

0-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

На правах рукописи

ОСТАПЕНКО Анатолий Антонович

АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА
ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРОВ
ИЗЛУЧЕНИЙ

(05.11.10. Приборы для измерения ионизирующих
излучений и рентгеновские приборы)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Д У Б Н А - 1 9 7 4

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

На правах рукописи

ОСТАПЕНКО Анатолий Антонович

АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ

СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЙ

(05.11.10. Приборы для измерения ионизирующих
излучений и рентгеновские приборы)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Дубна - 1974

Работа выполнена в Институте ядерных исследований АН УССР

Научный руководитель - доктор технических наук

Р.Г.Оффенгенден

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Б.И.Хазанов

кандидат технических наук

В.Г.Тишин

Оппонирующее научно-исследовательское учреждение -

Ленинградский институт ядерной физики АН СССР им.Б.П.Константинова

Автореферат разослан " " _____ 197

Защита диссертации состоится " " _____ 197

в _____ часов на заседании Объединенного Ученого Совета ДНФ

и ЛЯР ОИЯИ в конференцзале Лаборатории ядерных реакций

(г.Дубна Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Э.Н.Каржавина

- 3 -

В ядерной физике диапазона средних и низких энергий основу экспериментальных методов составляют спектрометры излучений. Задачей спектрометра является измерение с возможно большей точностью энергий частиц /или квантов/ пучка и распределение количества частиц в функции от энергии.

В структуре спектрометров можно выделить следующие основные части; детекторы излучений, устройства усиления, формирования и отбора сигналов, аналого-цифровые преобразователи и накопительные устройства.

В спектрометрах указанного диапазона энергий преимущественное применение находят детекторы, реагирующие на попадание в них частиц электрическим сигналом, обычно коротким импульсом тока. Эти сигналы и несут информацию об исследуемом излучении.

Специальное электронное оборудование осуществляет усиление, формирование, обработку и отбор этих сигналов и обеспечивает повышение уровня сигналов, оптимальное согласование с источником сигналов, например, получение максимального отношения сигнал/шум, а также выделение полезных сигналов и режекцию фона. Отобранная информация после преобразования из аналоговой в цифровую форму поступает на накопительные устройства.

Стремление к увеличению объема информации, накапливаемой в течение эксперимента, привело к разработке детекторов с высоким разрешением, использованию многодетекторных установок, а также быстродействующих накопительных устройств. В свою очередь существенно возросли требования и к устройствам, связывающим детекторы с накопительными устройствами.

Цель работы, выполняемой автором, начиная с 1965 года, и положенной в основу реферируемой диссертации, заключалась в разра-

ботке электронной аппаратуры для усиления, формирования, обработки и отбора сигналов с детекторов ионизирующих излучений и предназначенной для построения спектрометров излучений, использующих амплитудный анализ, в физических экспериментах Института ядерных исследований АН УССР.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, в которых проводится анализ погрешностей, сравнение характеристик известных методов построения отдельных узлов спектрометров, а также описываются оригинальные устройства, разработанные автором, и приводятся методики и результаты их экспериментального исследования.

В первой главе рассматриваются вопросы, связанные с усилением и формированием сигналов от детекторов частиц. Подчеркивается, что спектрометрический усилитель является тем узлом спектрометра, в котором концентрируется преимущественная часть погрешностей. Поэтому оптимально сконструированная усилительная система во многом способствует реализации разрешающей способности спектрометров на уровне, определяемом детектором частиц.

Проанализированы погрешности, связанные с шумами во входных цепях, наложениями сигналов, флуктуациями времени сбора заряда в детекторе, непостоянством опорного /нулевого/ уровня и рабочих точек усилительных каскадов, реакцией на перегружающее воздействие, наводками, фоном и микрофонным эффектом, а также нестабильностью коэффициента усиления усилительных секций.

Погрешность, связанная с шумами, в основном уменьшается за счет применения маломощных усилительных элементов в головных каскадах. В настоящее время наилучшие результаты получены использованием для этой цели полевых транзисторов.

Что касается формы переходной характеристики усилителя, то она ответственна не только за отношение сигнала к шуму, но и за погрешности, связанные с наложениями, флуктуациями времени сбора заряда и нулевого уровня и, хотя в меньшей степени, с другими типами погрешностей. Сравнение восьми типов фильтров из линейных компонент показывает, что значительного различия в их характеристиках не наблюдается. Более того, переходная характеристика, обеспечивающая лучшее отношение сигнала к шуму является далеко не оптимальной по отношению к другим погрешностям.

Большое различие условий физического эксперимента в смысле требований к разрешающей способности, скорости счета, типов используемых детекторов, а также стремление использовать для всех экспериментов унифицированную усилительную систему требовало применения в ней простого и легко перестраиваемого фильтра. Без особого ущерба для всех погрешностей таким оказывается резистивно-емкостной $RC-CR$ фильтр.

Для данного типа фильтра автором рассчитаны зависимости разрешающей способности от постоянной времени τ фильтра при различных значениях величины входной емкости для одного из вариантов входных каскадов.

Приведены расчеты характеристик распределения амплитуд импульсов на выходе $RC-CR$ фильтра при воздействии на него статистической последовательности сигналов с нормальным распределением амплитуд $1/\sigma, 5/1$. Получены зависимости сдвига среднего значения и дисперсии выходного распределения в функции от $N\sigma\tau$ и асимметрии и эксцесса в функции от $N\sigma\tau/\delta$ и $N\sigma\tau/\delta^2$, здесь N - интенсивность входных сигналов, $\delta = \sigma/\sigma_m$.

Кроме того, рассчитана номограмма для оценки погрешности, свя-

зависимости "баллистической" ошибки $\epsilon = f(\tau)$ при различных значениях τ_0 , как параметра / τ_0 - время собирания заряда/. Полученные зависимости позволяют оценить величину постоянной времени фильтра усилителя для конкретного физического эксперимента.

Большое внимание уделено погрешности, связанной с флуктуациями нулевого уровня, обусловленными суперпозицией медленных компонент /хвостов/ переходной характеристики. Указывается на трудность построения усилительного тракта с переходной характеристикой не содержащей низкочастотных полюсов и нулей. Приводится расчет среднего значения и дисперсии нулевого уровня для переходной CR - цепи с постоянной времени T при воздействии прямоугольных импульсов с постоянной амплитудой A_m и длительностью t_u статистически распределенных во времени с постоянной скоростью счета N_0 .

$$M_u = A_m N_0 t_u$$

$$D_u = A_m^2 N_0 t_u / 2T$$

Производится сравнение методов уменьшения этой погрешности: биполяризация сигнала, метода компенсации полюса нулем, восстановления нулевого уровня и применения гальванической связи всего усилительного тракта, нулевой уровень в котором стабилизируется вспомогательной цепью отрицательной обратной связи из дифференциального усилителя-ограничителя и интегрирующего фильтра с большой постоянной времени.

Рассматриваются достоинства и ограничения этих методов. Указывается, что последний метод является наиболее эффективным, так как, помимо восстановления нулевого уровня, он обеспечивает жесткую фиксацию режимов усилительных каскадов, существенно уменьшая погрешности, связанные с флуктуациями рабочих точек каскадов. Сущ-

ность этого метода заключается в том, что благодаря ограничению выходные сигналы основного усилителя проникают в цепь стабилизации значительно ослабленными, что в первом приближении эквивалентно размыканию цепи отрицательной обратной связи на время действия выходного сигнала. После его окончания происходит быстрое, стимулированное отрицательной обратной связью, восстановление нулевого уровня. Фактор обратной связи в этом случае равен произведению коэффициентов усиления основного и вспомогательного усилителей / I /.

Флуктуации рабочих точек могут иметь место не только в конечных, а и в предварительных каскадах. Особенно уязвимым в этом отношении является выходной каскад предварительного усилителя, работающий на согласованный кабель. Автором предложена схема выходной цепи предварительного усилителя, которая позволяет существенно уменьшить флуктуации тока через выходной эмиттерный повторитель за счет предварительного укорочения сигналов, перед передачей в нагрузку.

При рассмотрении перегружающих воздействий, а также фона и низкочастотных пульсаций отмечено, что их влияние существенно зависит от места расположения укорачивающей / дифференцирующей / цепи в усилительном тракте. Автором предложено получать переходную характеристику, соответствующую дифференцирующему звену, за счет цепи отрицательной обратной связи первой усилительной секции, что является весьма удачным компромиссом с точки зрения уменьшения обеих погрешностей

Размещение оборудования в физическом эксперименте таково, что предварительный и главный усилители, образующие усилительную систему, разделены значительным расстоянием, достигающим сотен мет-

ров. Соединительные кабели сильно подвержены действию наводок и уравнительных токов. Повышение уровня сигналов на передающем конце, расположение формирующих цепей в главном усилителе, а также подавление помех за счет дифференциального входа главного усилителя - все эти меры позволяют существенно уменьшить паразитные сигналы.

Нестабильность коэффициента усиления усилительного тракта является существенной погрешностью, особенно при продолжительных экспериментах. Опыт работы со спектрометрическими усилителями показывает, что основная причина неустойчивости связана с температурной зависимостью коэффициента усиления. Временной дрейф и неустойчивость источников питания, обычно, менее существенны.

В диссертации автором предпринята попытка провести анализ температурной неустойчивости секций спектрометрических усилителей с помощью ЭВМ, который по сравнению с аналитическими методами обладает рядом преимуществ:

1. ЭВМ не нуждается в упрощении задачи для облегчения решения;
2. ЭВМ обеспечивает высокую точность расчета при малой затрате времени;
3. ЭВМ дает возможность оценки большого числа параметров на характеристики схемы;
4. Результаты анализа получаются в наглядной форме.

При анализе использовались следующие особенности транзисторных спектрометрических усилителей:

- а/ полоса пропускания их определяется формирующими цепями, а не собственным временем нарастания;
- б/ секции имеют глубокую отрицательную обратную связь по переменному току и обычно не менее глубокую по постоянному току.

Это позволило, во-первых, учитывать лишь низкочастотные параметры транзисторов, и, во-вторых, пренебречь неустойчивостью рабочих точек транзисторов, а использовать лишь непосредственную зависимость их параметров от температуры.

Программа для ЭВМ составлена таким образом, что вначале вычисляются характеристики схемы для исходных значений параметров. Затем поочередно каждый из параметров получает приращение, а остальные параметры поддерживаются неизменными. Таким образом, определяется частная производная характеристика схемы / например, коэффициента усиления / по выбранному параметру или, другими словами, чувствительность ее к значению того или иного параметра. После этого все параметры схемы одновременно получают приращение, что соответствует реальному случаю, и определяются соответствующие изменения характеристик схемы.

Для двух вариантов транзисторных контуров проведены расчеты стабильности коэффициентов усиления и входных-выходных сопротивлений. В диссертации приведены таблицы чувствительности коэффициента усиления по отношению к изменениям h - параметров транзисторов и пассивных элементов. Общие температурные коэффициенты секций получены соответственно равными $1.1 \cdot 10^{-4}/\text{град}$ и $0.36 \cdot 10^{-4}/\text{град}$ для двух схем соответственно.

Результаты расчетов находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными измерениями.

В заключение первой главы приводится описание практической усилительной системы, разработанной автором / I /. Она состоит из блоков предварительного и главного усилителей, представляющих, тем не менее, единый усилительный тракт. При сравнительной простоте он обладает существенными достоинствами: I/ полная гальвани-

ческая связь как каскадов секций, так и всего усилительного тракта ; 2/ стабилизация нулевого уровня, охватывающая усилительный тракт ; 3/ возможность компенсации "хвоста" переходной характеристики /метод компенсации полуса нулем/ ; 4/ малый уровень шумов и фона ; 5/ высокая перегрузочная способность ; 6/ наличие на входе системы подавления синфазных помех ; 7/ высокая линейность и стабильность амплитудной характеристики. Приведено описание особенностей функциональных и принципиальных схем, технические характеристики, осциллограммы, характеризующие работу усилителя, а также фотографии конструкций.

Вопросам отбора и обработки сигналов, прошедших усилительный тракт, посвящена вторая глава диссертации. Рассмотрены методы построения линейно-пропускающих устройств, усилителей со смещением, дифференциальных дискриминаторов, смесителей и сумматоров, расширителей и описаны реальные устройства, разработанные автором.

Линейно-пропускающее устройство /ЛПУ/, является неотъемлемой частью кодировщика амплитудного анализатора, находит во многих экспериментах самостоятельное применение для отбора линейных сигналов, существенно уменьшая скорости счета в последующих за ним цепях. Основу устройства составляет линейный клапан /ключ/. Клапан на насыщенных транзисторах в виде последовательно-параллельного ключа находит широкое применение / 2 /. В то же время оказалось возможным построение клапана без использования режима насыщения. Автором предложен линейный клапан, выполненный на паре дифференциальных каскадов, управляемых токовым переключателем, причем вся схема охватывается глубокой отрицательной обратной связью / 3 /. Глубокая отрицательная обратная связь обеспечивает высокую линейность и стабильность схемы. Полная ее симметрия позволяет получить ма-

лый дрейф "пьедестала" и незначительное пролезание управляющего сигнала в выходную цепь. На основе такого клапана разработан блок линейно-пропускающего устройства. В его состав входят также активный восстановитель нулевого уровня, позволяющий работу при емкостной связи с источником сигналов и при высокой скорости счета, согласованная линия задержки и формирователь управляющих сигналов.

В некоторых случаях величина задержки в блоке ЛПУ оказывается недостаточной для правильной фазировки линейного и управляющего сигналов. В этом случае блок ЛПУ может использоваться с блоком усилителя с задержкой /УЗ/. Автором разработана схема блока задержки, состоящая из двух инвертирующих операционных усилителей и двух линий задержек, тщательно согласованных на обоих концах. Нулевой уровень усилителя стабилизируется по уже описанному методу с помощью вспомогательного дифференциального усилителя. Величина задержек может устанавливаться в диапазоне 0 - 3 мксек.

Усилители со смещением /экспандеры/ используются для растяжки участка амплитудного спектра, существенно увеличивая разрешающую способность амплитудного анализатора с небольшим количеством каналов.

Наибольшее распространение получили экспандеры, включаемые в спектрометрический тракт после усилителя. Функционально они состоят из схемы отсекающей фиксированной части входного сигнала и линейной передачи его вершины с последующим усилением. Автору удалось существенно улучшить характеристики двухдиодной схемы отсеки. В диссертации приведены расчеты протяженности нелинейных участков для простой двухдиодной схемы и схемы, в которой диод охвачен отрицательной обратной связью через усилители тока. И

расчеты и экспериментальная проверка подтверждают резкое сокращение нелинейного учета амплитудной характеристики за счет введения отрицательной обратной связи / 4,5 /.

На основе улучшенной схемы линейной отсечки разработан блок экспандера. В его состав входят расширитель импульсов, управляемый дискриминатором, схема отсечки и усилитель с коэффициентом усиления $I \pm 10$. Величина отсечки регулируется грубо и плавно в диапазоне $0,1 \pm 10$ в. Расширение импульсов перед отсечкой улучшает дифференциальную нелинейность экспандера в начале амплитудной характеристики.

Амплитудный дискриминатор является одним из наиболее распространенных элементов в спектрометрической аппаратуре. В экспериментах, проводимых в ИИИ АН УССР, его основным назначением является работа совместно с блоком ЛПУ в амплитудном селекторе. Основным элементом дискриминатора является устройство фиксирующее превышение сигналом заданного уровня.

В разработанном автором и описываемом в диссертации блоке дифференциального дискриминатора /ДД/ в качестве такого элемента используется дифференциальный усилитель - компаратор ДУК, выход которого гальванически связан с одновибратором / 6 /. Всего имеется три идентичных схемы ДУК. Два из них определяют верхний уровень, а третий уровень временной привязки и шумовой уровень. Пороги дискриминатора получены четкими и весьма стабильными. С источником сигналов предусмотрена связь через емкость с использованием восстановителя нулевого уровня. Отмечается, что применение в схемах ДУК операционных усилителей в интегральном исполнении позволяет существенно улучшить характеристики дискриминатора.

Линейное суммирование аналоговых сигналов часто используется в γ - спектроскопии и в экспериментах с идентификацией заряженных частиц. Автором разработан блок линейного суммирования /ЛС/ на инвертирующих секциях операционных усилителей с глубокой отрицательной обратной связью. Применение двух операционных усилителей позволило расширить функциональные возможности блока. Он может производить суммирование сигналов обеих полярностей в диапазоне амплитуд 0 ± 10 в, а также использоваться в качестве инвертора.

В экспериментах с большим количеством детекторов перед подачей сигналов на АЦП многоканального анализатора требуется произвести смешивание сигналов с предварительным кодированием номера детектора.

В некоторых случаях для этой цели можно использовать блок ЛС. Недостатком такого метода смешивания является, в первую очередь, суммирование шумов и всякого рода помех, имеющих место в каждом входном канале до смешивания. Если принять, что уровень шумов в каждом канале одинаков, то после смешивания его среднеквадратичное значение возрастает в фактор \sqrt{N} . Еще хуже обстоит дело с синфазными наводками, уровень которых возрастает пропорционально N (N - число смешиваемых каналов). Это приводит к ухудшению отношения сигнал/шум на выходе смесителя и, соответственно, к уширению спектральных линий. Кроме того, при смешивании сигналов общая частотная нагрузка

$$R_0 = \sum_{i=1}^N R_i$$

где R_i - частотная нагрузка i - ого входа.

спектрометров в целом и испытания ее в реальных экспериментах. Это во многом объясняется тем, что имитация реального режима работы для такой аппаратуры затруднена, а иногда и практически невозможна. Экспериментальному исследованию основных характеристик электронной аппаратуры посвящена третья глава диссертации.

Линейность характеристик передачи входная - выходная величина является важной характеристикой спектрометрической аппаратуры. Принято при этом различать интегральную и дифференциальную нелинейности, как меру отклонения передаточной характеристики от прямой линии.

Известно, что измерение дифференциальной нелинейности дает более точное представление о передаточной характеристике спектрометра. Это связано с тем, что, давая информацию о монотонном изменении коэффициента передачи, кривая дифференциальной нелинейности содержит информацию и о флуктуациях ширины канала спектрометра, которые могут появляться, например, в устройствах с глубокой отрицательной обратной связью, теряющих устойчивость при некоторых уровнях сигнала, в кодировщиках и нелинейным кодированием и др.

Для измерения дифференциальной нелинейности спектрометрической аппаратуры разработан генератор импульсов с равномерным спектром. Генератор вырабатывает импульсы в диапазоне амплитуд 0 - 10 в за счет стробирования линейно-изменяющегося напряжения треугольной формы с помощью транзисторного прерывателя / 2 /. Формирователь треугольного напряжения представляет собой интегратор с большим фактором обратной связи. Нелинейность начальных участков напряжения треугольной формы удалось исключить схемным путем. Нелинейность, связанная с конечным сопротивлением утечки интегрирующего конденсатора, на прямом и обратном ходе треуголь-

ного напряжения компенсируются автоматически, если оно симметрично относительно вершины.

Общая дифференциальная нелинейность генератора импульсов, включая и линейный клапан, выполненный по принципу описанному выше, получена равной $\pm 0,25\%$ в 98 % амплитудного диапазона анализатора *МТА - 512*. С помощью этого генератора были проведены измерения дифференциальной нелинейности разработанных блоков. Во всех типах блоков получена величина дифференциальной нелинейности менее 1 %, кроме блока ЛПУ, в котором ее величина слегка превышает 1 %. Кроме того, с помощью генератора была измерена дифференциальная нелинейность спектрометра с *Ge(Li)* детектором. Результаты измерений сравнивались с теми, которые получены при измерении интегральной нелинейности спектрометра по опорным линиям, и получено удовлетворительное соответствие между обоими экспериментами.

Разрешающая способность спектрометрического тракта при малой скорости счета в основном определяется шумами предварительного усилителя. Кроме того ухудшение разрешения может быть вызвано проникновением в усилительный тракт помех, микрофонным эффектом.

Блок-схема экспериментальной методики для измерения этой погрешности построена на основе *Ge(Li)* детектора. Кроме величины разрешающей способности, установка позволяет измерять ее зависимость от величины входной емкости и постоянной времени фильтра главного усилителя. Зависимости полезно использовать для оценки спектрального состава шума. При малой скорости счета получено разрешение $2,0 \pm 0,04$ Сты /Кэв/.

Условие малости скорости счета выполняется, если $n_{\sigma} \ll 5$.

где N_0 - скорость счета, τ - постоянная времени RC-CR-фильтра, а δ - разрешающая способность, определяемая детектором частиц и шумами входного каскада. При повышении частотной загрузки, начинает оказываться зависимость разрешающей способности от скорости счета.

Автором измерена эта зависимость при различных видах связи главного усилителя с линейными воротами. Результаты экспериментального исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При скоростях счета, удовлетворяющих соотношению $N\tau \leq \delta$, вполне допустима емкостная связь между блоками главного усилителя и линейно-пропускающего устройства.

2. Пассивный восстановитель следует использовать лишь до скорости счета $N\tau \leq 2 + 3\delta$, при этом уширение пиков и сдвиг их по измерительной шкале пренебрежимо малы.

3. При более высоких скоростях счета $N\tau \leq 5\delta$ необходимо использование активного восстановителя нулевого уровня или, если это возможно, гальваническую связь между главным усилителем и линейными воротами.

4. Для сохранения разрешающей способности при нагрузках превышающих $N\tau \geq 5\delta$ восстановления нулевого уровня недостаточно. В этом случае необходимо применение системы режекции наложений, так как погрешность, связанная с наложениями, превращается в доминирующую.

5. При постоянной времени τ фильтра 1 мксек разрешение спектрометра на уровне, определяемом детектором частиц, можно поддерживать вплоть до нагрузок 10^5 имп/сек.

В диссертации приведены также зависимости разрешающей спо-

собности спектрометра от степени амплитудно-частотной перегрузки, которые свидетельствуют о высокой устойчивости усилительного тракта к перегружающим воздействиям, что обусловлено применением гальванических связей, дифференциальных входных каскадов секций и метода компенсации полюса нулем.

Экспериментальной проверке подвергается температурная стабильность элементов спектрометрического тракта. Как известно, измерение температурной зависимости аналоговых устройств повышенной точности является довольно трудным экспериментом. Это связано, в первую очередь, с тем, что переходные процессы, связанные с установлением температуры, проходят с большими постоянными времени, в течение которых может произойти существенный дрейф опорных сигналов и измерительного оборудования. Кроме того, временной дрейф испытываемого устройства маскирует температурную зависимость.

Путем введения контрольных измерений и расширения температурного диапазона $+5 \pm +45^\circ\text{C}$ удалось получить температурные зависимости с высокой точностью и повторяемостью. Результаты измерений приведены в нижеприведенной таблице.

Как видно из таблицы, дрейф коэффициентов передачи, как правило, не превышает $0,01\%$ /град, за исключением блока линейных ворот, в котором зарегистрирован дрейф $0,02\%$ /град. Дрейф нулевых уровней, отсечек и пьедесталов в блоках практически всегда меньше 1 мв/град. Полученные результаты стабильности электронной аппаратуры обязаны тщательному выполнению схем блоков: большому фактору отрицательной обратной связи в измерительных цепях, применению пассивных элементов с малыми и согласованными температурными коэффициентами, а также симметрии и взаимной ком-

Тип блока	вз.	д р е й ф	
		усиления %/град	нул. уровня мв/град
Предусилитель	1	0.0088	-
	2	0.0081	-
Главный усилитель	1	0.0091	0.28
	2	0.0035	0.26
Линейный смеситель	1	0.0078	-
	2	0.0023	-
Экспандер	1	0.012	0.73
	2	0.0056	1.22
Линейные ворота	1	-0.018	0.72
	2	-0.023	0.32
Дискриминатор 1	1	-	0.15
	2	-	0.86
Дискриминатор 2	1	-	0.21
	2	-	0.64

пенсации р-п - переходов в схемах, определяющих пороги и нулевые уровни.

В заключение третьей главы приведены блок-схемы спектрометров заряженных частиц, построенные на основе описанных электронных блоков. Аппаратура успешно эксплуатируется в экспериментах Института ядерных исследований АН УССР. На некоторых спектрометрах уже получены физические результаты / 9, 10 /.

Основные результаты работы, составивших основу данной диссертации, могут быть классифицированы как следующие :

1. Проанализированы погрешности усилительного спектрометрического тракта, связанные с шумами входных цепей, взаимными наложениями сигналов, флуктуациями нулевого уровня и рабочих то-

чек усилительных каскадов, флуктуациями времени собирания зарядов в детекторе, перегружающими воздействиями, наводками и фоном, а также температурной зависимостью коэффициента усиления.

2. Для усилителя с RC-CR - фильтром рассчитаны : зависимости разрешающей способности, связанной с шумами входной цепи в функции от постоянной времени фильтра и величины входной емкости ; зависимости разрешающей способности и формы спектральной линии от частотной загрузки ; зависимости "баллистической" ошибки от постоянной времени фильтра.

3. Отлажена программа для ЭВМ для анализа температурной неустойчивости линейных усилителей и проведены расчеты для двух типов четырехтранзисторных усилительных секций.

4. Разработана практическая усилительная система из блоков предварительного и главного усилителя, в которой применена стабилизация нулевого уровня вспомогательной цепи из ограничителя и интегрирующего фильтра. Удачное расположение формирующих цепей улучшает многие характеристики усилителя.

5. На основе новой схемы линейного клапана, в котором переключающийся элемент охвачен контуром отрицательной обратной связи, построен блок линейно-пропускающего устройства.

6. Улучшены характеристики двухдиодной схемы линейной отсечки с точки зрения линейности амплитудной характеристики. На основе этой схемы разработан блок экспандера.

7. Рассмотрены методы линейного суммирования и смешивания аналоговых сигналов. Предложена схема смешивания со стробированием, в которой отсутствует взаимное влияние смешиваемых каналов.

8. Разработано устройство для идентификации заряженных частиц на основе аналогового вычислителя, в котором производится

возведения в дробную степень величин амплитуд сигналов. Аналоговый вычислитель построен на одном функциональном преобразователе.

9. Разработаны блоки : усилителя с задержкой, расширителя импульсов, дифференциального дискриминатора и устройства медленных совпадений.

10. Разработан генератор импульсов с линейной огибающей и транзисторным прерывателем, и на его основе построена методика измерения дифференциальной нелинейности спектрометров и их узлов. Произведены измерения дифференциальной нелинейности реальных блоков. Дифференциальная нелинейность их не превышает 1 % в 98 % амплитудного диапазона.

11. Измерена зависимость разрешающей способности и формы спектральной линии от частотных нагрузок и амплитудных перегрузок. Работоспособность аппаратуры экспериментально подтверждена до нагрузок $0,5 \pm 1,0 \cdot 10^5$ имп/сек.

12. Создана экспериментальная установка и измерены температурные зависимости коэффициентов усиления блоков, дрейф уровней отсечек, пьедесталов и уровней дискриминации. Получены температурные коэффициенты усиления не хуже $2 \cdot 10^{-4}$ /град и дрейфы нулевых уровней менее 1 мв/град.

13. Разработан блок входного устройства амплитудного анализатора АИМА-10⁶.

14. Разработанные устройства внедрены в производство и в настоящее время на опытных предприятиях АН УССР выпущены большие партии блоков, которые нашли широкое применение в физических экспериментах Института ядерных исследований.

Материалы диссертации докладывались на У симпозиуме по ядер-

ной электронике /Алушта, 1968 г./, XX и XXII совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра /Ленинград, 1970 г. и Киев, 1972 г./, на Республиканской конференции по научному приборостроению /Киев, 1973 г./ и опубликованы в работах автора /I-10/.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Р.Г.Офенгенден, А.А. Остапенко. Приборы и техника эксперимента, 1971, № 2, 115.
2. Р.Г.Офенгенден, В.З. Серман, А.А. Остапенко, Н.М. Ткач, Д.А. Вознюк. Цифровой измеритель параметров импульсных сигналов, ИТМ и ВТ, Москва, 1968, 31.
3. А.А. Остапенко. Приборы и техника эксперимента, 1971, № 2, 129.
4. А.А. Остапенко, Г.С. Одинец. Приборы и техника эксперимента, 1972, № 6, 95.
5. А.А. Остапенко, Г.С. Одинец. Амплитудный дискриминатор. Авт. свид. № 414728, бюллетень изобр. № 5, 1974, 187.
6. Р.Г. Офенгенден, А.А. Остапенко, Г.С. Одинец, Н.И. Бортник. Входное устройство анализатора для измерения нескольких спектров. Препринт, ИФ АН УССР.
7. Р.Г.Офенгенден, В.А. Кисурич, В.И. Копачев, А.А. Остапенко, П.Т. Шмарин, А.М. Шур. Тезисы докладов XXII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. 1972, Киев, 59.
8. О.М. Андреев, Р.Г.Офенгенден, А.А. Остапенко. Материалы У симпозиума по ядерной электронике. Алушта, 1968, 218, СИЯИ, Дубна.
9. В.Г. Егосин, А.А. Остапенко, Л.С. Салтыков, В.А. Сенюшко. Тезисы докладов XXII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Киев, 1972, 71.
10. В.Г. Гончар, В.А. Кисурич, В.Н. Полянский, О.Ф. Немец, А.А. Остапенко, Р.Г.Офенгенден, Ю.С. Стрык. Программа и тезисы докладов XX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ленинград, 1970, ч. II, 276.