

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

И - 266

ИГНАТЬЕВ Олег Валентинович

"ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ФОРМИРУЮЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ
СПЕКТРОМЕТРОВ С ППД РЕНТГЕНОВСКОГО И МЯГКОГО ГАММА-
ИЗЛУЧЕНИЙ".

(Специальность 05.11.10 - Приборы для измерения
ионизирующих излучений и рентгеновские приборы)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна - 1980.

Работа выполнена в Уральском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте им. С.М.Нирова (г.Свердловск).

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Ю.К.Акимов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

А.П.Цитович

кандидат технических наук

В.Г.Субботин

Ведущая организация - Институт ядерной физики СО АН СССР (г.Новосибирск)

Защита состоится "6" февраля 1980 года в 12³⁰ часов на заседании специализированного совета Д.047.01.05 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Лаборатории ядерных реакций и Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований по адресу: г.Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "19" декабря 1980 года

Ученый секретарь специализированного совета

Ю.В.ТАРАН

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Широкое распространение спектрометров с ПЦД рентгеновского и мягкого гамма-излучений обусловлено свойственным им высоким энергетическим разрешением, типичные значения которого в настоящее время 150÷250 эв. Наряду с применениями таких спектрометров для задач ядерной физики в последнее время резко возрос интерес к ним в связи с развитием прикладных исследований и в первую очередь в области X-флуоресцентного элементного анализа, широко применяемого в промышленности, геологии, медицине, контроле загрязненности окружающей среды, криминалистике, биологии и т.д. При этом для повышения точности измерений исключительно важно увеличивать скорость набора статистики, что ограничивается загрузочной способностью спектрометрического тракта и прежде всего свойствами используемых формирующих спектрометрических усилителей, анализу и разработке которых и посвящена настоящая диссертация.

Цель и задача работ, составивших диссертацию, заключалась в исследовании принципиальных возможностей различных спектрометрических формирователей и устройств стабилизации исходного уровня и разработке на этой основе спектрометрических усилителей, которые бы преимущественно за счет структурных усовершенствований обладали возможно более высокой загрузочной способностью при сохранении на высоком уровне остальных параметров.

Научная новизна и значимость диссертации заключается в том, что:

1) определены важнейшие параметры, позволяющие с единых позиций характеризовать шумовые и загрузочные свойства спектрометра с любым типом формирователя, а также взаимосвязь этих свойств для время-инвариантных и время-зависимых систем;

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

2) разработаны и исследованы устройства дифференцирования спектрометрических импульсов на линиях задержки и ряд фильтров, превосходящих по основным параметрам широко используемые в отечественной и зарубежной практике;

3) предложена единая классификация устройств стабилизации исходного уровня (УСИУ), проанализированы принципиальные особенности разных групп и указаны перспективные из них для использования в прецизионных спектрометрах мягкого γ - и X -излучений.

Кроме того:

а) экспериментальным путем по предложенной автором методике проведены сравнительные исследования характеристик, устройств стабилизации исходного уровня линейного время-зависимого и нелинейного типов в зависимости от места расположения в формирующем спектрометрическом усилителе;

б) предложена эквивалентная линейная время-зависимая схема для нелинейных устройств стабилизации исходного уровня и получена соответствующая весовая функция, более точно отражающая особенности стабилизаторов этого класса и позволяющая достаточно корректно сравнивать нелинейные и линейные устройства стабилизации;

в) исследованы конкретные структуры устройств стабилизации уровня и предложены усовершенствования, позволяющие реализовать предельные параметры.

4) Сформулирован общий признак, позволяющий предсказывать наличие зависимости уровня шума в момент измерения амплитуды импульса на выходе формирующего усилителя от частоты поступления входных сигналов, а также предложена методика измерения вкладов различных источников шума в энергетическое разрешение спектрометра при наличии указанной зависимости;

5) разработаны и исследованы спектрометрические усилители с формирователями на основе серийных линий задержки и перспективными

типами УСИУ; усилители обладают более высокой загрузочной способностью, чем известные и способны работать совместно с любым типом ПД - блока детектирования X -излучения.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что разработанные и внедренные в практику научных исследований формирующие спектрометрические усилители значительно повысили точность и экспрессность измерений X -излучений, проводимых с помощью спектрометра с ПД. Так максимальная статистическая загрузка по входу аналогового процессора достигает $2 \cdot 10^5$ имп/с; одновременно максимум загрузки по выходу оказывается примерно втрое выше, чем для традиционных квазигауссовских формирующих спектрометрических усилителей. Последнее характерно и для других ранее разработанных автором спектрометрических усилителей, внедренных в проблемной научно-исследовательской электрофизической лаборатории УПИ им. С.М. Кирова (г. Свердловск), Центральной заводской лаборатории Пышминского опытного завода Государственного института редких металлов (г. Верхняя Пышма), Ленинградском научно-производственном объединении "Буревестник". Аналоговый процессор принят к серийному производству ЛНПО "Буревестник", г. Ленинград.

Ряд устройств стабилизации исходного уровня используются как составные части вновь разрабатываемой на кафедре экспериментальной физики УПИ им. С.М. Кирова ядерно-физической аппаратуры.

Предложенные автором методики исследований спектрометрических усилителей позволяют корректно оценивать важнейшие свойства вновь разрабатываемых спектрометрических систем и сокращают трудоемкость проведения их исследований.

Апробация. Основные материалы, составившие диссертацию, докладывались на совещании по полупроводниковым детекторам ионизирующих излучений (Киев, октябрь 1978г.), Всесоюзном совещании "50 лет

отечественного рентгеновского приборостроения" и XII Всесоюзном совещании по рентгеновской спектроскопии (Ленинград, сентябрь, 1978г.); XXV совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ташкент, март 1977г.), У Научно-технической конференции УПИ (Свердловск, 1976), опубликованы в 3-х описаниях к авторским свидетельствам, 7-ми статьях, 4-х тезисах докладов, 4-х отчетах о научно-исследовательской работе.

Объем и структура диссертации

Диссертация содержит 195 страниц машинописного текста, в том числе 61 рисунок и 16 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии, содержащей 94 наименования.

Автор защищает:

1. Исследования и разработку устройств дифференцирования спектральных импульсов на линиях задержки и время-зависимых формирователей на основе этих устройств.
2. Исследования и разработку устройств стабилизации исходного уровня.
3. Методики анализа и экспериментального исследования свойств сложных время-зависимых спектральных фильтров.
4. Разработку и исследования формирующих усилителей с повышенной нагрузочной способностью.

Краткое содержание диссертации

Во введении формулируются актуальность проблемы исследований, кратко излагается то новое, что по мнению автора, вносится в избранную тему, а также дается расширенная структура диссертации.

Представленная диссертация основана на материалах исследований и разработок автора, выполненных с 1973 по 1979гг. [1 + 12].

Глава I. Роль формирующего усилителя в спектрометре сводится к реализации предельного энергетического разрешения, определяемого блоком детектирования (ППД, криостат, зарядочувствительный предусилитель) и усилению сигналов до уровня, задаваемого аналого-цифровым преобразователем (АЦП). В последние годы все чаще в состав формирующего усилителя наряду с собственно усилителем и спектрметрическим формирователем включают устройства стабилизации исходного уровня (УСИУ). Особенностью спектрометров рентгеновского излучения является определяющее влияние формирующего усилителя на максимальную статистическую нагрузку из-за преобладающего вклада "последовательного" шума в собственное энергетическое разрешение. Степень подавления шумов блока детектирования (БД) и нагрузочная способность спектрометра в первую очередь определяются типом спектрметрического фильтра, а потребность в УСИУ обусловлена неидеальностью элементов фильтра и линейного усилителя. УСИУ также являются фильтрами (нелинейными либо время-зависимыми) и существенно влияют на степень подавления шума и максимальную статистическую нагрузку.

Проведенный анализ способов описания спектрметрических фильтров и взаимосвязи важнейших их характеристик показывает, что исчерпывающую информацию о принципиальных свойствах формирователей в общем случае содержат следующие параметры:

- 1) форма и временной масштаб весовой функции и связанное с ними значение коэффициента превышения шума ($K_{п.ш.}$);
- 2) степень подавления "1/f" - шума;
- 3) зависимость весовой функции (а значит и $K_{п.ш.}$) от интервалов времени между предыдущим и последующим спектрметрическими импульсами;
- 4) длительность спектрметрического импульса $T_{имп.}$. Для опи-

сания полностью время-инвариантных систем достаточно знать первые два параметра.

Анализ конкретных структурных схем известных спектрометрических формирователей [I] выполнен, в основном, по наиболее интересным фильтрам, обеспечивающим коэффициент превышения шума и длительность спектрометрического импульса меньше, чем для квазигауссовских формирователей ($K_{п.ш.} = 1,18 \div 1,14$; $T_{имп}/0,1\tau_0 = 6,4 \div 4,7$, где τ_0 - оптимальная постоянная времени формирования простого $[CR + RC]$ - фильтра).

Среди время-инвариантных фильтров наибольший интерес представляют содержащие в своей основе узлы дифференцирования на линиях задержки. В принципе такие формирователи могут обеспечивать $K_{п.ш.} \geq 1,035$ и $T_{имп} \geq 2,58 \tau_0$, однако, эти фильтры не получили широкого распространения из-за сложностей перестройки времен формирования, согласования с реальными блоками детектирования, низкого качества линий задержки и острой вершины спектрометрического импульса на выходе.

Привлекательность других, время-зависимых, формирователей состоит в том, что характерное для них различие в формах и длительностях весовых функций и спектрометрических импульсов позволяет в ряде случаев получить коэффициент превышения шума предельно близким к единице при существенно меньшей длительности спектрометрического импульса $T_{имп}$ на выходе, чем в соответствующем время-инвариантном аналоге. Однако, в ряде случаев весовая функция спектрометра с время-зависимым фильтром оказывается нестационарной и это приводит к необходимости ограничивать снизу интервал между сигналами, причем такое свойство фильтра неочевидно и требует детального анализа.

Проведенный в главе анализ наиболее общих свойств устройств

устройств стабилизации исходного уровня показывает, что все подобные устройства могут быть классифицированы:

- а) по принципу стабилизации на нелинейные (традиционное название - восстановители постоянной составляющей - ВПС) и линейные время-зависимые стабилизаторы (ВЗС) исходного уровня;
- б) по способу включения элемента памяти (емкость C_b) на последовательные (C_b включена как разделительная емкость) и "охватывающие" (C_b является емкостью интегратора, включенного в цепь обратной связи усилительной секции).

В спектрометрах с ПИД X-излучения могут использоваться все типы УСИУ, однако на их параметры должны быть наложены определенные ограничения: величина постоянной времени УСИУ для подпороговых и шумовых импульсов $\tau_b \gg T_{имп}$; в нелинейных УСИУ фактор асимметрии $A = 1$, а пороги срабатывания должны быть равными и располагаться ниже уровня шума.

Стабильность исходного уровня в усилителе и изменение $K_{п.ш.}$ спектрометра в значительной мере зависят от типа фильтра и места расположения УСИУ (внутри или вне фильтра). Более перспективными в плане стабилизации исходного уровня представляются линейные время-зависимые УСИУ, однако для них характерна нестационарная весовая функция, что приводит к возрастанию уровня шума в спектрометре с ростом загрузки. Вопрос о зависимости весовой функции нелинейных УСИУ от загрузки в литературе не освещен и это не позволяет корректно сравнивать линейные и нелинейные типы УСИУ в отношении влияния их на $K_{п.ш.}$ спектрометра.

Во второй главе рассматриваются проблемы построения устройств дифференцирования (УД) на основе серийных линий задержки (ЛЗ), которые обеспечивали бы униполярный квазипрямоугольный спектрометрический импульс на выходе УД независимо от постоянной

времени спада экспоненциального импульса на входе, а также позволяли бы оперативно перестраивать время формирования.

Все известные способы дифференцирования с помощью ЛЗ, даже в предположении отсутствия потерь в линии, не позволяют получить плоскую вершину сформированного сигнала - всегда существует экспоненциальный спад с постоянной времени, определяемой входным импульсом. Это увеличивает $K_{П.Ш.}$ спектрометра и ограничивает верхнее значение времени дифференцирования. В подобных схемах усложняется перестройка времени формирования и существует гальваническая связь между входом и выходом. От этих недостатков свободны устройства дифференцирования со съемом тока с общей шины ЛЗ на вход изодромного интегратора, построенного на операционном усилителе [2]. Такие схемы обеспечивают прямоугольную форму импульсов независимо от параметров экспоненциального сигнала на входе УД. Отключение согласующего резистора на выходе ЛЗ вдвое увеличивает время дифференцирования.

Реальные линии задержки, построенные на звеньях типа "к" существенно отличаются от идеализированной модели. Им присущи реактивные и активные потери. Влияние первых сказывается на положе пропускания и частотной зависимости времени задержки и волнового сопротивления ρ . При использовании 20-звенных ЛЗ с временем задержки $T_3 = 1$ мкс и $\rho = 600$ ом частотные искажения импульса незначительны. Активные потери в ЛЗ приводят к ослаблению перепадов напряжения в ней по мере распространения. Эти процессы протекают в течение десятых долей T_3 . Они хорошо изучены. Мы наблюдали и более медленные процессы, начинающиеся сразу после прохождения крутого перепада и имеющие продолжительность вдвое большую, чем длительность сформированного импульса. Связаны эти процессы с установлением стационарного состояния в линии и даже

при сигнале на входе УД в виде функции единичного скачка вслед за импульсом на выходе образуется "шлейф" той же полярности, причем тем больший, чем выше омическое сопротивление линии. "Шлейф" вдвое увеличивает длительность спектрометрического импульса, это несущественно, если вслед на УД размещен время-инвариантный RC-интегратор. Устранить "шлейф" можно лишь разомкнув ЛЗ на конце и включив корректирующую емкость C_k на входе. Возрастание заряда на C_k компенсирует перераспределение напряжений между звеньями линии, приводящее к образованию шлейфа (рис. I(a)). Структурная схема широко используемого нами устройства дифференцирования приведена на рис. I(б). Величина C_k не зависит от числа включенных ЛЗ. При временах формирования $T_f \geq 10$ мкс можно использовать линии ЛЗТ-1,0-600-10 или ЛЗТ-2,0-600-20 из-за меньших омических потерь чем в ЛЗТ-1,0-600-20. Особенно перспективны линии типа "т" - ЛЗМ-1,0-600-10. Разработанные схемы УД удовлетворяют предъявляемым к таким устройствам требованиям.

Глава третья отражает исследования и разработки автором устройств стабилизации исходного уровня, охватывающие все основные категории УСИУ: нелинейные (ВПС) и линейные время-зависимые стабилизаторы (БЗС); последовательные и "охватывающие" разновидности тех и других. Предельные параметры конкретных УСИУ достижимы при определенных усложнениях известных схем. Для последовательных ВПС, подобных восстановителю Чейза-Паоло, характерно запаздывание срабатывания и "отпускания" из-за инерционности используемых интегральных операционных усилителей, в итоге скважность $Q \geq 5-10$ на регулярных прямоугольных сигналах. Введение ограничителя в цепи О.О.С. интегрального операционного усилителя или замена последнего на быстрый усилитель - ограничитель на дискретных элементах обеспечили $Q \approx 3$. Основная причина высокой допустимой скважност-

ти в "охватывающих" ВПС заключается в сложности реализации низкочастотного усилителя-ограничителя, размещенного вместе с интегратором в цепи О.О.С. стабилизируемой усилительной секции. Стабильность базовой линии при высоких нагрузках существенно улучшается при использовании нелинейного "охватывающего" УСИУ В.Г.Субботина с компенсацией импульсных составляющих напряжения на входе интегратора. Минимальная скважность при этом определяется используемым вспомогательным последовательным УСИУ.

Линейные время-зависимые УСИУ должны стабилизировать базовую линию спектрометра в принципе лучше, чем нелинейные, так как в них достижимо отсутствие перезаряда емкости C_b во время прохождения сигнала. Однако, сигнал временной привязки для управления ключом в таких устройствах берется из предшествующей им точки усилителя и для стабилизации порога срабатывания используют нелинейные УСИУ. В результате минимальная скважность сигналов в спектрометре вновь определяется ВПС канала временной привязки, хотя стабильность базовой линии при скважностях, больших минимальной, может быть и выше, чем с нелинейными УСИУ в спектрометрическом канале. Перенос точки съема сигнала временной привязки на выход ВЭС сопровождается возникновением "паралича" схемы: из-за возникновения положительной О.С. электронный ключ может находиться в разомкнутом состоянии бесконечно долгое время. Другой источник погрешностей ВЭС - задержка срабатывания схемы управления относительно спектрометрического импульса на входе. Эти погрешности устранены в разработанном автором линейном время-зависимом стабилизаторе [3] (рис.2). "Паралич" устраняется принудительной блокировкой схемы по входу через логическую схему при длительности сигнала компаратора больше установленной; задержка срабатывания компаратора и логики компенсируется линией задержки. Такая схема, обес-

печивающая $Q \ll 1$, используется в составе аналогового процессора при нагрузках свыше 10^5 имп/с.

По разработанной автором методике проведены сравнительные испытания различных комбинаций формирователей и устройств стабилизации: а) $[(L3)_{диф} + ВЭС + (RC)_{инт}^2]$; б) $[(L3)_{диф} + ВПС + (RC)_{инт}^2]$; в) $[(L3)_{диф} + (RC)_{инт}^2 + ВЭС]$; г) $[(L3)_{диф} + (RC)_{инт}^2 + ВПС]$. Во всех случаях выходной сигнал УД на ЛЗ имитировался формирователем прямоугольных импульсов и последующим СР - дифференциатором (имитатор изодромного интегратора). Выходные квазигауссовские импульсы измерялись амплитудным анализатором. Запуск формирователя осуществлялся от ПШД - спектрометра ($T_{форм} = 0,2$ мкс) через одновибратор с фиксированным мертвым временем ($T_{мерт} > T_{диф}$). Из результатов испытаний следует:

1) оптимальной формой сигналов для работы УСИУ любого класса является квазипрямоугольная (комбинации а и б);

2) ухудшение энергетического разрешения при высоких нагрузках минимизируются во всех 4-х случаях с ростом постоянной времени СР -дифференцирующей цепи, т.е. увеличением эквивалентной постоянной времени изодромного интегратора;

3) в обоих случаях взаимного расположения RC -интеграторов и УСИУ время-зависимый стабилизатор обеспечивает меньшее, ухудшение разрешения с ростом нагрузки, чем ВПС (комбинации а и в).

Особо жесткие требования к параметрам стабилизаторов предъявляются при экспоненциальных импульсах. Задача решается при помощи компенсационного "охватывающего" ВЭС с двойным преобразованием формы импульсов в канале компенсации [4].

Известные эквивалентные линейные схемы для нелинейных стабилизаторов ничем не отличаются от используемых при описании ВЭС и не учитывают особенностей ВПС, применяемых в рентгеновских

спектрометрах, в частности, тот факт, что пороги срабатывания лежат существенно ниже уровня шума. Рис.3 иллюстрирует качественное различие в шумовых свойствах ВЭС и ВПС. "Память" ВПС на событие, предшествующее данному, оказывается в τ_c/τ_b раз слабее, чем у ВЭС, в такое же число раз слабее зависимость $K_{п.ш.}$ спектрометра от загрузки. Однако, с ростом загрузки превалируют флуктуации базовой линии, вносимые ВПС даже при строго униполярных сигналах на входе, поэтому при высоких загрузках предпочтительнее линейные время-зависимые стабилизаторы.

Глава четвертая посвящена разработкам спектрометрических усилителей, проведенных автором или при непосредственном его участии в 1973-1977 гг.

Разработка, исследование и эксплуатация время-инвариантных усилителей с фильтрами $[(L3)_{гчф}^2 + (RC)_{инт}^2]$ и $[(L3)_{гчф} + (RC)_{инт}]$ в значительной мере стимулировали разработку прецизионных формирователей на ЛЗ и устройств стабилизации исходного уровня. Так если с первым усилителем, содержащим простейший охватывающий ВПС, достигнута максимальная статистическая нагрузка $5 \cdot 10^3$ имп/с (в режиме однократного дифференцирования) при времени формирования $T_{ф} = 1$ мкс, то во втором [2], благодаря введению изодромного интегратора и УСИУ компенсационного типа нагрузка достигла $2 \cdot 10^4$ имп/с при $T_{ф} = 4$ мкс. В условиях применения нелинейных УСИУ с особой остротой встал вопрос о сокращении длительности по основанию спектрометрических импульсов. Нами был разработан усилитель с интегратором на управляемом сопротивлении полевого транзистора [5,6], обеспечивавший трапецевидную весовую функцию и почти вдвое более короткие импульсы. Даже без компенсации спада импульса на входе ЛЗ была достигнута нагрузка 10^4 имп/с при времени формирования 2 мкс. С фильтром $[(L3)_{гчф} + (RC)_{инт} + K1/с4]$, анализ ко-

торого выполнен в работе [7], спектрометр эксплуатируется при нагрузках до $2 \cdot 10^4$ имп/с ($T_{ф} = 5$ мкс) [8,9]. Весовая функция спектрометра зависит от загрузки, $K_{п.ш.}$ изменяется от I.II до I.I26, а длительность сигнала существенно короче, чем при гауссовском формировании - $(1,35 \tau_c + 0,5 \text{ мкс})$. Такой фильтр один из лучших для фильтрации "1/f" - шума.

Общие недостатки вышеуказанных типов усилителей: а) использованные в них фильтры характеризуются высоким дефицитом амплитуды, что недопустимо при большеобъемных $G_2(Li)$ -ПЦД; б) при больших временах формирования необходимо использовать линейные УСИУ, стретчеры, режекторы наложений - все эти блоки требуют временной привязки, возникают проблемы согласования порогов запуска; в) следующие за усилителем стретчер или АЦП со стороны входа представляют собой управляемый RC-интегратор, который увеличивает $K_{п.ш.}$ спектрометра. Все это обусловило переход к разработкам процессорных систем, где все вспомогательные блоки органично соединяются и придают прибору качественно новые свойства. В первом из разработанных нами аналоговых процессоров [10], получена максимальная статистическая нагрузка $3 \cdot 10^4 \frac{\text{имп}}{с}$ для $T_{ф} = 8$ мкс и $5 \cdot 10^4$ имп/с при $T_{ф} = 4$ мкс. В последующем аналоговом процессоре [11] (рис.4) введены: режекция перегружающих импульсов, принудительное подавление "паралича" ВЭС [3] и предусмотрен полный набор функций современных спектрометров, Формирователь процессора типа $[(L3)_{диф.} + ВЭС + (\text{стробируемый "идеальный" интегратор})]$ в предельном случае обеспечивает $K_{п.ш.} = 1,075$, $T_{имп} = 1,73 \tau_c$ (в разработке [10] использовался ВПС). Отдельные результаты испытаний [11,12] процессора с $S:(Li)$ -ПЦД и предусилителем с импульсной стоковой 0.0.C. отражены на рис.5. Анализ весовой функции спектрометра с процессором показал, что для работы в широком диапазоне нагрузок из-за нестационарности

шума целесообразен выбор $T\Phi = 0,5 T\Phi_{opt}'$ ($T\Phi_{opt}$ - оптимум для низкой загрузки).

В главе описана новая методика измерения вкладов различных источников шума в условиях нестационарности весовой функции спектрометра, состоящая в том, что на входе усилителя смешиваются шумы блока детектирования и "пачки" экспоненциальных импульсов от генератора. На выходе же выбирается на анализ любой из импульсов "пачки". Далее, по зависимости квадрата собственного разрешения от обратной постоянной формирования при различном числе импульсов предшествующих анализируемому (и различных интервалах между ними) определение вкладов шумов производится известным способом.

Автором также сформулировано положение, позволяющее прогнозировать характер весовой функции сложных время-зависимых систем: весовая функция спектрометра стационарна в том случае, когда длительность весовой функции время-зависимой его части не превосходит длительности импульсной характеристики системы в целом, в противном случае собственное разрешение зависит от статистической загрузки; вероятность наложений спектрметрических импульсов определяется той из частей системы, чья импульсная характеристика наиболее протяженная во времени. Важным практическим выводом из предшествующего является то, что все без исключения спектрометры обладают зависимостью коэффициента превышения шума от загрузки из-за принципиальной бесконечности весовых функций устройств стабилизации исходного уровня.

Заключение. Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Показано, что загрузочная способность спектрометров с ПИД ограничивается в первую очередь фильтром и устройством

стабилизации исходного уровня (УСИУ) формирующего усилителя.

2. Выявлены типы спектрметрических формирователей и УСИУ, наиболее перспективных для построения прецизионных формирующих усилителей, показаны пути достижения на практике предельных характеристик формирующего усилителя.

3. Разработаны универсальные устройства дифференцирования на серийных линиях задержки.

4. Разработан ряд УСИУ для разнообразных применений и предложена методика их испытаний.

5. Разработано устройство режекции перегружающих импульсов, применимое в большинстве известных типов формирующих спектрметрических усилителей.

6. Разработан ряд формирующих усилителей с фильтрами на основе линий задержки, в том числе аналоговый процессор, не уступающий по важнейшим параметрам лучшим образцам и примерно втрое превосходящий их по максимальной статистической загрузке на выходе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Акимов Ю.К., Игнатъев О.В. Сравнительные характеристики некоторых фильтров для прецизионных спектрометров с ПИД.- Дубна, 1979, - 15 с, (Депонированная публикация/Объед. ин-т ядер. исслед.:БИ-13-12-838).
- Игнатъев О.В., Школа Н.Ф. Линейный спектрометрический усилитель. - Приб. и техн. эксп., 1977, №4, с.133-136.
- А.с. №752210 (СССР). Линейный спектрометрический усилитель/О.В.Игнатъев, Н.Ф.Школа, В.П.Гиманов, Б.С.Новисов - Спубл. в Б.И., 1980, №28.
- Описание изобр. по заявке №2661094/18-09, приор. 01.09.78. Устройство стабилизации исходного уровня/О.В.Игнатъев, Н.Ф.Школа, А.И.Коссе, А.С.Максименко - положительное решение от 20.01.79.
- А.С. №436436 (СССР). Устройство формирования спектрометрического импульса/О.В.Игнатъев - Спубл. в Б.И., 1974, №26.
- Дьяков А.А., Игнатъев О.В., Пулин Д.А., Школа Н.Ф. Электронный метод улучшения нагрузочной способности спектрометров с полупроводниковыми детекторами - В сб.:У Научно-техн. конференция УИИ (11-15 февраля 1976). Тез. докл./Уральский ордена Трудового Красного Знамени политехн. ин-т им.С.М.Кирова, Свердловск, 1976, с.44-45.
- Игнатъев О.В., Калинин А.И., Школа Н.Ф. Время - зависимый фильтр для спектрометрических усилителей.- Дубна, 1978 - 9 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.:13-12019)
- Школа Н.Ф., Игнатъев О.В., Мокободский М.Я. Спектрометрический тракт с Si(Li)-детектором рентгено-флуоресцентного толщиномера покрытий.- Измерительная техника, 1978, №2, с.33-34.
- Школа Н.Ф., Игнатъев О.В. Спектрометрический тракт для Si(Li)-детекторов высокого разрешения.-В сб. XXVII Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ташкент, 22-25 марта 1977). Тез. докл./Л. "Наука", 1977, с.569.
- Игнатъев О.В., Коссе А.И., Школа Н.Ф. Блок аналоговой обработки спектрометрической информации от ПИД.-Свердловск, 1980.-17с.-Рукопись представлена УИИ им.С.М.Кирова, Деп.в ВИНТИ 8 мая 1980, №1586-80.
- Игнатъев О.В., Школа Н.Ф., Коссе А.И., Скурихин А.В. Разработка и исследование аналоговых процессоров для прецизионных ПИД-спектрометров рентгеновского излучения.-В сб.:Всесоюзное совещание "50 лет отечественного рентгеновского приборостроения и XII Всесоюзное совещание по рентгеновской спектроскопии (Л., 26-29 сент.1978). Тез. докл./Ленинградское научно-проив.объед."Буревестник" Л., 1978, с.191.
- Гиманов В.П., Гоганов Д.А., Холодова Л.А., Казанский Б.В., Новиков С.Р., Новисов Б.С., Игнатъев О.В. Полупроводниковые спектрометры мягкого рентгеновского излучения.-Там же, с.216

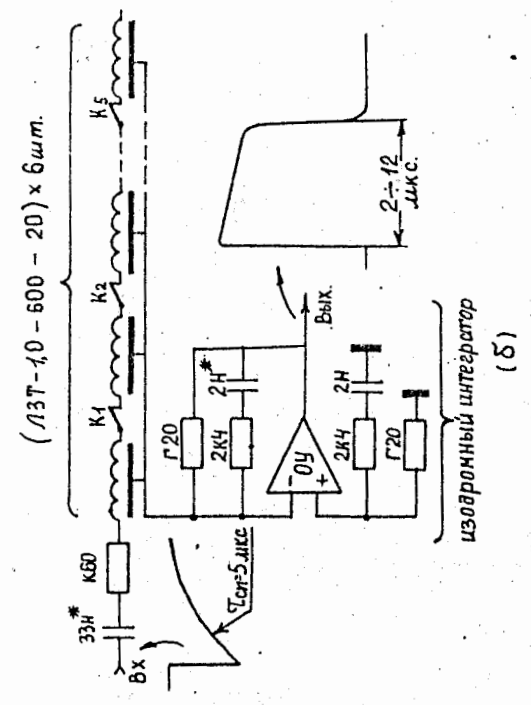
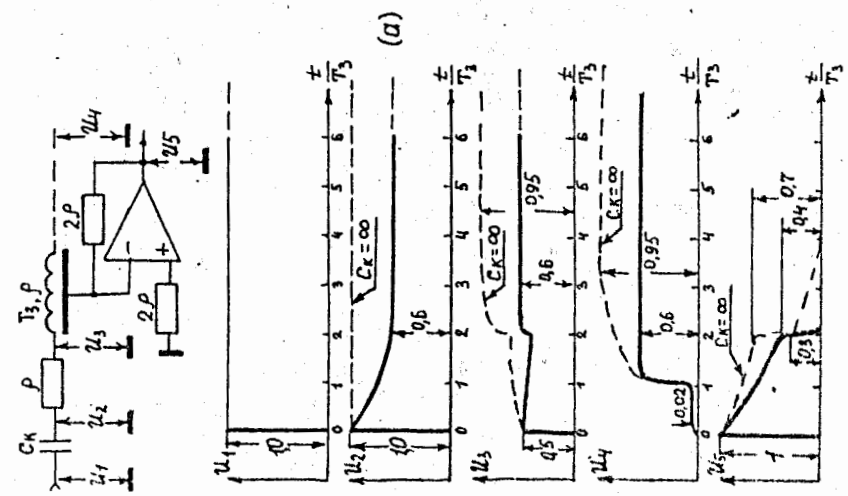


Рис.1. Устройства дифференцирования на линиях задержки:
 (а) - случай $T_{дл} = \infty$; пять линий ЛЭС-2, 0-1200-20;
 (б) - структурная схема устройства с изохронным интегратором: шесть линий ЛЭС-1, 0-600-20, операционный усилитель (OU) с полевыми транзисторами на входе.



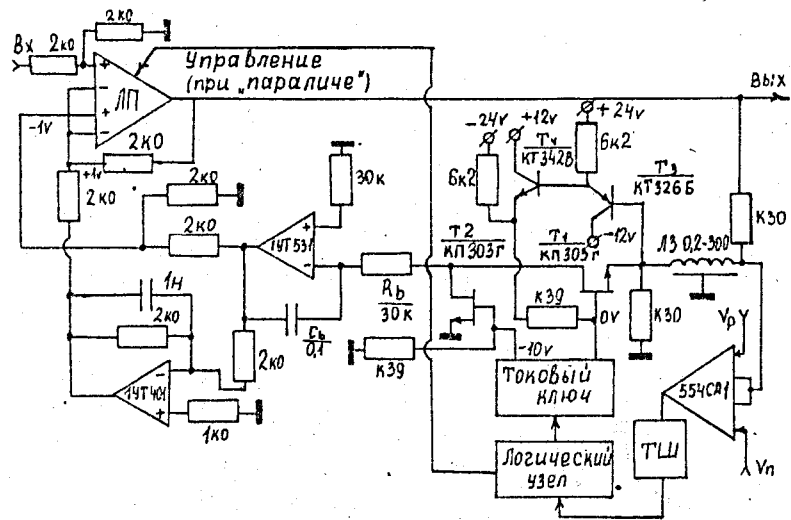


Рис.2. Структурная схема линейного время-зависимого УСИУ "охватывающего" типа с принудительным подавлением "паралича" и компенсацией задержки поступления импульса управления.

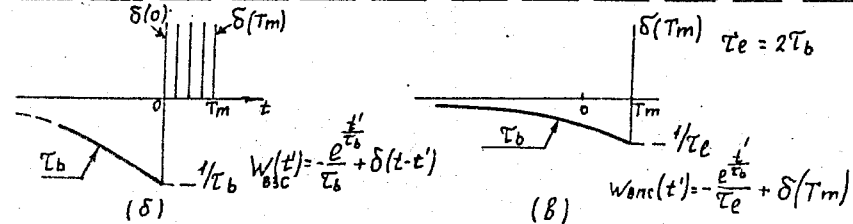
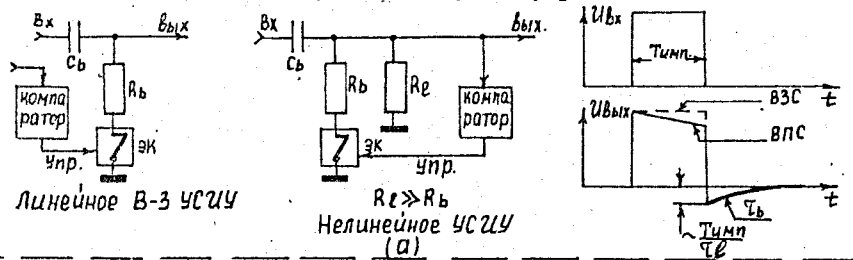


Рис.3. Эквивалентные схемы и весовые функции УСИУ: (а)-эквивалентные схемы и амплитуды напряжений для линейных (ВЗС) и нелинейных (ВПС) стабилизаторов; (б)-весовая функция ВЗС; (в)-весовая функция ВПС ($T_{\text{лип}} = T_m = 0$; T_m - момент измерения амплитуды).

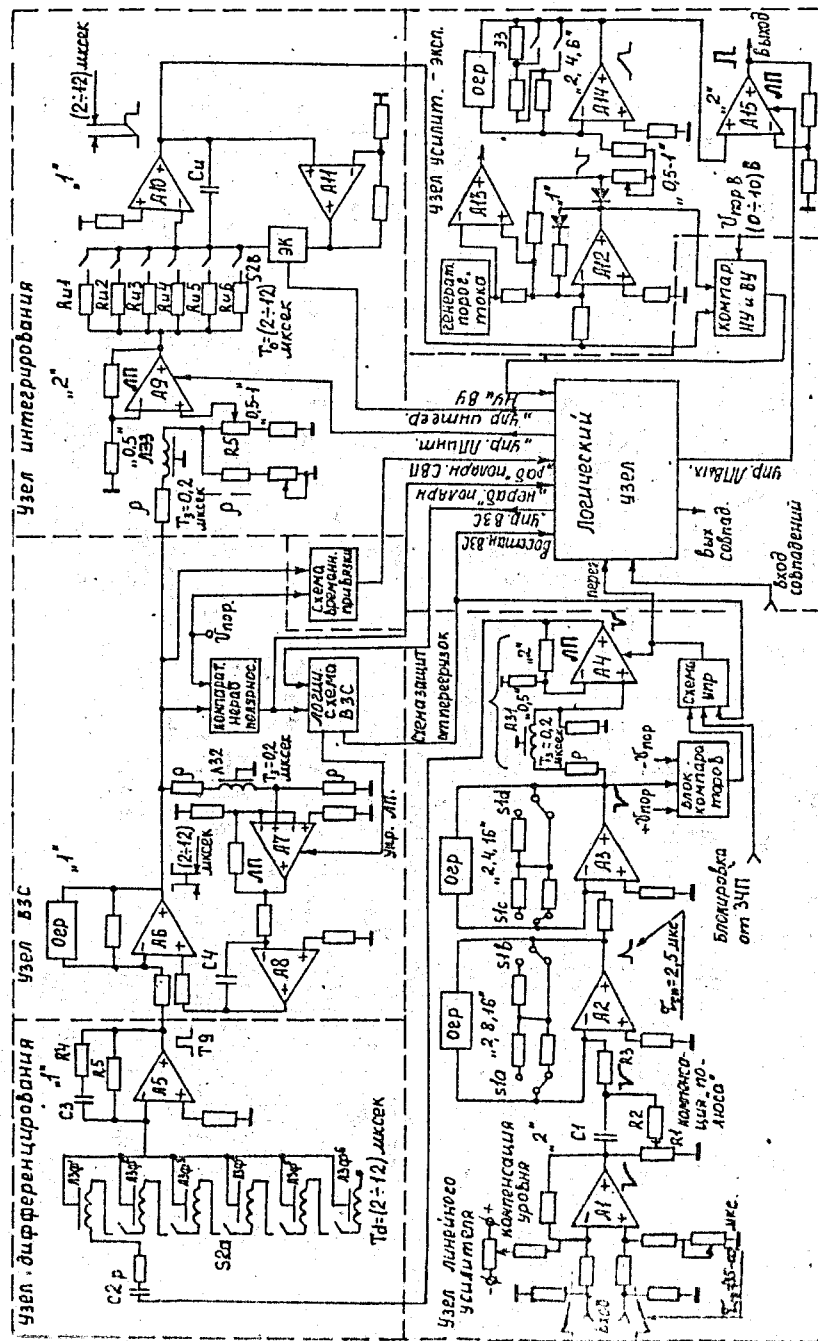


Рис.4. Структурная схема аналогового процессора.

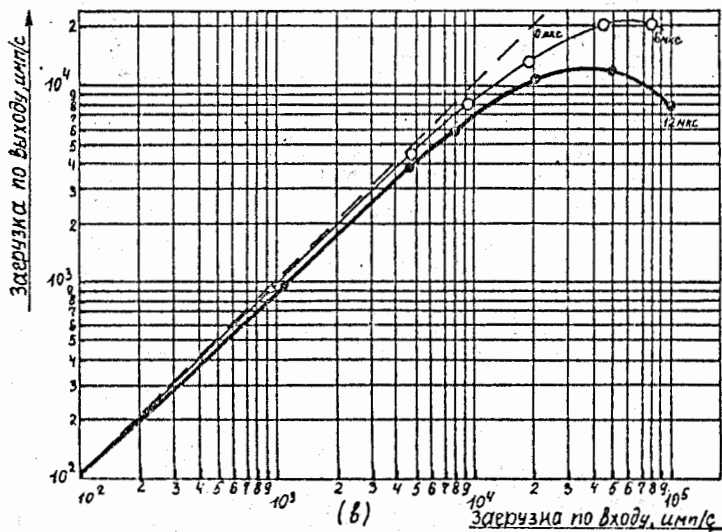
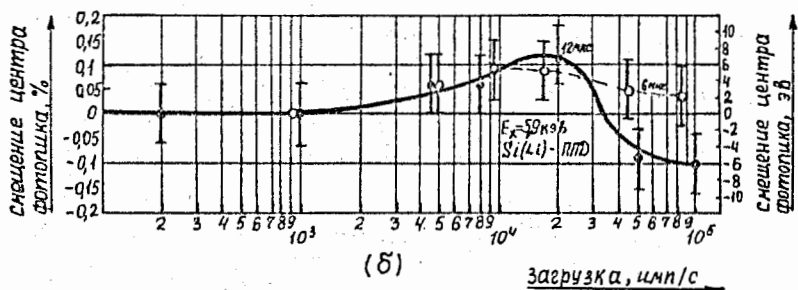
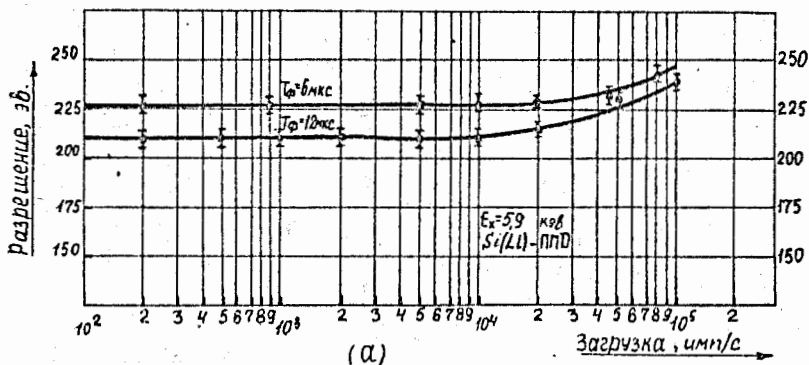


Рис. 5. Основные характеристики спектрометра с процессором.