, цифропечатающие, перфорирующие и считывающие устройства, графопостроители и т. д.), обслуживающие все ЭВМ. При такой организации ИЦ стали крупными системами сбора, накопления, обработки и представления экспериментальных данных в заданной форме.

Обязательным их атрибутом были измерительные станции или измерительные места (ИМ), число которых доходило до нескольких десятков. Размещенные за мощной биологической защитой, они располагались вблизи объектов исследований. Такие станции относились к системам переднего плана, с помощью которых осуществляется сбор, сортировка и обработка сигналов детекторных устройств.

В их состав входили усилители, формирователи, дискриминаторы, кодировщики номера детектора, разнообразные устройства как двоичного, так и десятичного счета, а также различные таймеры, АЦП, измерители интервалов времени и т. п. Из них можно организовать разнообразные варианты измерительных систем для решения любых исследовательских задач в ядерной физике. Экспериментальные исследования, которые реализуют многочисленные методики измерений, определяют состав электронных средств ИМ.

Наиболее масштабно использовались различные варианты амплитудного или временного анализа. При комплексных исследованиях и более сложных измерениях применяется мультифакторный анализ той или иной направленности. Важно отметить, что дальнейшая эволюция и совершенствование интегральной элементной базы в виде многозарядных суммирующих и арифметическо-логических устройств, разнообразных регистров, а также микропроцессорных средств и т. д. превратили ЭВМ (с ее достаточно приемлемой стоимостью) в необходимый атрибут измерительных систем.

Начался процесс децентрализации электронного оборудования сбора и обработки экспериментальных данных.

В состав унифицированного ИМ начали включать мини-ЭВМ, которые становились их основой. Бурное развитие микропроцессорной техники явилось решающим фактором в становлении и широком распространении персональных компьютеров (ПК). Заменяв мини-ЭВМ, они практически завершили процесс децентрализации электронных средств в экспериментальных исследованиях.

Целая совокупность измерительных средств в виде различных дополнительных плат и интерфейсных структур вошли в ПК. Это привело к появлению компактных измерительных систем с весьма размытыми границами между измерительной техникой и вычислительными средствами. Некоторые разновидности данной техники, в состав которых были внедрены микропроцессорные средства, перешли в разряд электронных структур, получивших название интеллектуальных средств измерения.

## 15.2. МОДУЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ЯДЕРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ. СТАНДАРТ NIM

Ядерно-физические исследования в середине XX столетия привели к интенсивному развитию как электронных методов ядерной физики, так и их электронных средств. Были освоены нано- и субнаносекундные диапазоны в импульсной технике, началось использование ЭВМ в практике экспериментальных исследований, появились новые решения по организации измерительных систем и т. д. Специалисты по ядерно-физическим исследованиям раньше, чем их коллеги из других областей науки и техники, пришли к мысли, что измерительная система должна создаваться из стандартных электронных модулей.

Эта идея позволила физикам без детальных знаний электроники создавать сложные измерительные системы. Более того, изменение направления исследований не вызывало необходимость разработки и создания новых электронных средств, поскольку изменялись лишь комплектация и компоновка измерительных модулей в системе,

а также связь между ними. Впервые все эти модули можно было успешно состыковать между собой независимо от страны или фирмы-производителя данной техники.

Одним из первых стандартов для электронных средств ядерной физики стал стандарт NIM (Nuclear Instrument Module). Он был предложен в 1966 г. одним из специализированных комитетов Комиссии по атомной энергии (АЕС) США в виде одного из докладов АЕС TID-20893 «STANDART NIM» на модульную систему аппаратуры для ядерно-физических исследований. Не затрагивая пока основные положения стандарта NIM, определим сферу его действия на примере организации амплитудного анализа, используя типовые измерительные модули этого стандарта. Структура измерительной системы приведена на рисунке 79.

Детектор Д, взаимодействуя с источником ионизирующего излучения ИИИ, выделяет и передает сигналы на предусилитель ПРУ. Дальнейшая линейная обработка сигналов (оптимальное формирование и увеличение их параметров) осуществляется спектрометрическим усилителем СПУ. С помощью резистора  $R$  выбирают величину порога в интегральном дискриминаторе ИД. Его сигналы, управляя модулем линейных ворот ЛВ, исключают из измерительного тракта шумовые сигналы, поскольку уста-

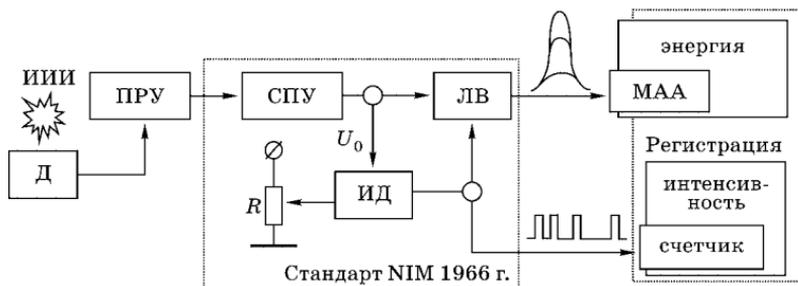


Рис. 79

Структура измерительной системы для реализации амплитудного анализа на основе стандарта NIM:

Д — детектор; ИД — интегральный дискриминатор; ИИИ — источник ионизирующего излучения; ЛВ — линейные ворота; МАО — многоканальный амплитудный анализатор; ПРУ — предусилитель; СПУ — спектрометрический усилитель.

новленный уровень порога ИД превышает шумовую составляющую входных сигналов.

Регистрация распределений амплитуд детекторных сигналов в виде спектра осуществляется многоканальным амплитудным анализатором (МАО). Счетная информация, т. е. интенсивность излучения, фиксируется счетчиком. С помощью модульной электронной техники стандарта NIM выполняется линейная обработка детекторных сигналов, т. е. их усиление, оптимальное формирование, сложение и т. д. При этом сохраняется связь между утратой энергии частицей, зарегистрированной в детекторе, и амплитудой сигнала при такой обработке.

Электронные модули осуществляют нелинейную обработку детекторных сигналов (дискриминацию, ограничение, фиксацию, пропускание и т. д.). Они ведут отбор сигналов по заданному критерию (полярности, амплитуде, длительности и различных вариантов совпадений и антисовпадений и т. п.). Однако при этом связь между потерями энергии и амплитудой выходных сигналов в определенной мере нарушается.

В качестве регистрирующей аппаратуры необходимо использовать тот или иной вариант МАО, а также различные пересчетные устройства. Электронная аппаратура такого вида не имеет никакого отношения к данному стандарту. Это можно считать одной из его особенностей. Следовательно, электронные средства регистрации в виде МАО и пересчетных устройств стали главным рубежом, который ограничивает сферу действия принятого стандарта NIM.

Еще одной его особенностью является наличие шести высокочастотных (ВЧ) разъемов в исходном варианте специализированного разъема (см. рис. 80*в*). По нему в модуль подаются соответствующие напряжения питания. Реально ВЧ-разъемы не использовались, поскольку их функция в стандарте NIM с самого начала не была прописана. Видимо, разработчики рассчитывали на расширение его функциональных возможностей, но не сделали этого. Впоследствии ВЧ-разъемы удалили, оставив на их месте пустые отверстия.

Стандарт NIM предназначен для обеспечения измерений и регистрации параметров излучений в ядерной физике средних и низких энергий, включая физику высоких энергий. Стандарт был поддержан Европейским комитетом ESONE (European Standards of Nuclear Electronics) по стандартизации в ядерной электронике, созданным в 1960 г. Впервые независимо от страны-производителя стало возможным использовать электронные модули в исследовательских ядерных центрах Европы и США (Церн, Харуэлл, Сакле, Ок-Ридж, Лос-Аламос и т. д.).

Стандарт NIM регламентирует три базовых уровня стандартизации. Первый из них связан с механикой и устанавливает основные размеры и габариты всех конструктивов (каркасы, модули, их возможные варианты, платы и т. п.). Второй уровень стандартизации определяет напряжения питания, токи потребления и параметры их допустимых отклонений, т. е. связан с силовой частью электроники.

Третий уровень устанавливает входные и выходные сигналы измерительных модулей, а также логику их взаимодействия. Данный уровень получил название и стал известен как информационная часть стандарта. Он определяет основные параметры сигналов измерительных модулей. В них учитывается сфера и направление экспериментальных исследований, а также энергетический диапазон ионизирующих излучений.

### 15.3. ОСНОВНЫЕ УРОВНИ СТАНДАРТА NIM И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Рассмотрим характерные особенности этих уровней стандарта. Начнем с блочной структуры, непосредственно связанной с механической частью стандарта.

#### МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СТАНДАРТА

Все измерительные модули помещаются в специализированный каркас (шириной 483 мм, глубиной 270 мм, высотой 221,4 мм), где можно разместить 12 модулей

единичной ширины. С правой стороны каркаса на постоянно закрепленной половине передней панели модуля находятся органы его управления (вкл./выкл.), индикации и контакты контроля напряжений питания. Позади каркаса, в нижней его части, установлен универсальный источник питания. Здесь же находятся 12 специализированных разъемов с гнездами. Они служат для подачи напряжения питания в каждый из модулей.

Измерительный модуль NIM (рис. 80) единичной ширины имеет габариты  $34 \times 245 \times 221$  мм. В нем размещается печатная плата с различными электронными компонентами (интегральные схемы, транзисторы, диоды, резисторы и т. п.). Ее размер — длина 245 мм, ширина 183 мм, и она крепится к направляющим модуля. С их помощью соединяются ее передняя и задняя панели, образуя жесткий каркас. На задней панели модуля крепится навесной штекерный разъем на 42 контакта (рис. 80а).

На передней панели модуля устанавливаются высокочастотные разъемы типа BNC (аналог нашим ВЧ-разъемам типа СР, например СР50–33Ф) для приема и выдачи сигналов. На ней же размещают различные коммутирующие и регулирующие элементы (переключатели, потенциометры, тумблеры и т. п.). Они служат для управления параметрами измерительного модуля. В ряде случаев эти элементы можно обнаружить на задней панели модуля. Здесь же часто размещают дополнительные многоконтактные разъемы. Габариты модуля можно увеличивать кратно единичной ширине  $M$  (34 мм), и они нередко доходят до  $4M$ .

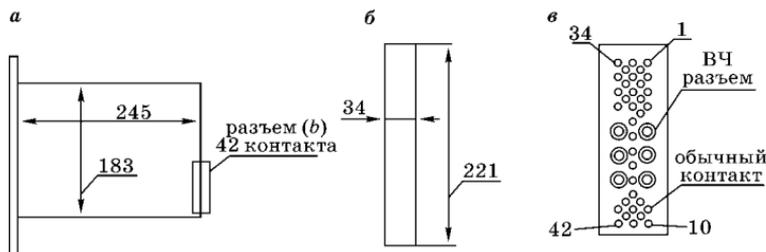


Рис. 80

Габариты измерительного модуля NIM (а), его передней панели (б), схема основного разъема (в)

ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ  
СТАНДАРТА NIM

Самым быстродействующим элементом во время принятия стандарта NIM (1966) был туннельный диод, который широко использовался в составе формирующих и логических устройств. Для питания этих диодов были специально введены источники  $\pm 3$  В. Помимо них, в состав силовой части стандарта вошли уровни питания  $\pm 6$  В,  $\pm 12$  В,  $\pm 24$  В. Здесь же были две земляные шины и две шины сети (переменное напряжение питания  $\sim 115$  В, стандарт США).

В счетных модулях для питания различных цифровых индикаторов тлеющего разряда или им подобных использовали напряжение  $+200$  В. В основном разьеме каркаса, согласно стандарту NIM, вначале были задействованы 13 контактов. По мере замены туннельных диодов на быстродействующие интегральные схемы серии ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) источники напряжений  $\pm 3$  В убрали. Сейчас устанавливаются только 11 контактов разьема каркаса.

В ответных частях разъемов, закрепленных на модулях, оставлены лишь контакты, связанные с напряжениями питания, которые используются в модуле. Другие контакты в таком разьеме исключаются, и на их месте остаются лишь пустые отверстия. Позади каркаса располагается его универсальный источник питания. Состав источников в нем может отличаться от стандартного их перечня. Например, в нем могут отсутствовать источники напряжения  $\pm 12$  В.

В качестве примера можно рассмотреть унифицированный блок питания, выполненный в стандарте NIM фирмы ORTEC типа 4002D. Его габариты  $432 \times 269 \times 89$  мм (ширина, глубина, высота) и вес более 11 кг. Он выдает  $\pm 6$  В по 10 А;  $\pm 12$  В по 3 А;  $\pm 24$  В по 1,5 А, а также сетевое напряжение  $\sim 115$  В по 0,5 А. Долговременная стабильность для всех источников напряжений каркаса не хуже  $\pm 0,5\%$ .

Существуют специальные источники, где используется другая комбинация напряжений. В них могут отсутствовать, к примеру,  $\pm 6$  или  $\pm 12$  В, а также  $+200$  В. Высо-

ковольтные источники питания детекторов в стандарте NIM выполнены отдельными модулями (1М или 2М). Диапазон изменения параметра лежит в пределах от 0 до 5000 В. Одни обеспечивают напряжение 0–1000 В, другие — 0–3000 В.

С помощью третьей группы модулей получают напряжение в диапазоне от 0 до 5000 В. Более того, в одном модуле могут быть размещены два независимых источника высокого напряжения. Данная ситуация характерна в основном для первых двух диапазонов от 0 до 3000 В. Все источники выдают напряжение обеих полярностей с возможностью плавной регулировки и установки их величины.

#### СИГНАЛЫ СТАНДАРТА NIM

Впервые среди сигналов, применяемых в ядерной физике, стандарт выделил две основные группы. Одну из них составили линейные и логические сигналы микросекундного диапазона. Они используются при изучении взаимодействий в физике ядра низких и средних энергий ( $< 30$  МэВ). Другую группу образовали линейные и логические сигналы наносекундного диапазона. Они, в свою очередь, получили название быстрые сигналы.

Характерно, что такие сигналы используются при изучении процессов физики высоких энергий и физики элементарных частиц ( $> 30$  МэВ). Однако сначала рассмотрим сигналы микросекундного диапазона. Стандарт NIM регламентирует базовые параметры аналоговых сигналов для амплитудного анализа. Они должны быть положительной полярности с амплитудой до 10 В и длительностью от 0,5 до 20 мкс (рис. 81а).

Можно использовать биполярные сигналы, что тоже допускается стандартом. Для них полная амплитуда будет уже 20 В, а также удвоенная длительность. Однако в этом случае сначала следует положительная составляющая сигнала. Стандартом NIM установлены условия, что все аналоговые модули должны иметь входное сопротивление  $\sim 1000$  Ом.

Сигналы следует передавать через ВЧ-разъемы типа BNC с волновым сопротивлением 50 или 92 Ом с помощью

кабелей такого же волнового сопротивления. Рекомендуется использовать лишь последовательное их согласование. Длительность однополярных сигналов около 1–2 мкс для амплитудного анализа стала унифицированной. Ее, как правило, задают и устанавливают посредством выбора параметров формирующих цепей в спектрометрическом усилителе. Форма и основные параметры сигналов, рекомендуемые стандартом, приведены на рисунке 81.

Логические сигналы составляют еще одну отдельную группу сигналов для микросекундного диапазона. Они используются при счете событий, в работе медленных схем совпадений, для управления линейными схемами пропускания и т. д. Это сигналы (рис. 81в) положительной полярности, фиксированной амплитуды ~ 10 В и длительностью ~ 2 мкс.

Характерно, что типичная продолжительность сигнала находится в пределах 0,5 мкс. Однако при связи по постоянному току она может быть сколь угодно большой. Стандартом NIM допускаются уровни логической единицы для всех входных сигналов  $+3 \text{ В} \leq \langle 1 \rangle \leq +12 \text{ В}$ . В свою очередь, этот же уровень для выходных сигналов может изменяться в диапазоне  $+4 \text{ В} \leq \langle 1 \rangle \leq +12 \text{ В}$ .

В таком случае, уровень логического нуля для входных сигналов будет  $+1 \text{ В} \geq \langle 0 \rangle \geq -2 \text{ В}$ . Данный уровень для

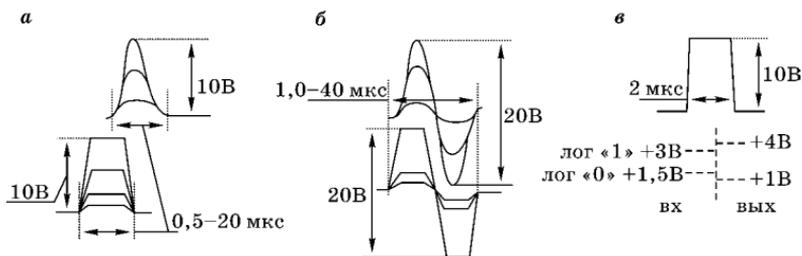


Рис. 81

Форма и основные параметры сигналов для микросекундного диапазона, рекомендуемые стандартом NIM:

*a* — однополярные сигналы и их параметры (обычные и сформированные); *б* — биполярные сигналы и их параметры (обычные сформированные); *в* — логические сигналы и их параметры, а также минимальные значения логических уровней на входах и выходах всех измерительных модулей.

выходных сигналов изменяется в диапазоне  $+1,5 \text{ В} \geq \langle 0 \rangle \geq -2 \text{ В}$ . Все логические уровни, в свою очередь, должны выделяться тоже на высокоомной нагрузке  $\sim 1000 \text{ Ом}$ . Соединительные кабели, хотя они достаточно короткие, работают без согласования на конце. Однако, согласно положениям стандарта NIM допускается их последовательное согласование.

### СИГНАЛЫ СТАНДАРТА NIM НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Стандарт регламентирует базовые параметры как линейных, так и быстрых логических сигналов, т. е. сигналов наносекундного диапазона. Линейные быстрые сигналы должны иметь отрицательную полярность, амплитуду от 0 до  $-1 \text{ В}$  и длительность  $< 500 \text{ нс}$ . Типовая длительность быстрых сигналов  $< 100 \text{ нс}$  и фронтом в несколько наносекунд.

Допускается использование биполярных сигналов, в начале которых должна следовать отрицательная составляющая сигнала, а их длительность при этом удваивается. Форма и базовые параметры сигналов, предписываемые стандартом, представлены на рисунке 82. Стандарт вводит быстрые логические сигналы для временного анализа в нано- и субнаносекундных диапазонах (полярность, амплитуду и длительность).

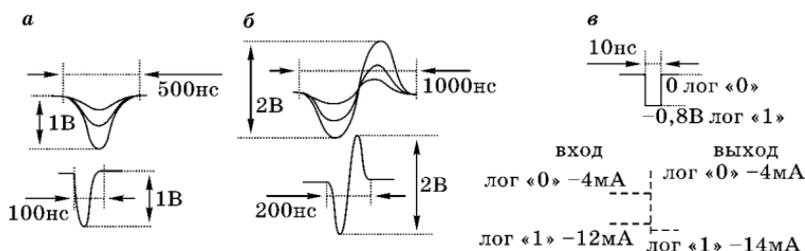


Рис. 82

Форма и базовые параметры сигналов наносекундного диапазона, рекомендуемые стандартом NIM:

*a* — однополярные и быстрые сигналы (предписываемые и типовые); *b* — биполярные быстрые сигналы (предписываемые и типовые); *v* — быстрый логический сигнал, его параметры и минимальные значения логических уровней на входах и выходах измерительных модулей.

Их передача должна осуществляться согласованными на конце коаксиальными кабелями с волновым сопротивлением 50 Ом. Без согласования такие сигналы использовать не рекомендуется. Токовые сигналы (16–20 мА) на 50 Ом нагрузке имеют амплитуду (0,8–1,0 В). Их выделяют и принимают быстрые модули. Среди них следует отметить: быстрые дискриминаторы, быстрые схемы совпадений, формирователи временной отметки и т. д.

#### 15.4. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ СТАНДАРТА NIM

Стандарт стал важной вехой развития измерительной техники для ядерно-физических исследований. В его основу положена концепция модульного принципа построения средств измерений. Это позволило независимо от фирмы-производителя и места ее размещения использовать разработанные в ней электронные модули в любом ядерном центре Европы или США.

Получило развитие и стал возможен обмен техническими средствами такого назначения между различными лабораториями и центрами ядерных исследований. Открылись новые перспективы в коллаборации ученых для рассмотрения проблем ядерной физики. Все это стимулировалось необходимостью решения весьма сложных экспериментальных задач.

Стандартизированы уровни напряжений вторичных источников питания. Были унифицированы информационные параметры сигналов для организации и проведения амплитудного и временного анализа в физике низких и средних энергий. Они ориентированы на изучение процессов и явлений, протекающих в микросекундной области. Регламентированы основные параметры сигналов в физике высоких энергий, где процессы и взаимодействия проходят в наносекундном диапазоне.

Стандартом решены сложные задачи создания и использования измерительных систем в ядерной физике. И все-таки достижения и определенные успехи гораздо

ярче высветили его основные недостатки. Основной недостаток измерительных систем на его основе — наличие в них обособленных структур регистрации в виде многоканальных амплитудных анализаторов (МАО) и различных пересчетных устройств (ПСУ).

Одним из кардинальных ограничений стандарта считают его слабые возможности по кодированию и регистрации данных эксперимента. Как показала практика измерений, наиболее остро встала проблема передачи накопленных данных из МАО и ПСУ для дальнейшей их обработки. Для этих целей привлекаются средства вычислительной техники, т. е. ЭВМ. Передача экспериментальных данных для обработки на ЭВМ стала наиболее узким местом для всех экспериментов.

Применялись различные виды перфорирующих устройств, телетайпов и т. п. В ядерной физике, не говоря уже о физике высоких энергий, в существенной мере увеличился объем регистрируемой информации. Возрос интерес к разным видам мультифакторного амплитудного и временного анализа. Потребовалась информация об энергетических, угловых и временных распределениях ядерных излучений, т. е. от различных вариантов многомерных измерений.

Возникла необходимость организации различных режимов работы электронных средств в составе измерительных систем. Среди них отметим варианты совпадений и антисовпадений как в микросекундных, так и в наносекундных диапазонах. Здесь же надо отметить все многообразие счетных режимов и т. д. Возможности стандарта NIM стали неодолимой преградой для большинства таких случаев.

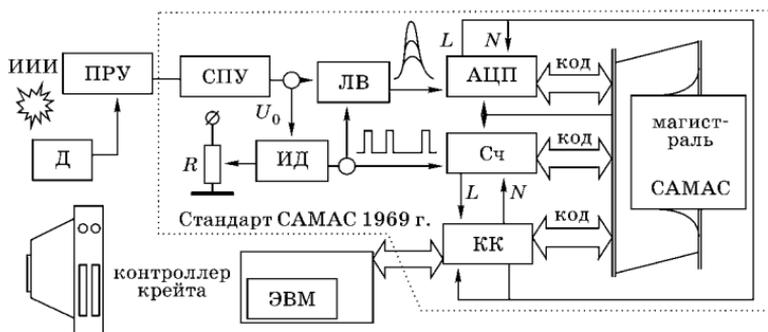
Во-первых, в нем отсутствовали структуры преобразования аналоговой и счетной информации, получаемой в ходе эксперимента, в цифровой код. Во-вторых, в стандарте NIM не было доступных форм и средств передачи, накопления и обработки получаемых данных. Эффективным решением этих проблем стал стандарт SAMAC (Computer Application for Measurement and Control), т. е. применение ЭВМ для измерений и управления.

### 15.5. СТАНДАРТ САМАС И ЕГО БАЗОВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Стандарт, разработанный Европейским комитетом стандартов по ядерной электронике ESONE (European Standard of Nuclear Electronics), был принят в 1969 г. Его основу составили самые прогрессивные на то время идеи. Одной из них был магистрально-модульный принцип организации систем сбора и обработки данных эксперимента. Были созданы условия работы измерительных систем совместно с ЭВМ в реальном масштабе времени.

В такой системе ЭВМ управляет параметрами эксперимента и контролирует его ход, собирает экспериментальные данные, а также обрабатывает их по установленным программам. На примере амплитудного анализа установим сферу действия стандарта САМАС. Измерительная система приведена на рисунке 83. Важно отметить, что в составе измерительной системы появился ряд новых модулей (АЦП, СЧ и КК), которые выполнены в стандарте САМАС.

В составе предыдущего стандарта таких модулей еще не наблюдалось. Модуль АЦП измеряет и переводит амплитуду аналоговых сигналов в цифровой код. Информация



**Рис. 83**  
Измерительная система для амплитудного анализа  
на базе стандарта САМАС:

АЦП — аналого-цифровой преобразователь; Д — детектор; ИД — интегральный дискриминатор; ИИИ — источник ионизирующего излучения; КК — контроллер крейта; ЛВ — линейные ворота; ПРУ — предусилитель; СПУ — спектрометрический усилитель; Сч — счетчик.

об интенсивности излучения в виде цифрового кода фиксируется счетчиком (Сч). Контроллер крейта (КК) связывает измерительные модули с ЭВМ. Стандарт САМАС аналогично стандарту NIM также реализует три уровня стандартизации: механический, электрический и информационный.

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СТАНДАРТА САМАС

Все измерительные и служебные модули размещаются в специальном каркасе с направляющими и многоконтактными разъемами. Две направляющие — верхняя и нижняя — и двухрядный разъем (86 контактов  $43 \times 2$ ) образуют станцию крейта, в которую вставляется и фиксируется измерительный модуль (рис. 84*а*).

Внешние контакты всех разъемов объединены в магистраль крейта. Она размещена между каркасом и передней стенкой блока питания (БП). Каркас, измерительные станции, магистраль и блок питания образуют крейт САМАС. В крейте 25 таких станций (1–25), номер каждой из них считается слева направо, если смотреть на передние панели модулей. Габариты некоторых структур САМАС даны на рисунке 84.

Модуль единичной ширины (1М) с габаритами  $221,4 \times 17,1 \times 305$  имеет плату  $305 \times 185 \times 1,5$ , закрепленную на каркасе модуля. В задней нижней части платы находится 86-контактный двухсторонний печатный разъем, соединяющий модуль с магистралью крейта. Ширина измери-

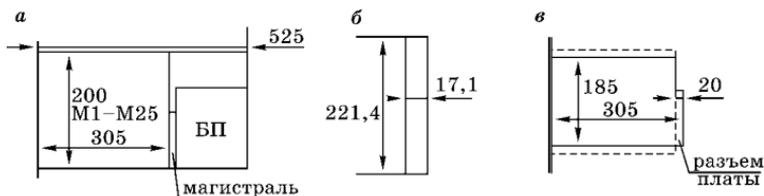


Рис. 84

Размеры некоторых структур в стандарте САМАС:

*a* — габариты крейта (вид с боку); БП — блок питания; М1–М25 — вставные модули единичной величины; *б* — габариты передней панели модуля САМАС единичной ширины М1; *в* — размеры платы САМАС.

тельного модуля может быть увеличена кратно М вплоть до 6М.

Если модуль состоит из нескольких плат, то его связь с контроллером крейта (КК) через магистраль должна происходить через разъем самой крайней справа платы модуля. Для установки модуля КК используются только две крайние справа станции крейта (24 и 25). Связь данного модуля с ЭВМ осуществляется через пару многоконтактных разъемов, расположенных на его передней панели (рис. 83).

В любой из станций (1–23) крейта размещаются другие измерительные модули. На их передних панелях находятся специальные высокочастотные (50 Ом) разъемы типа ЛЕМО МК-50В (гнездо). Они служат для приема и выдачи сигналов. Через разъемы осуществляется связь между модулями. С помощью коаксиальных кабелей (50 Ом), на концах которых находятся разъемы типа ЛЕМО МК-50А (штекер), измерительные модули обмениваются необходимыми сигналами.

#### ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ В СТАНДАРТЕ САМАС И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Источник питания, размещенный за магистралью крейта (рис. 84а), выдает обязательные уровни питания для измерительных модулей ( $\pm 6 \text{ В} \times 25 \text{ А}$  с нестабильностью  $< 0,5\%$  и  $\pm 24 \text{ В} \times 6 \text{ А}$  с нестабильностью  $< 0,15\%$ ). Дополнительные уровни питания ( $\pm 12 \text{ В} \times 2 \text{ А}$  с нестабильностью  $< 0,15\%$ ) создает специальный модуль двойной ширины 2М — преобразователь САМАС ( $\pm 24 \text{ В} / \pm 12 \text{ В}$ ). Блок питания (БП) при габаритах  $426 \times 178 \times 176$  весит около 20 кг.

При отсутствии данного преобразователя в крейте напряжения  $\pm 12 \text{ В}$  на его магистрали не будет. Включение, выключение, а также сигнализация о состоянии крейта осуществляются с дополнительной вентиляционной панели. Она закрепляется снизу крейта. Два ее вентилятора обдувают блок питания, а два других охлаждают измерительные модули. При малом числе модулей, т. е. при низкой мощности потребления ( $\leq 200 \text{ Вт}$ ), можно использовать панель без вентиляторов.

Индивидуальные провода для каждой величины и полярности напряжения образуют шину питания крейта. Помимо этих шести проводов, имеются два провода «земля», два провода  $\sim 117$  В, провод «чистая земля», два резервных и провод  $+200$  В. Это напряжение рассчитано для питания элементов индикации, но практически не используется. Итак, 14 проводов в магистрали САМАС образуют шину питания крейта, занимающую нижние контакты его разъемов.

Для работы различных детекторных устройств необходимы высоковольтные источники питания. Эти источники в стандарте САМАС выполнены в виде модулей типа 2М–4М. Они обеспечивают напряжение обеих полярностей, величиной от 0 до 2500–5000 В. На передней панели таких модулей устанавливаются специальные высоковольтные разъемы типа LEMO для подачи высокого напряжения на детектор.

Здесь же находятся органы управления величиной напряжения и контрольный прибор. Напряжение регулируется ступенчато (100–200 В), а в этих пределах плавно. Более того, параметры высоковольтных источников могут регулироваться и устанавливаться программным путем. В таком случае органы управления на передней панели модуля отсутствуют.

### СИГНАЛЫ СТАНДАРТА САМАС

Линейные аналоговые сигналы служат для измерения величины энергии излучений, т. е. для амплитудного анализа микросекундного диапазона. Они полностью соответствуют стандарту NIM (рис. 81а). Это сигналы положительной полярности с амплитудой до 10 В на входном импедансе в 1 кОм и длительностью 0,5–20 мкс или биполярные (рис. 81б). Стандарт САМАС допускает использование таких же сигналов, но с амплитудой 5 В. Требования к параметрам всех сигналов наносекундного диапазона (как линейных, так и логических) полностью совпадают со стандартом NIM (рис. 82).

Для всех логических сигналов микросекундного диапазона в стандарте САМАС принята «отрицательная» логика,

т. е. логическому нулю соответствует высокий уровень ( $\geq +2,5$  В). Для логической единицы используют низкий уровень ( $\leq +0,5$  В). «Отрицательная» логика позволила реализовать на магистрали «проводное» ИЛИ. Передача сигналов на магистрали ведется с помощью интегральных схем типа ТТЛ с открытым коллектором (ОК).

К магистрали может обратиться любой модуль крейта согласно действующему протоколу. Через разъемы LEMO МК-50В, установленные на передних панелях, измерительные модули обмениваются по кабелям информационными и логическими сигналами. Их дискретные уровни обратны логическим уровням стандарта NIM (рис. 82а), однако временные их параметры (длительности сигналов) равнозначны.

### 15.6. МАГИСТРАЛЬ САМАС И ЕЕ СТРУКТУРА

Магистраль крейта — многопроводная среда, состоящая из ряда шин, обеспечивающих взаимодействие измерительной системы с ЭВМ по заданным критериям. В составе магистрали САМАС можно выделить ключевые группы шин: питания, управления, а также шины записи и чтения. Шины питания занимают 14 нижних контактов двухстороннего 86-контактного разъема магистрали по семь контактов с каждой стороны.

Если смотреть на крейт спереди и левую часть разъема обозначить как А, то правая его часть будет Б. Тогда нижний контакт разъема А1 — земляная шина; А2 — резерв; А3 — +12 В; А4 — резерв; А5 — ~ 117 В; А6 — +200 В; А7 — -12 В. Правая часть разъема Б: нижний его контакт Б1 — земляная шина; Б2 — +6 В; Б3 — +24 В; Б4 — чистая земля; Б5 — ~ 117 В; Б6 — -6 В; Б7 — -24 В. Соединенные друг с другом сквозными линиями связи, т. е. отдельными проводниками, эти контакты в 25 разъемах крейта образуют шину питания магистрали САМАС.

Выше шины питания находится 24-разрядная шина считывания цифровой информации из измерительных модулей крейта. На левой стороне разъема (контакты А8–А19)

размещены 12 четных ее разрядов ( $R2-R24$ ). Контакты  $B8-B19$  правой части разъема связаны с 12 нечетными разрядами ( $R1-R23$ ) этой шины. Далее следует 24-разрядная шина записи цифровой информации в виде кода в модули крейта. Ее 12 четных разрядов  $W2-W24$  занимают левую часть разъема (контакты  $A20-A31$ ). На правой части разъема (контакты  $B20-B31$ ) находятся 12 нечетных ее разрядов  $W1-W23$ .

В верхней части разъема размещаются резервные шины и шины управления магистрали САМАС. Магистралью управляет контроллер крейта (КК). На ней КК генерирует два вида операций: адресные и безадресные. Они сопровождаются сигналом ЗАНЯТО на сквозной линии связи  $B$  ( $B43$ ). При этом сигнале другие операции на магистрали не производятся. Адресные операции связаны с отдельным модулем, безадресные действуют сразу на все модули крейта. Это сигналы ПУСК линия  $Z$  ( $B33$ ), СБРОС линия  $C$  ( $A36$ ) и «ЗАПРЕТ» линия  $I$  ( $A37$ ). Два первых из них сопровождает импульс СТРОБ 2 по линии ( $A32$ ).

В адресных или командных операциях используются функции  $F1-F16$  и субадреса  $A1-A8$ , выставляемые на сквозных линиях магистрали ( $B38-B42$ ) ( $B34-B37$ ) соответственно. С их помощью задается вид операции, выполняемой в измерительном модуле (ИМ), который обратился в КК по отдельной линии связи  $L$  ( $A34$ ). Четные разряды записи и чтения ( $A8-A31$ ) в разъеме последней (25-й) станции крейта заменены индивидуальными линиями связи  $L1-L24$  каждого ИМ с КК. Нечетные разряды чтения и записи в нем ( $B8-B31$ ) заменены индивидуальными линиями связи  $N1-N24$  КК с ИМ ( $A35$ ). Структура связи между отдельным модулем и КК представлена на рисунке 85.

На каждую командную операцию КК вида  $NAF$  ( $N$  — номер модуля,  $A$  — субадрес в нем и  $F$  — реализуемая функция) ИМ выделяет сигналы ОТВЕТ линия  $Q$  ( $B32$ ) и КОМАНДА ПРИНЯТА линия  $X$  ( $A38$ ). Эти сигналы на рисунке 22 представлены в виде отклика ИМ. Время между разными операциями на магистрали крейта задают два

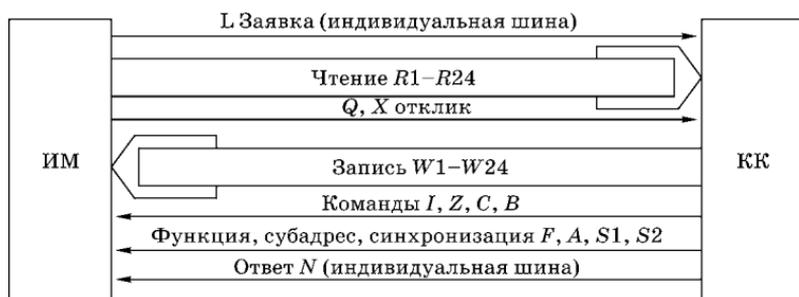


Рис. 85  
Структура связи между измерительным модулем (ИМ)  
и контроллером крейта (КК)

сигнала: СТРОБ 1 линия  $S1$  (А33) и СТРОБ 2 линия  $S2$  (А32). Резервные сквозные шины  $P1, P2$  (А43, А42) и резервные индивидуальные контакты  $P3-P5$  (А41-А39) могут использоваться для расширения функций САМАС.

## 15.7. ОПЕРАЦИИ НА МАГИСТРАЛИ САМАС

Взаимодействие между ИМ и КК выполняется за определенное время, получившее название цикла САМАС. Стандарт регламентирует характер командных кодовых операций (их адресные версии), а также их безадресные варианты. В обоих случаях стандарт определяет используемые линии связи, необходимый состав сигналов, их длительности и т. д.

Простые безадресные операции выполняются с использованием команд ( $F8-F15$ ) и ( $F24-F31$ ). При этом не используются ни шины  $R$  (чтения), ни шины  $W$  (записи). Выполняются всего лишь функции обслуживания: блокировка ( $B$  — занято), пуск ( $Z$  — пуск), сброс ( $C$  — очистка). Эти операции сопровождаются сигналом  $S2$  СТРОБ 2, который все сбрасывает, включая заявки, блокировки и т. д. Временные диаграммы цикла САМАС безадресных операций на магистрали крейта представлены на рисунке 86а.

При адресных операциях используются шины  $R$  и  $W$ . Процесс чтения информации из ИМ обслуживается коман-

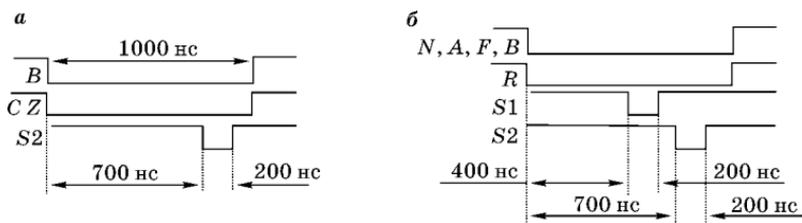


Рис. 86  
Временные диаграммы цикла САМАС:

*a* — для безадресных операций; *б* — для адресных операций (не показан сигнал *L*, инициирующий данный цикл).

дами ( $F0-F7$ ). Запись в него кодовой информации ведется командами ( $F16-F23$ ). Команды САМАС выбираются в ИМ с помощью дешифратора. Временные диаграммы цикла САМАС при адресной операции (чтение информации из ИМ) даны на рисунке 86б.

Сигнал *S1* СТРОБ 1 сбрасывает заявку *L* в ИМ и считывает код с шин *R*, не меняя их состояние. По сигналу *S2* СТРОБ 2 состояние шин *R* и *W* может изменяться, поскольку сбрасываются регистры этих шин и деблокируется вход ИМ. Все эти процессы происходят исключительно в модуле, с которого поступила заявка *L*. Длительность обоих циклов постоянна и равна 1 мкс.

## 15.8. НЕДОСТАТКИ САМАС И РАЗВИТИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Система САМАС, созданная для ядерно-физических исследований, нашла применение во многих областях науки и техники. Электронные средства этого стандарта используются при испытаниях нового оборудования, в контроле его параметров, в управлении разными технологическими процессами и т. д. Однако для целого ряда направлений эти системы обнаружили свою избыточность, нерациональное использование шин *R* и *W* и т. п. В стандарте VME (Versa Modular Europe) их совместили путем мультиплексирования. Плату урезали до  $100 \times 286$  (мини-VME),

но оставили возможность использования макси-VME (200××286), т. е. почти плата САМАС.

Для физики высоких энергий длительность цикла была большой. В стандарте FASTBUS ее уменьшили до 100 нс, т. е. в 10 раз. Плату увеличили до 400×320 и ее разъем имеет 130 контактов с 32 отдельными шинами *R* и *W*. В измерительной технике данного направления применяются компьютерные технологии и стандарты РС (персональных компьютеров). Их реализуют на базе магистрально-модульного принципа. Именно он стал негативным фактором и превратился в проблему, которую приходится решать разработчикам. Однако это уже другая область совершенствования и развития автоматизации исследований.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Измерительные центры, место и роль измерительных станций или измерительных мест в их составе.
2. Суть модульного принципа в организации электронных средств и его вклад в автоматизацию исследований.
3. Базовые уровни стандарта NIM и его «механика».
4. Параметры источников питания в стандарте NIM. Что было и что осталось?
5. Сигналы для амплитудного анализа, их основные параметры в стандарте NIM.
6. Параметры быстрых сигналов стандарта NIM для наносекундного диапазона.
7. Базовый принцип организации стандарта САМАС, его механический уровень.
8. Источники питания и их параметры для модулей САМАС.
9. Сигналы стандарта САМАС и их параметры.
10. Магистраль САМАС, организация и базовые шины.
11. Основные операции на магистрали САМАС, их назначение и виды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов, А. И.* Основы ядерной физики. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 256 с.
2. *Абрамов, А. И.* Основы экспериментальных методов ядерной физики / А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, Е. С. Матусевич. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 488 с.
3. *Акимов, Ю. К.* Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю. К. Акимов, О. В. Игнатъев, А. И. Калинин [и др.]. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 344 с.
4. *Басиладзе, С. Г.* Быстродействующая ядерная электроника. — М. : Энергоатомиздат, 1982. — 160 с.
5. *Глушковский, Е. М.* Быстродействующие амплитудные анализаторы в современной ядерной физике и технике. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 128 с.
6. *Горн, Л. С.* Современные приборы для измерения ионизирующих излучений / Л. С. Горн, Б. И. Хазанов. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 232 с.
7. *Григорьев, В. А.* Электронные методы ядерно-физического эксперимента / В. А. Григорьев, А. А. Колубин, В. А. Логинов. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 336 с.
8. *Данилевич, В. В.* Временные измерения в физическом эксперименте / В. В. Данилевич, А. Ф. Чернявский. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 104 с.
9. *Мелешко, Е. А.* Наносекундная электроника в экспериментальной физике. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 216 с.
10. *Мелешко, Е. А.* Измерительные генераторы в ядерной электронике / Е. А. Мелешко, А. А. Митин. — М. : Энергоатомиздат, 1981. — 256 с.
11. *Певчев, Ю. Ф.* Автоматизация физического эксперимента / Ю. Ф. Певчев, К. Г. Финогенов. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 368 с.
12. *Рехин, Е. И.* Метод совпадений / Е. И. Рехин, П. С. Чернов, С. Г. Басиладзе. — М. : Энергоатомиздат, 1979. — 240 с.
13. *Цитович, А. П.* Ядерная электроника. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 408 с.
14. *Шмидт, Х.* Измерительная электроника в ядерной физике. — М. : Мир, 1989. — 192 с.
15. *Андронов, О. И.* Универсальный контрольный генератор / О. И. Андронов, В. Г. Бровченко, С. Т. Евдокимов // Приборы и техника эксперимента. — 1992. — № 3.

16. Деменков, В. Г. Устройство для многодетекторного временного анализа наносекундного диапазона / В. Г. Деменков, Б. В. Журавлев, А. А. Лычагин // Приборы и техника эксперимента. — 1995. — № 3.
17. Деменков, В. Г. Регистрация спектров быстрых нейтронов при возможных срывах работы ускорителя / В. Г. Деменков, А. А. Лычагин, П. В. Деменков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2009. — № 2.
18. Деменков, В. Г. Девиация масштаба времени в аналоговых структурах линейного экспандирования / В. Г. Деменков, Б. В. Журавлев, П. В. Деменков // Научное приборостроение. — 2008. — Т. 18, № 3.
19. Деменков, В. Г. Снижение искажений регистрируемых распределений интервалов времени путем инспекции наложений / В. Г. Деменков, Б. В. Журавлев, П. В. Деменков // Научное приборостроение. — 2011. — Т. 21, № 4.
20. Журавлев, Б. В. Измерительный комплекс для времяпролетной спектрометрии быстрых нейтронов / Б. В. Журавлев, В. Г. Деменков, А. А. Лычагин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — № 6.
21. Зинов, В. Г. Генератор случайно распределенных импульсов / В. Г. Зинов, А. В. Селиков // Препринт ОИЯИ 13-84-48. — Дубна, 1984.
22. Корнилов, Н. В. Нейтронная спектрометрия с быстрым оцифровщиком формы импульса / Н. В. Корнилов, В. А. Хрячков, М. В. Дунаев [и др.] // Препринт ФЭИ-2930. — Обнинск, 2002.
23. Котов, Ю. Д. Устройство стабилизации задержки передачи логических сигналов / Ю. Д. Котов, О. Н. Романов // Приборы и техника эксперимента. — 1986. — № 4.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Адресные операции САМАС 362
- Активный аттенуатор 112
- восстановитель постоянной составляющей (ВПС) 98
  - фильтр 113
- Амплитуда сигнала с камеры 32
- — с полупроводникового детектора 32
  - — со сцинтилляционного детектора 33
- Амплитудная дискриминация 133
- Амплитудный анализ (АА) 214
- анализатор импульсов 216
  - дискриминатор 119, 133
  - спектр 215
  - мультифакторный анализ 280
- Аналоговый мультиплексор 93
- процессор 238
  - сигнал 115
- Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 221
- АЦП типа (А-Т-С) 226
- поразрядного взвешивания 232
  - прямого кодирования 235
- Безадресные операции САМАС 363
- Быстродействие амплитудного тракта 225
- Быстрые схемы совпадений 177, 179
- Быстрый дискриминатор (БД) 120
- — по фронту сигнала 146
  - — по пересечению нуля 149
  - — по постоянной части сигнала 152
- Варианты систем стабилизации 306
- Верьерный метод измерения ВИ 271
- Волновое сопротивление 59
- Восстановитель постоянной составляющей 87
- Время живое 209
- Время мертвое 207
- Временной анализ (ВА) 240
- — микросекундного диапазона 253
  - — наносекундного диапазона 260
  - — мультифакторный анализ 284
- Временные методики измерений 243
- Высоковольтные источники питания САМАС 360
- — — NIM 352
- Генератор белого спектра 331
- точной амплитуды (ГТА) 328
  - контроля временного тракта 338
  - линейного напряжения 330
  - случайных сигналов 333
- Двумерный амплитудный анализ 282
- Дестабилизирующие факторы 305
- Детектор 19, 26
- режимы работы 27
- Дискриминатор 119
- дифференциальный 138
  - интегральный 136
- Дискриминация 119
- при временном анализе 143
- Дифференцирующая цепочка 55

- Дозиметрия 15  
Долговременная стабильность 225
- Загрузка БД 156  
— тракта при АА 225
- Затраты энергии на образование пары носителей заряда 31
- Защита детектора 17
- Измеритель интервалов времени типа ( $t-A-T-C$ ) 269  
— — — интерполяционного типа 273
- Измеритель скорости счета событий 195
- Измерительный модуль САМАС 358  
— — NIM 350
- Измерительная система 23
- Измерительный тракт АА 218  
— — ВА 247  
— — спектрометра 221
- Инспектор наложений 89
- Интегральная нелинейность 223
- Интегрирующая цепочка 55
- Интенсивность излучения 193
- Интенсиметр 194  
— аналоговый 195  
— цифровой 198
- Ионизационная камера 20
- Ионизационный метод 19
- Ионизация 18
- Ионизирующее излучение 18
- Источники питания САМАС 359  
— — NIM 351
- Источники излучения 12  
— — естественные 12  
— — искусственные 13
- Источники реперных сигналов 328
- Кабель 59
- Ключевой режим биполярного транзистора 130
- Кодировщик номера детектора 288, 290
- Контроллер крейта 358, 359
- Крейт САМАС 358  
— — его магистраль 361
- Лазерная дальнометрия 245
- Линейная схема пропускания 82  
— — компенсационного типа 85
- Линейное формирование 55
- Линии задержки (ЛЗ) 58, 60
- Линейный расширитель импульсов 73
- Люминесцентный метод 20
- Люминофоры 20
- Магистраль САМАС 361
- Мажоритарная схема совпадений (СС) 180
- Мертвое время  
— — СС 175
- Метод времени пролета 241
- Метод преобразования ( $t-A$ ) 264  
— — — старт-стопного типа 266  
— — — по перекрытию 267  
— — — стробирующего типа 268  
— — типа ( $t-A-T-C$ ) 269
- Методы измерения интервалов 250
- Механика стандарта САМАС 358  
— — NIM 350
- Микросекундные сигналы NIM 353
- Многодетекторные измерения 291
- Многостоповые измерения 289
- Модель усилителя 105
- Модуль САМАС 358  
— NIM 350
- Мультиискайлерный анализ 295
- Мультифакторный АА 282  
— — — типа «амплитуда — амплитуда» 282
- Наносекундные сигналы NIM 354
- Недостатки стандарта САМАС 364  
— — NIM 356

- Нелинейный метод обработки сигналов детектора 117  
Нормированный сигнал 118
- Образцовые спектрометрические гамма источники (ОСГИ) 222
- Ограничение 121  
Ограничитель 121  
— диодный 122  
— — последовательного типа 122, 124  
— — параллельного типа 122, 125  
— — — двухсторонний 126
- Операции на магистрали САМАС 363
- Опорные интервалы времени 320
- Оптимальная постоянная времени 38
- Оптимальное формирование 65
- Параметры СПУ 66
- Пассивный ВПС 87
- Пиковый детектор 76
- Погрешность измерения активности 196
- Полупроводниковый детектор 20, 32
- Постоянная времени детектора 37
- Предусилитель 43  
— его разновидности 44  
— зарядочувствительный 46
- Преобразование  $A-T$  228  
— вида  $T-C$  229  
— —  $T-N$  231
- Прецизионная спектрометрия 307
- Приоритетный дискриминатор 178
- Приоритетный принцип отбора событий 178
- Прямое кодирование интервалов 253
- Пьедестал ЛСП 85
- Радиометрия 15
- Разрешающее время СС 173
- Разрешение тракта измерения 222
- Расширитель сигналов 76
- Регистр последовательного приближения 232
- Регистрация по живому времени 207
- Режим работы детектора 28, 114
- Световод 21
- Селекция 127  
— кодовая 128
- Сигнал нормированный 118  
— рассогласования 314
- Сигналы детектора 26, 27  
— стандарта САМАС 360  
— — NIM 352
- Системы стабилизации, варианты 306  
— — состав 307
- Спектральная плотность шума 105  
— — источника шума 107
- Спектрометр 221
- Спектрометрия 15
- Спектрометрический усилитель (СПУ) 52  
— — требования 53  
— — его структура 63
- Специальное логическое устройство 292
- Стабилизация временного спектрометра 319, 320  
— сцинтилляционного спектрометра 316  
— тракта спектрометра с ППД 311  
— — — на основе ГТА 312
- Стандарт САМАС 357  
— NIM 349  
— — его уровни 350  
— VME 364  
— FASTBUS 365
- Старт-стопный метод измерения 353  
— — с синхронной серией 358  
— — с несинхронной серией 359

- Структура антисовпадений  
*170, 171*  
— зарядочувствительного  
предусилителя *48*  
— инспектора наложений *91*  
— магистрали САМАС *361*  
— порогового усилителя *70*  
— суммирующего усилителя  
*80*  
— усилителя с задержкой *72,*  
*73*  
Суть метода совпадений *165*  
— — антисовпадений *171*  
— МИДИ *250*  
Схема компенсации полюса  
нулем *47*  
— режекции наложений *294*  
— совпадений (СС) *166*  
Сцинтиллятор *20*  
Сцинтилляционный детектор  
*21*  
Счетный канал *202*  
Счетные методики измерений  
*210*  
Счетчик газонаполненный *22*  
Счетчик Черенкова *22*  
  
Таймерная серия *260*  
Топология измерений на базе  
СС *258*  
  
Усилитель с задержкой *72*  
— пороговый *70*  
— спектрометрический,  
параметры *62, 66*  
— суммирующий *80*  
Устройство выборки и хране-  
ния *78*  
— достройки кода *290*  
  
Флуктуация заряда *32*  
— параметров *305*  
Фон *16*  
  
Форма сигнала схемы компен-  
сации *48*  
Формирование интервалов  
времени *336*  
— сигналов искусственной ЛЗ  
(ИЛЗ) *58*  
— биполярных сигналов ИЛЗ  
*61*  
Формирователь временной  
отметки *120*  
— — — по пересечению нуля  
*149*  
Фотоэлектронный умножитель  
(ФЭУ) *21*  
Функции САМАС *362*  
— счетных устройств *202*  
  
Циклично-конвейерный метод  
измерения интервалов  
времени *255, 256*  
Цифроаналоговый преобразо-  
ватель *313*  
Цифровой метод обработки  
сигналов *300*  
— — — — вариант реализации  
*301*  
Цифровой сигнал *116*  
Цифровой измеритель интерва-  
лов нониусного типа *271*  
  
Число каналов АЦП *222*  
  
Ширина канала АЦП *222*  
Шумовые заряд и энергия *107*  
  
Эквивалентная схема детекто-  
ра *35*  
— — замещения детектора *36*  
— — ШПД и ЗЧП шумовая *108*  
Эталонная задержка *324*  
Эффективность СС *175*  
Эффективная температура  
шума *106*

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	5
--------------------------	---

## *Раздел I*

### **Электронная техника линейных методов обработки детекторных сигналов**

<b>Общие положения</b> .....	10
------------------------------	----

## *Глава 1*

### **Базовые положения регистрации ионизирующих излучений**

1.1. Источники радиоактивного излучения и их виды .....	12
1.2. Ключевые направления в изучении ионизирующих излучений .....	14
1.3. Трудности в измерении параметров ядерных превращений .....	16
1.4. Ионизационный метод регистрации радиационных излучений .....	18
1.5. Люминесцентный метод — основа сцинтилляционных детекторов .....	20
1.6. Детекторные устройства и их основные разновидности .....	22
1.7. Изучение ядерных превращений и особенности измерения их параметров .....	23
Контрольные вопросы .....	25

## *Глава 2*

### **Детекторы и их сигналы**

2.1. Режимы работы детекторных устройств и их виды .....	26
2.2. Взаимосвязь параметров и режима работы детекторов .....	28
2.3. Нарушение условий пропорциональности в детекторе .....	29
2.4. Оценка сигналов газонаполненных детекторов .....	30
2.5. Полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы и оценка их сигналов .....	32
2.6. Сопоставительный анализ детекторных сигналов .....	33
2.7. Эквивалентная схема детекторного устройства .....	35
2.8. Фактор времени в параметрах входной цепи, подключенной к детектору .....	37
Контрольные вопросы .....	39

## *Глава 3*

### **Линейные методы обработки сигналов детекторов**

3.1. Своеобразие усиления детекторных сигналов .....	40
3.2. Основные функции предусилителя и его разновидности .....	43
3.3. Зарядочувствительный предусилитель, структура и ее особенности .....	46

3.4. Применение зарядочувствительных предусилителей и меры предосторожности работы с ними . . . . .	49
3.5. Спектрометрический усилитель — основное звено амплитудного анализа . . . . .	52
3.6. Линейное формирование сигналов при усилении . . . . .	55
3.7. Линейное формирование сигналов с помощью линий задержки . . . . .	58
3.8. Применение линий задержки для формирования биполярных сигналов . . . . .	61
3.9. Структура, состав и основные характеристики спектрометрического усилителя . . . . .	62
Контрольные вопросы . . . . .	66

#### *Глава 4*

##### **Линейные схемы и техника получения и отбора детекторных сигналов**

4.1. Пороговая техника усиления сигналов . . . . .	68
4.2. Электронные средства усиления сигналов при их одновременной задержке . . . . .	71
4.3. Расширители импульсов с линейной характеристикой передачи сигналов . . . . .	74
4.4. Линейное суммирование аналоговых сигналов . . . . .	79
4.5. Линейные схемы пропускания аналоговых сигналов . . . . .	82
4.6. Восстановление постоянной составляющей в цепи передачи сигналов . . . . .	86
4.7. Инспектор наложений при амплитудном анализе . . . . .	89
4.8. Аналоговые мультиплексоры, назначение и сфера применения . . . . .	92
Контрольные вопросы . . . . .	96

#### *Раздел II*

##### **Электронные средства нелинейных методов обработки сигналов детекторных устройств**

Общие положения . . . . .	98
---------------------------	----

#### *Глава 5*

##### **Шумы амплитудного спектрометрического тракта и борьба с ними**

5.1. Диспропорция при потерях энергии частицами в детекторах . . . . .	100
5.2. Шумовые факторы в устройствах детектирования на примере ППД . . . . .	102
5.3. Усилитель — активный четырехполюсник и его шумовые составляющие . . . . .	104
5.4. Шумовые характеристики тракта регистрации излучения . . . . .	107
5.5. Шумы в начале измерительного тракта и меры их снижения . . . . .	110
5.6. Снижение шума при последующей обработке детекторных сигналов . . . . .	112
Контрольные вопросы . . . . .	113

*Глава 6***Нелинейные методы выделения и отбора детекторных сигналов**

6.1. Общие положения и некоторые замечания . . . . .	114
6.2. Виды сигналов и сфера их применения . . . . .	116
6.3. Нелинейный метод — унифицированный вариант выделения информации с детекторных устройств . . . . .	117
6.4. Дискриминация — основа нелинейного метода и ее виды . . . . .	119
6.5. Ограничение — базовая нелинейная операция получения сигналов . . . . .	120
6.6. Техника ограничения сигналов и ее основные разновидности . . . . .	123
6.7. Селекция — форма нелинейной обработки и выделения сигналов . . . . .	127
6.8. Реализация нелинейных методов в структурах электронной техники . . . . .	129
Контрольные вопросы . . . . .	131

*Глава 7***Нелинейные методы и электронные средства их реализации**

7.1. Требования к дискриминации при амплитудном анализе . . . . .	133
7.2. Интегральный дискриминатор — структура и сфера применения . . . . .	136
7.3. Дифференциальный дискриминатор — структура, ее состав и особенности . . . . .	138
7.4. Электронные средства дискриминации и варианты их исполнения . . . . .	140
7.5. Требования к дискриминации при временном анализе . . . . .	143
7.6. Быстрый дискриминатор по фронту входного сигнала . . . . .	146
7.7. Формирователь временной отметки по пересечению нуля . . . . .	149
7.8. Быстрый дискриминатор по постоянной части сигнала . . . . .	152
7.9. Повышение возможностей быстрых дискриминаторов и расширение сферы их применения . . . . .	156
Контрольные вопросы . . . . .	159

*Глава 8***Методы совпадений и антисовпадений и электронные средства их обеспечения**

8.1. Сфера применения методов совпадений и антисовпадений . . . . .	160
8.2. Основные положения методов совпадений и антисовпадений . . . . .	164
8.3. Структура базовых средств реализации метода совпадений . . . . .	166
8.4. Схемы антисовпадений, их организация и типовые структуры . . . . .	170
8.5. Основные параметры схем совпадений и антисовпадений . . . . .	173
8.6. Разновидности схем совпадений . . . . .	176

- 8.7. Экспериментальные исследования на современном этапе  
и тенденция развития средств отбора событий ..... 181  
Контрольные вопросы ..... 185

### *Раздел III*

#### **Электронные методы и техника измерения параметров ядерных излучений**

- Общие положения ..... 188

#### *Глава 9*

##### **Методы и техника измерения интенсивности излучения ..... 190**

- 9.1. Задачи измерения средней частоты  
поступления событий ..... 190
- 9.2. Измерение средней частоты поступления событий  
аналоговым методом ..... 193
- 9.3. Цифровые измерители скорости счета событий ..... 197
- 9.4. Счетный метод — база для экспериментальных  
исследований. Техника его реализации ..... 201
- 9.5. Задачи и роль мониторингового канала ..... 205
- 9.6. Живое и мертвое время при регистрации событий ..... 207
- 9.7. Унифицированные методики регистрации  
счетной информации ..... 210  
Контрольные вопросы ..... 212

#### *Глава 10*

##### **Амплитудный анализ: основные параметры и базовые электронные средства**

- 10.1. Назначение и роль амплитудного анализа ..... 214
- 10.2. Типовой измерительный тракт  
для амплитудного анализа ..... 218
- 10.3. Основные характеристики амплитудного  
спектрометрического тракта ..... 221
- 10.4. Аналого-цифровое преобразование  
типа «амплитуда — время — код» ( $A-T-C$ ) ..... 225
- 10.5. Преобразование амплитуды сигнала  
в длительность ( $A-T$ ) ..... 228
- 10.6. Преобразование длительности интервала  
в цифровой код ( $T-C$ ) ..... 229
- 10.7. Аналого-цифровое преобразование  
методом поразрядного взвешивания ..... 232
- 10.8. Непосредственное аналого-цифровое преобразование  
в форме прямого кодирования ..... 234
- 10.9. Аналоговые процессоры — составная часть  
прецизионных измерений ..... 236  
Контрольные вопросы ..... 239

#### *Глава 11*

##### **Базовые направления во временном анализе и его электронные средства**

- 11.1. Основные положения временного анализа ..... 240
- 11.2. Сфера применения временного анализа  
и его базовые направления ..... 243

11.3. Типовой вариант измерительного тракта для временного анализа . . . . .	246
11.4. Основные методы измерения длительности интервалов времени . . . . .	249
11.5. Методические аспекты временного анализа микросекундного диапазона . . . . .	253
11.6. Электронные средства измерения интервалов времени микросекундного диапазона . . . . .	256
11.7. Наносекундный временной анализ и его электронные средства . . . . .	260
11.8. Косвенные методы измерения интервалов времени в наносекундной области . . . . .	264
11.9. Измерители интервалов типа «время — амплитуда» ( $t-A$ ) и их разновидности . . . . .	266
11.10. Измерители типа «время — амплитуда — время — код» ( $t-A-T-C$ ) и их варианты . . . . .	269
11.11. Цифровые измерители интервалов нониусного типа . . . . .	271
11.12. Интерполяционные измерители наносекундных интервалов времени . . . . .	273
Контрольные вопросы . . . . .	275

#### *Раздел IV*

#### **Развитие методов и техники спектрометрии, ее прецизионных измерений и средств их обеспечения, включая автоматизацию исследований**

Общие положения . . . . .	278
---------------------------	-----

#### *Глава 12*

#### **Развитие базовых направлений спектрометрии ядерных излучений**

12.1. Основные модификации амплитудного мультифакторного анализа . . . . .	280
12.2. Своеобразие форм временного мультифакторного анализа . . . . .	284
12.3. Многодетекторные измерения — одна из форм амплитудного или временного мультифакторного анализа . . . . .	287
12.4. Особенности многодетекторного временного анализа наносекундного диапазона . . . . .	291
12.5. Мультикайлерный анализ в измерении интенсивности излучений . . . . .	295
12.6. Измерительный тракт с оцифровщиком сигналов детекторных устройств . . . . .	298
Контрольные вопросы . . . . .	303

#### *Глава 13*

#### **Долговременные и прецизионные измерения, методы и техника их обеспечения**

13.1. Долговременные измерения и стабильность параметров спектрометрического тракта . . . . .	304
---	-----

13.2. Прецизионная спектрометрия и некоторые аспекты ее реализации . . . . .	307
13.3. Стабилизация тракта измерений полупроводникового спектрометра энергий . . . . .	310
13.4. Сцинтилляционный спектрометр энергий и особенности стабилизации его тракта . . . . .	314
13.5. Стабилизация параметров временного спектрометра высокого разрешения . . . . .	318
13.6. Стабилизация тракта путем сравнения его задержки с эталоном . . . . .	321
Контрольные вопросы . . . . .	324

#### Глава 14

### Электронные средства контроля параметров измерительных трактов спектрометров

14.1. Техника формирования сигналов высокостабильной амплитуды . . . . .	326
14.2. Электронные средства контроля линейности амплитудного спектрометрического тракта . . . . .	329
14.3. Использование случайных сигналов в решении измерительных задач . . . . .	332
14.4. Стабильные интервалы времени в ревизии параметров измерительных трактов . . . . .	335
14.5. Контроль параметров при временном анализе наносекундного диапазона . . . . .	338
Контрольные вопросы . . . . .	341

#### Глава 15

### Стандартизация электронных средств и автоматизация исследований

15.1. Некоторые аспекты автоматизации исследований и стандартизации в ядерной электронике . . . . .	342
15.2. Модульные структуры ядерной электроники. Стандарт NIM . . . . .	346
15.3. Основные уровни стандарта NIM и их параметры . . . . .	349
Механические параметры стандарта . . . . .	349
Параметры источников питания стандарта NIM . . . . .	351
Сигналы стандарта NIM . . . . .	352
Сигналы стандарта NIM наносекундного диапазона . . . . .	354
15.4. Достоинства и недостатки стандарта NIM . . . . .	355
15.5. Стандарт САМАС и его базовые положения . . . . .	357
Механические параметры стандарта САМАС . . . . .	358
Источники питания в стандарте САМАС и их параметры . . . . .	359
Сигналы стандарта САМАС . . . . .	360
15.6. Магистраль САМАС и ее структура . . . . .	361
15.7. Операции на магистрали САМАС . . . . .	363
15.8. Недостатки САМАС и развитие измерительных систем . . . . .	364
Контрольные вопросы . . . . .	365

Список литературы . . . . .	366
-----------------------------	-----

Предметный указатель . . . . .	368
--------------------------------	-----

*Василий Георгиевич ДЕМЕНКОВ*

*Павел Васильевич ДЕМЕНКОВ*

## **НАЧАЛА ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

*Учебное пособие*

Зав. редакцией  
физико-математической литературы *Н. Р. Крамор*  
Ответственный редактор *С. В. Макаров*  
Корректор *Т. А. Кошелева*  
Подготовка иллюстраций *А. П. Маркова*  
Верстка *Е. Е. Егорова*  
Выпускающие *Н. А. Крылова, Т. С. Симонова*

ЛР № 065466 от 21.10.97  
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10  
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

**Издательство «ЛАНЬ»**

lan@lanbook.ru; www.lanbook.com  
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А.  
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.  
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 21.08.15.  
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108<sup>1/32</sup>.  
Печать офсетная. Усл. п. л. 20,16. Тираж 200 экз.

Заказ № .

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинал-макета.  
в ПАО «Т8 Издательские Технологии».  
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.