

СЗУЧ.10

З-123

25/1-65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1913



ФИЗИКА

ОНИКИ

Г.И.Забиякин

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ
РЕГИСТРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ
ДЛЯ НАКОПЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

(Анализаторы)

1964

Обзор опубликованных материалов

1913

2894/3 чг.

Г.И. Забиякин

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ
РЕГИСТРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ
ДЛЯ НАКОПЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

(Анализаторы)

Обзор опубликованных материалов

Объединенный институт
точных исследований
БИБЛИОТЕКА

В в е д е н и е

В течение последних нескольких лет в экспериментальной физике как низких, так и высоких энергий наметились определенные тенденции в направлении более широкого использования различных электронных приборов и устройств, основанных на принципах счетно-решающей техники, и в применении непосредственно в экспериментальных измерениях цифровых вычислительных машин (ЦВМ).

Среди многообразия экспериментальной физической аппаратуры, использующей цифровую счетно-решающую технику, можно выделить три категории устройств, предназначенных для определенных физических методик и представляющих по существу самостоятельные направления физического приборостроения.

Прежде всего, это многоканальные и многомерные устройства анализа (анализаторы) электрических импульсов, несущих в себе полезную информацию об исследуемом событии. Эта аппаратура широко используется в физике низких энергий для амплитудного, временного и многомерного анализа.

К второй категории можно отнести устройства непосредственной электрической регистрации (нефотографической) событий в искровых камерах и многосчетчиковых системах. Эта аппаратура используется в физических методиках в области высоких энергий.

Наконец, широкий круг приборов и устройств, использующих фотоматериалы, образует самостоятельную третью категорию. Эта аппаратура предназначена главным образом для исследований элементарных частиц в области высоких энергий. Для первых двух групп характерным является непосредственное оперирование в ходе эксперимента с электрическими сигналами, несущими полезную информацию. Последняя группа предполагает промежуточное хранение информации с помощью фотоматериалов, которое позволяет разделить набор экспериментальных событий и их обработку.

Фотографическая регистрация являлась до последнего времени одним из основных методических направлений физики высоких энергий и не утратила своего значения в настоящее время. Это обусловило развитие большого круга специальных приборов и крупных установок с использованием цифровых вычислительных машин для распознавания и обмера фотографий. Рассмотрение конструкций таких специфичных устройств не входит в задачу настоящей работы. Этому вопросу посвящено несколько обзорных работ^{11,12,13/}

в которых подчеркивается, что широкое применение малых и больших вычислительных машин совместно с другими специализированными просмотрными устройствами является определяющим в развитии такой аппаратуры.

Многоканальные анализаторы как приборы физического эксперимента являются наиболее "старыми" устройствами, использующими цифровые методы счетно-решающей техники. По объему "памяти", а также по своей относительно развитой системе логических операций анализаторы по существу являются специализированными небольшими вычислительными машинами. В свою очередь, универсальные вычислительные машины находят применение в качестве анализаторов, выполняя функции отбора поступающей информации и поканального суммирования в своей "памяти" событий с одинаковыми признаками.

Бесфильмовые устройства для регистрации информации от искровых камер и многосчетчиков систем по своей структуре очень близко подходят к многомерным анализаторам. Задачей этих устройств является регистрация (обычно в цифровой форме) координат событий, по которым можно восстановить или оценить пространственную картину исследуемого явления. Этот тип регистрирующих устройств появился сравнительно недавно, но быстрое развитие методики искровых камер вызывает не менее быстрое совершенствование этих устройств.

Следует подчеркнуть то обстоятельство, что фактически одинаковые методы регистрации и накопления цифровой информации, применяемые в многоканальных анализаторах и цифровых бесфильмовых устройствах, позволили широко комбинировать эти методы в задачах физики высоких энергий. В комплексных регистрирующих устройствах наряду с цифровой информацией от многосчетчиков систем и искровых камер часто используются методы временного и амплитудного анализа.

Хотя вопросы электронной регистрирующей аппаратуры физики низких и высоких энергий принято рассматривать отдельно, так же как и сами физические проблемы, в настоящее время имеются основания нарушить эти традиции с целью обобщения и использования опыта обеих областей ядерной электроники.

Характерно, что главной задачей, стоящей перед техникой многоканальных анализаторов и бесфильмовых регистрирующих устройств, является целесообразное использование цифровых вычислительных машин для регистрации и обработки экспериментальной информации. Однако для того, чтобы проанализировать этот вопрос необходимо рассмотреть и отдельные приборы, и устройства регистрации экспериментальных данных. В связи с этим в работе предполагается последовательно рассмотреть три связанных между собой вопроса:

основные направления развития многоканальных и многомерных анализаторов; использование цифровых вычислительных машин и создание на основе узлов от этих машин, а также на основе промышленных универсальных машин целых измерительных комплексов - измерительных центров;

применение цифровой регистрирующей аппаратуры для регистрации информации от многосчетчиков систем и искровых камер.

Настоящая публикация посвящена первому из этих вопросов.

Применение ЦВМ и измерительные центры рассмотрены автором в препринте ОИЯИ 1834 (Дубна, 1964), цифровые регистрирующие устройства физики высоких энергий - в препринте ОИЯИ 1914 (Дубна, 1964) /32/.

1. Основные направления развития многоканальных анализаторов

К многоканальным анализаторам принято относить приборы, предназначенные для измерения амплитудного, временного, пространственного и т.д. распределения электрических импульсов, генерируемых различными детекторами излучения. Как правило, процесс измерения сводится к дискретизации измеряемого параметра по нескольким значениям (каналам) и накоплению одноименных значений в собственной "памяти" прибора. Статистический характер методики эксперимента обуславливает необходимость (для получения определенной точности измерения) накапливать достаточное количество каждого из этих дискретных значений. Помимо этого, в функции всякого анализатора входят задачи по представлению экспериментатору накопленной информации для оценки и отождествления ее с исследуемым физическим явлением, а также для дальнейшей графической или математической обработки.

Современные многоканальные анализаторы как приборы физического эксперимента развивались и совершенствовались под влиянием прежде всего быстро развивающейся техники вычислительных машин, откуда были заимствованы основные методы накопления и хранения дискретной информации. Именно трансформация параметров электрического сигнала (амплитуда, время поступления и т.д.), несущих в себе полезную информацию, в дискретную форму в виде цифровых кодов, а также операции по накоплению событий с одноименными кодами при помощи методов вычислительных машин явились основной вехой, положившей начало развитию современных многоканальных анализаторов /10,14,15/. Задачи экспериментальной физики определили специфику этих устройств, связную с регистрацией статистических входных величин, высокой точностью дискретизации измеряемого параметра, быстродействием и визуальным представлением результатов измерений.

Программы, определяющие работу анализатора по накоплению, обработке и представлению экспериментальных данных, обычно неизменны и заданы в приборе при его конструировании. Переход от одной программы работы к другой связан с переключением цепей и, как правило, осуществляется механическим переключением. Такая система фиксированных ("зашитых") программ является, пожалуй, одной из отличительных сторон конструкции анализатора по сравнению с вычислительной машиной, в которой программы операций так же, как и обрабатываемые данные, хранятся в ее "памяти". Программы машины могут меняться, в то время как в анализаторах режимы работы прибора задаются заранее и практически не могут быть изменены без изменения его первоначальной конструкции. Эти различия устройств с фиксированной и с "запоминаемой" программами обусловили особенности их применения в задачах экспериментальной физики.

Основные принципы построения многоканальных анализаторов с фиксированной программой с достаточной полнотой рассмотрены в целом ряде книг, монографий, в сборниках статей и т.д. /1-7/. Однако за последние 2-3 года появился ряд новых направлений развития анализаторной техники, расширяющих возможности использования этих приборов и меняющих отдельные конструктивные решения. Говоря об основных направлениях развития многоканальных анализаторов, можно прежде всего отметить, что развитие происходило и продолжается в настоящее время в направлении увеличения числа регистрируемых признаков (числа каналов), ускорения процесса регистрации и повышения долговременной стабильности работы. С другой стороны, в приборах продолжают совершенствоваться методы обработки и визуального представления результатов измерений. Параллельно с развитием электроники и счетно-решающей техники совершенствуются схемные элементы анализаторов, и повышается надежность их работы. Последнему в значительной степени способствует использование полупроводников и других новых элементов. Наконец, включение вычислительных машин непосредственно в эксперимент открыло новые возможности многоканального анализа в задачах экспериментальной физики.

2. Амплитудный анализ

До последнего времени для амплитудного анализа, связанного с энергетической оценкой ядерных взаимодействий, было достаточно 100-200 каналов. Это определялось прежде всего энергетическим разрешением детекторов излучений. Широко используемые детекторы не могли дать разрешение лучше нескольких процентов, и хотя "память" амплитудного анализатора могла без труда быть выполнена с большим числом каналов, ограничения со стороны детектора делали это нецелесообразным.

Время, требуемое на преобразование амплитуды в код, при использовании наиболее распространенного принципа линейного разряда емкости пропорционально числу кана-

лов преобразования и составляет для большинства устройств 50-100 мксек. Это соответствует спектрометрическим характеристикам сцинтилляционных детекторов, так что относительно большое время преобразования не являлось до последнего времени основным препятствием в повышении скорости регистрации в сцинтилляционной методике /8/.

Совершенствование методов амплитудного анализа, главным образом появление полупроводниковых детекторов, позволяющих улучшить энергетическое разрешение на порядок (и даже больше), выдвинуло требование увеличения примерно на такую же величину числа каналов амплитудного анализа. С ростом числа каналов пропорционально увеличивается и время преобразования, что как раз противоречит основным тенденциям развития методов собственно амплитудного анализа, предусматривающего ускорение процессов регистрации исследуемых явлений. Помимо этого, при комплексных измерениях (многомерный анализ) большое мертвое время одного из блоков преобразования будет определять работу всей системы регистрации и может вызвать нежелательные искажения других измерительных спектров.

Можно отметить, что экспериментальная физика выдвигает перед блоками преобразования амплитуды в цифровой код примерно следующие требования: 1-4 тысячи каналов преобразования, несколько мксек - полное время преобразования при сохранении линейности и стабильности преобразования, которые были достигнуты ранее (не более 0,5-1 канала - интегральная нелинейность и не более 0,5-1% - дифференциальная нелинейность).

Среди известных методов преобразования амплитуды в код можно, пожалуй, выделить два направления, которые на сегодняшний день кажутся наиболее перспективными в решении назревших задач. Во-первых, это более быстрый метод линейного разряда емкости. Применяя высокую частоту импульсов (вплоть до сотен Мгц), заполняющих временной интервал разряда емкости, и, как следствие этого, более быстродействующие счетные и другие схемы, можно ожидать, что блок преобразования сможет удовлетворить отмеченным параметрам. Получение линейности преобразования и стабильности работы всего тракта преобразования при 1000 и большем числе каналов вызывает существенные затруднения при выполнении таких устройств. Одним из решений вопроса стабильности может быть метод, предусматривающий введение автоматической подрегулировки порогов и усиления по специальным реперным импульсам. В качестве последних могут использоваться электрические импульсы, подаваемые на вход преобразователя /18/, реперные отметки в виде световых вспышек от стороннего источника света или от специального α -источника /21,22/, реперные отметки, задаваемые основным или дополнительным источниками излучения /19,20/ и др. Следует подчеркнуть, что введение реперных величин не только способствует улучшению стабильности преобразования, но позволяет ставить задачу стабилизации всего спектрометрического тракта от детектора излучения до цифрового кода.

Второе направление, которое практически решает вопрос быстрейшего преобразования, связано с методами нелинейного кодирования, например, поразрядного "взвешивания". Измеряемая амплитуда последовательно сравнивается с эталонными величинами напряжения или тока, которые меняются от большего значения к меньшему по двоичной (или другой цифровой) системе. Набор этих величин, равный (с точностью до младшего разряда) измеряемой амплитуде и выраженный в цифровом коде, будет являться кодом измеряемой величины /24/. Однако получение при большом числе каналов удовлетворительной дифференциальной линейности и стабильности преобразования связано с рядом трудностей, из-за которых этот метод, известный сравнительно давно, редко применялся в блоках амплитудного преобразования и даже считался малоперспективным для этих задач. За последние годы интерес к методу поразрядного "взвешивания" возрос прежде всего из-за его быстрейшего. Трудности, связанные с присущей ему дифференциальной нелинейностью, пытаются обойти путем разработки новых схемных решений /16,17/, применения сверхточных деталей /59/ и т.д. Привлекательным для решения этой проблемы является новый принцип уменьшения дифференциальной нелинейности преобразования /23/ путем создания специальной "скользящей" шкалы, когда амплитуды, относящиеся к одним и тем же каналам, оцениваются различными "весами" с последующей коррекцией кода преобразования. В этом случае при регистрации статистических процессов происходит усреднение ширины каналов, в результате чего резко уменьшается дифференциальная нелинейность (рис. 1).

3. Временной анализ

Временной анализ, решаемый с помощью многоканальных анализаторов в классическом своем применении сводится к разделению измеряемого временного диапазона на дискретные интервалы (каналы) и подсчету событий в каждом из таким образом заданных временных интервалов (измерение по времени пролета). Временные анализаторы по диапазону работы и по области применения принято подразделять на две группы: микросекундного диапазона (спектрометрия нейтронов малых энергий) и наносекундного диапазона (спектрометрия нейтронов больших энергий) /1/.

Наиболее распространенными блоками кодирования первой группы являются блоки, выполненные по классическому принципу подсчета с помощью счетчика серии импульсов, частота следования которых задается кварцевым генератором. Момент поступления исследуемого импульса фиксируется мгновенным состоянием счетчика и является адресом канала, в котором должно произойти увеличение ранее зарегистрированной информации на единицу. Возможности "памяти" анализатора являются зачастую ограничивающим фактором в увеличении числа используемых каналов. Тысяча или несколько тысяч

каналов (с шириной канала 0,1–0,5 мксек и более) являлись до недавнего времени характерными для таких приборов.

Блоки кодирования второй группы, предназначенные для регистрации интервалов порядка наносекунд и десятка наносекунд (нейтронная спектрометрия больших энергий, исследования времени жизни возбужденных ядер и др.), строятся в основном на принципах преобразования коротких интервалов времени в другой легко измеряемый параметр. Наибольшее распространение получило преобразование времени в амплитуду с последующим использованием амплитудного анализатора.

Работы, появившиеся за последнее время, дают основание заметить, что имеется определенная тенденция уменьшения ширины каналов анализаторов первой группы вплоть до наносекунд при сохранении и даже увеличении числа каналов до нескольких десятков тысяч. Такой процесс стал возможен благодаря применению более быстрых транзисторов, а также совместному использованию метода хронотрона (для задания малых ширины каналов) и классического счетного метода /25–30/.

Упрощенная блок-схема кодирования времени поступления "детекторного" импульса относительно "стартового" с дополнительным применением хронотронного метода приведена на рис. 2. Двоичный счетчик подсчитывает серию импульсов (с периодом T), заполняющих измеряемый интервал, и задает адресный код, начиная с некоторого старшего разряда (например, 2^3). Младшие разряды кода задаются путем определения момента совпадения "детекторного" импульса с импульсами от линии задержки. Эти импульсы делят интервал на более мелкие части (на схеме $T/8$), которые и являются шириной канала временного анализа /25,27/.

Кодирующие устройства, использующие аналоговое преобразование, в свою очередь, распространились в более быструю временную область – в область пикосекунд /31/. Поскольку эти устройства продолжают использовать аналоговое преобразование, не позволяющее совместить большой диапазон измерения с высокой точностью, то число каналов у этих преобразователей практически осталось на прежнем уровне (порядка 100–200).

Повышение быстрейшего временных анализаторов связано с уменьшением их мертвого времени по входу. Использование промежуточной памяти между блоком кодирования и основной памятью анализатора практически позволяет согласовать статистический или импульсный характер поступающей информации с конечным временем обращения к основной памяти /1,36,60/, т.е. приблизить среднее число статистически поступающих импульсов в секунду к частоте обращения к основной "памяти" анализатора. Обычно используемая в анализаторах ферритовая "память" может работать с частотой обращения порядка 50–100 кГц, что при наличии промежуточной памяти с 10 элементами запоминания позволяет регистрировать входные данные с загрузками вплоть до 10^4 – 10^5 импульсов в секунду.

Таким образом, во временных анализаторах наряду с проблемами получения ширины каналов порядка наносекунд возникает необходимость иметь значительный объем памяти с тысячами и десятками тысяч каналов. Еще большие требования к объему памяти предъявляются при многомерных измерениях.

4. Многомерный анализ

При многомерном анализе происходит одновременное исследование распределений электрических импульсов по двум и более параметрам. Многомерный анализ дает значительно больше экспериментальной информации и вызывает дополнительные требования к конструкции узлов анализатора. Общее время преобразования нескольких аналоговых величин в код при многомерном анализе равно большему из времен преобразования. Это выдвигает дополнительные требования к быстродействию блоков преобразования измеряемой величины в код, прежде всего, к быстродействию блоков амплитудного кодирования, которые в большинстве случаев являются наиболее медленными. Поскольку общее число каналов при многомерном анализе равно произведению числа каналов каждого из анализируемых параметров, то основной проблемой регистрации многомерных спектров является проблема собственной большой "памяти" анализатора. В качестве "памяти" многомерного анализатора может быть использован практически любой тип "памяти", заимствованный из арсенала вычислительной техники. Наибольшее распространение получили устройства "памяти" на ферритовых сердечниках и магнитной ленте.

Использование большой "памяти" на ферритовых сердечниках имеет целый ряд преимуществ, главным из которых является возможность проведения быстрой сортировки информации по каналам в процессе ее поступления (память интегрирующего типа^{/1/}), так что за процессом набора можно следить непосредственно в ходе эксперимента или сразу же по его окончании. Однако использование "памяти" на ферритовых сердечниках ограничивается прежде всего все возрастающими сложностью и стоимостью таких устройств. В анализаторах на несколько тысяч каналов наибольшая трудоемкость и стоимость приходится на блок "памяти" (с электрическими схемами привода). Увеличение числа каналов до десятков тысяч значительно усугубляет это отношение. По некоторым оценкам, стоимость блока "памяти" с ферритовыми торами на 10^6 каналов с 20 разрядами может составлять в зависимости от быстродействия от $2 \cdot 10^6$ до $20 \cdot 10^6$ долларов^{/61/}. Аналогичные оценки даются и другими авторами^{/62/}. Для промышленных анализаторов с блоками "памяти" на тысячи каналов была бы справедлива оценка порядка 4-5 долларов за канал^{/63/}. В связи с этим наиболее часто используются многомерные анализаторы с ферритовой "памятью" на несколько тысяч каналов, в ряде случаев многомерные анализаторы имеют память 16-20 тысяч каналов^{/43,45,49,52/}. На рис. 3 приведена

упрощенная блок-схема классического многомерного анализатора с "памятью" на ферритах (МОЗУ), составленная по материалам^{/43,45/}.

5. "Память" на магнитной ленте

Другим решением задачи многомерных измерений с большим числом каналов является использование магнитной ленты в качестве основной "памяти" анализатора (подробнее см. в обзорной работе Г.П. Жукова и др.). В этом случае при регистрации не происходит сортировки информации по каналам, как при использовании ферритовой "памяти". Коды, характеризующие исследуемый параметр, последовательно записываются на магнитную ленту (рис. 4). После окончания процесса регистрации происходит обработка накопленных данных путем считывания информации с ленты и поканальной сортировки ее с использованием анализатора или другой "памяти"^{/33-38,40/}.

Применяя широкую ленту (25 или 35 мм) удается проводить запись одновременно по 16-24 дорожкам, что эквивалентно регистрации по 2^{16} и 2^{24} каналам. Практически реализация такого числа каналов связана прежде всего с проблемами обработки. Обычно скорость транспортировки ленты при обработке в сто и более раз превышает скорость ленты при регистрации кодов. Однако поскольку обработка происходит по частям, определяемым числом каналов ферритовой "памяти", то время на обработку всей зарегистрированной информации связано с многократным прогоном ленты и, следовательно, относительно велико. Для уменьшения этих трудностей стремятся увеличить отношение скоростей ленты при обработке к скорости регистрации, а также уменьшить общую длину используемой ленты путем увеличения плотности записи. С другой стороны, увеличивают емкость "памяти", используемую для сортировки информации, и ограничивают обрабатываемую информацию, выбирая для обработки лишь отдельные участки всего многомерного спектра.

Лентопротяжные устройства для регистрации многомерной информации конструируются обычно с набором фиксированных либо плавно регулируемых скоростей, для того чтобы имелась возможность подобрать оптимальную скорость, обеспечивающую запись на ленту поступающих данных с возможно большей плотностью. Плотность записи зависит прежде всего от класса выполнения лентопротяжного механизма, от характеристик головок, качества ленты и т.д. и обычно составляет 10-20 импульсов на миллиметр. Отдельные устройства позволяют писать информацию и с большей плотностью (до 50 имп/мм)^{/63/}.

Следует подчеркнуть, что поскольку при многомерном анализе регистрируются отдельные статистические события, то требования к искажению информации при записи на ленту относительно невысокие. Дело в том, что отдельные случайно выпадающие коды

вообще не искажат информацию, а лишь уменьшат общее ее количество на ленте. Неверная запись кодов более неприятна, так как она может дать дополнительных разброс в спектрах. Если этот разброс значительно меньше статистического, то он может быть допустим. В связи с этим в анализаторах с магнитной лентой принимают специальные меры, направленные прежде всего на отбрасывание неправильно записанных кодов. К таким мерам относятся, например, простейший контроль записываемых на ленту кодов на четность. На ленту с каждым кодом записывается признак четности (рис. 4), если считываемый код при обработке не соответствует признаку, то он отбрасывается^{/35/}.

Лентопротяжные механизмы, используемые при многомерном анализе, характерны еще и тем, что обладают относительно большой длиной ленты на бобине (до 1,5 км). Это удобно и экономит время, так как практически не вызывает необходимости менять бобины при обработке одного эксперимента (при плотности записи 10-20 импульсов на миллиметр на бобине можно накопить более 10^7 слов информации).

Магнитная лента в качестве основной "памяти" анализатора является "памятью" с относительно большим мертвым временем. Применение промежуточной "памяти" между блоками кодирования и лентой значительно более необходимо, чем в анализаторах с ферритовой "памятью" (рис. 4). "Разравнивание" статистической информации позволяет не только регистрировать статистические события с загрузками, примерно равными частоте обращения к "памяти", но и уменьшать длину ленты за счет более равномерной записи. Некоторое увеличение объема промежуточной "памяти", по сравнению с обычно применяемой в анализаторах на ферритах, позволяет в ряде случаев учесть импульсный характер поступления событий, имеющий место в экспериментах с пульсирующими источниками излучения^{/60,41/}. Это дает возможность усреднить число поступающих событий в циклах и проводить запись с плотностью и другими параметрами, близкими к оптимальным.

Непрерывная транспортировка ленты при записи с предварительным "разравниванием" информации получила большее распространение для задач многомерного анализа, нежели транспортировка ленты в шаговом режиме, при котором лента перемещается при каждой записи кода на небольшую величину, близкую к ширине записываемого на ленте отпечатка^{/33/}. В последнем случае блок промежуточной "памяти" не является необходимым, однако лентопротяжные механизмы получаются более сложными, а плотность записи меньше, чем при непрерывной транспортировке^{/64/}.

Характеризуя системы с лентой, следует подчеркнуть, что стоимость оборудования, необходимого для проведения многомерного анализа на несколько десятков и сотен тысяч каналов с использованием магнитной ленты, значительно ниже, чем при использовании "памяти" на ферритовых торах^{/61/}. В связи с этим многомерный анализ с таким числом каналов осуществляется, как правило, с использованием магнитной ленты.

Можно отметить и другие возможности применения магнитной ленты для задач многоканального анализа. Например, использование 1/4-дюймовой магнитной ленты (часто это видоизмененные бытовые магнитофоны) позволяет проводить запись событий по 4 дорожкам^{/44,42/}. Коды с числом разрядов более 4-х записываются на ленту в виде кадра с дополнительным служебным признаком или без него. Естественно, что общая длина ленты в этом случае увеличивается по сравнению с записью по большему числу дорожек и ухудшается отношение скоростей ленты при записи и считывании. Однако недефицитность таких лентопротяжных устройств и более низкая их стоимость оправдают в ряде случаев их применение.

Другим типом накопителей информации на магнитной ленте для целей многоканального анализа являются устройства с магнитной лентой от вычислительных машин. Отличительной чертой этих устройств является быстрый разгон и останов ленты (10-20 мсек), одна скорость транспортировки ленты (обычно несколько метров в сек) и относительно небольшое число дорожек для записи информации (7-8 дорожек). В ряде случаев предусматривается перенос ленты с записывающего устройства к ЦВМ с целью непосредственного ввода зарегистрированных данных в машину^{/42/}. Для лучшего использования ленты, уменьшения участков ленты, которые тратятся на разгон и остановку, запись в таких устройствах производят не отдельными адресами, а целым массивом кодов. Это обуславливает необходимость иметь перед регистратором на ленте устройство предварительного накопления информации с несколькими сотнями или тысячами каналов. В устройстве предварительного накопления (обычно это ферритовая "память" анализатора) при этом не происходит поканальной сортировки информации. Коды, характеризующие одиночные события, последовательно записываются на ленту^{/48/}.

Устройства с магнитной лентой от вычислительных машин получили менее широкое распространение для многомерного анализа прежде всего потому, что они в конечном случае получаются более сложными и дорогими, нежели устройства с медленной скоростью при записи и быстрой при считывании. (Иначе обстоит дело при использовании вычислительных машин в качестве анализаторов; эти вопросы будут обсуждаться ниже).

Обработка записанных на ленте многомерных данных имеет определенную специфику, заключающуюся в том, что при сотнях тысяч каналов многомерного спектра рассортировка информации по всем каналам может оказаться нецелесообразной, поскольку оценка человеком такого количества информации без применения вычислительных машин сама по себе становится проблемой. В связи с этим обработка обычно проводится отдельными участками многомерного спектра и требует достаточной квалификации экспериментатора, поскольку выбор из всего многообразия нужных данных может потребовать знания физической задачи. Для расширения возможностей обработки часто считывающий тракт снабжается специальными электронными схемами - устройствами отбора (рис.4),

которые дают возможность не только проводить выборочную обработку спектров, но и осуществлять ряд дополнительных операций по укрупнению масштаба, суммированию в группах каналов и т.д. /35,41/

Особенность проведения многоканального анализа с использованием магнитной ленты, обуславливающая разделение процессов регистрации и локальную сортировку, дает возможность создавать самостоятельные конструкции устройств записи и обработки. Учитывая, что занятость записывающих и обрабатывающих устройств может быть различна, появляется возможность для нескольких записывающих устройств иметь одно обрабатывающее /34,35/. Это не только сокращает общий объем оборудования, но и дает дополнительные возможности в проведении автономной обработки зарегистрированной на ленте информации. Такое решение может оказаться удобным, например, при длительных измерениях многомерных спектров или при территориально далеко расположенных объектах исследования.

6. Вывод и представление результатов измерений

Экспериментальные работы в области физики специфичны тем, что помимо накопления достаточного для статистической оценки объема конечных данных, предварительно приходится определять оптимальные условия проведения эксперимента. Экспериментатор со своей эрудицией и способностью оценивать явления по динамике протекания процесса при далеко не полной информации является неизменным и определяющим звеном всякого эксперимента. В связи с этим в анализаторах как приборах экспериментальной физики предусматриваются специальные устройства для визуальной оценки накапливаемой в приборе информации, а также устройства вывода этой информации на другие носители. Наиболее распространенным устройством представления зарегистрированных в анализаторах спектров является катодно-лучевая трубка. Управление лучом трубки может осуществляться по трем параметрам: отклонением по оси X, отклонением по оси Y и модуляцией яркости луча. С этими тремя параметрами управления могут быть связаны параметры исследуемого спектра. Варьируя эту связь, на экране трубки можно получать различные изображения многоканальных спектров /57,58/.

Наибольшее распространение получили в силу простоты исполнения линейное и точечно-растровое изображения. При линейном изображении один из параметров исследуемого спектра связан с отклонением по одной оси, а зарегистрированная в каналах информация — с другим отклоняющим напряжением. В случае многомерного спектра несколько таких линейных спектров — сечений, построенных для различных значений второго измеряемого параметра, могут дать определенное представление о набираемой в анализаторе информации. При точечно-растровом изображении отклоняющие напряжения

трубки связываются с исследуемыми параметрами (адресами), а яркость точки на экране трубки пропорциональна числу, зарегистрированному в канале с данным адресом. Многоканальная поверхность как бы рассматривается сверху и напоминает карту, на которой вершины рельефа отмечены более ярко. Задавая дополнительные условия на яркостную модуляцию, можно вводить дополнительные реперные точки или поверхности — сечения.

В многомерных анализаторах с большим числом каналов иногда применяют не одну, а две электронно-лучевые трубки с выводом на них либо спектров сечений по одному и другому исследуемым параметрам, либо другие их комбинации /45,46/. Однако ни точечно-растровое, ни линейное изображение спектров не дают полного представления о трехмерном пространстве. Введение элементов изометрии в изображение путем усложнения зависимости между отклоняющими напряжениями и изображаемыми параметрами дает определенное дополнительное объемное представление, однако для сложных многопиковых спектров оно также малоэффективно. В связи с этим продолжают работы не только по совершенствованию методов представления многомерных спектров на экране электронно-лучевой трубки /57,58,65/, но и поиски новых методов изображения результатов измерений. Предлагается, например, использовать для представления 3-мерной информации вращающийся экран /55,56,58/, многоцветную электронно-лучевую трубку /68,58/ стереоскопическое изображение /58/ и т.д.

На рис. 5 приведены примеры многомерных спектров, выполненных с помощью 4096-канального анализатора /67/.

Удобной и в ряде случаев конечной формой представления результатов является их графическое изображение на бумаге. Перевод дискретного числа, хранящегося в анализаторе, в аналоговую форму с помощью автоматических самопишущих приборов приводит к некоторой погрешности, однако эта погрешность сравнительно невелика и в ряде случаев меньше статистической погрешности измерений. Однако приборы с механическим перемещением пера относительно медленные (1-2 точки в секунду), так что при числе каналов более тысячи время вывода всего спектра может занять более 10 минут. Среди новых методов вычерчивания спектров (электрохимическая бумага, искровые методы и т.д.) следует выделить методы точечного вычерчивания графиков с использованием вращающегося барабана /51,50/.

Барабан имеет выступы, по которым через бумагу и красящую ленту ударяют молоточки /50/. Момент удара молоточка задается электронными схемами, преобразующими дискретную информацию. Этот метод напоминает работу цифрочатающих машин с вращающимся цифровым барабаном. Каждому числу соответствует свой выступ на барабане (всего 100 выступов). Выступы расположены по спирали и сдвинуты в пределах

десятичного разряда. Такое устройство позволяет наносить на график 30 точек (каналов) в секунду. Дополнительные дорожки на полях дают возможность отсчитывать целое число более старших разрядов. Такой способ решает обе проблемы вычерчивания графика: быстрдействие и точность. 1000-канальный спектр выводится приблизительно за 0,5 минуты, дискретность выводимой информации сохраняется вплоть до величины 10^5 .

В многомерных системах с магнитной лентой, где информация хранится в нерассортированной по каналам форме, визуальный контроль за процессом регистрации затруднен. Однако, если учесть, что число импульсов, приходящихся на каждый канал многомерного спектра пропорционально падает с увеличением числа каналов, то даже при больших нагрузках (10^5 имп. в секунду) информация в каналах набирается сравнительно медленно. При 10^5 каналах в среднем регистрируется не более одного импульса за секунду. В связи с этим оценку хода эксперимента желательно проводить в более крупном масштабе, объединяя информацию нескольких соседних каналов. С этой целью часто применяют дополнительное устройство "памяти" с осциллографическим индикатором, обычно небольшое по сравнению с общим числом регистрируемых каналов многомерного спектра (рис. 4) ^{/33,33,41/}. В ферритовой "памяти" регистрируется в этом случае либо отдельная группа каналов наиболее характерного участка многомерного спектра, либо группа каналов с укрупненным масштабом. Хорошим контролем за набираемой на ленте информацией могут служить интегральные (одномерные) спектры каждого из исследуемых параметров. Например, при амплитудно-временном анализе - отдельные амплитудные и временные спектры.

Определенное представление о регистрируемых на ленте многомерных спектрах можно получить, если использовать параллельно с лентой "мерцающую камеру" Чейза ^{/2/}, состоящую из катодно-лучевой трубки и фотоаппарата. Если на отклоняющие пластины трубки подавать напряжения, пропорциональные адресам измеряемых параметров многомерного спектра, и всякий раз, когда производится регистрация проводить подсветку экрана, то на нем будет последовательно вычерчиваться точечный растр. Фотографируя это изображение, на фотоматериале получим точечно-растровое изображение многомерного спектра. Фотоматериал в этом случае выполняет роль "памяти", интегрирующей поканальную информацию. На современных трубках можно получить разрешение в 100 и более точек по каждой координате, так что можно говорить о растровом представлении многомерного спектра вплоть до нескольких десятков тысяч каналов. Общее представление о характере спектра сохраняется и при большем числе каналов, например, 1024×1024 (рис. 7) ^{/52/}.

Определенные возможности для аналогичного использования могут дать осциллографические электронно-лучевые трубки с запоминанием информации (трубки "памяти"). В этом случае в качестве "памяти", накапливающей поканальную информацию, использует-

ся сама трубка. Правда, трубки эти не позволяют пока получить такого большого разрешения точечного раstra, как у обычных электронно-лучевых трубок, однако совершенствование их как по разрешению, так и градициям яркости, позволяет выделить этот метод в качестве перспективного для представления многомерных спектров ^{/35,39/}.

Помимо визуального и графического представления результатов измерений, которые в определенной мере специфичны для многоканального анализа, широкое применение в аналитической технике нашли устройства вывода от вычислительных машин: цифрочеты, перфолента (перфокарты) и магнитная лента. Эти устройства позволяют не только относительно быстро вывести накопленную информацию, но и передать ее для обработки в универсальные или специализированные вычислительные машины.

Нужно подчеркнуть, что хотя быстрый вывод (порядка 20 чисел в сек) информации в виде цифр на бумагу удобен и экономит рабочее время анализатора, однако при числе каналов более нескольких тысяч такой способ вывода малоэффективен из-за слишком большого объема цифр, который становится трудно обозримым. В связи с этим в анализаторах часто предусматривается возможность вывода информации в задаваемой группе каналов с использованием менее быстродействующих и, следовательно, более дешевых устройств цифрочеты ^{/44,8/}.

В отдельных случаях анализаторы предусматривают и обратный ввод информации с перфоленты или перфорат, что дает дополнительные возможности, как при измерениях, так и при использовании анализаторов для задач обработки информации.

7. Математическая обработка результатов измерений

Большое количество экспериментальных данных, которое могут дать анализаторы (особенно многомерные), а также зачастую сложная математическая обработка этих данных обусловили широкое применение для обработки экспериментальной информации универсальных вычислительных машин. Как правило, универсальные вычислительные машины, имеющие большой объем "памяти" и достаточное быстрдействие, без особых затруднений способны справиться с информацией, которую дают многоканальные анализаторы. Более трудоемки работы, связанные с программированием обработки. Поэтому вопросы машинной обработки экспериментальных данных с анализаторов оцениваются прежде всего с позиций доступности машины, экономической целесообразности машинной обработки, требуемой скорости обработки, наличия программы для машины и т.д.

Существенным при большом объеме информации является вопрос ввода данных в машину. Помимо перфоленты (перфокарт) и магнитной ленты, находят применение методы непосредственной электрической связи анализаторов и вычислительной машины ^{/38,53,54/}. Вопрос о целесообразности непосредственной связи с машиной возникает

в большей степени в случае концентрации нескольких многоканальных анализаторов в одном центре либо при использовании специально выделенной для целей обработки вычислительной машины. (Эти вопросы являются предметом рассмотрения следующего раздела).

Другим направлением в развитии методов математической обработки экспериментальной информации является путь расширения функций самого многоканального анализатора для того, чтобы на нем можно было проводить отдельные математические операции /31,8/. Наличие в анализаторе относительно большой оперативной "памяти" с произвольным выбором чисел и таких узлов, как адресный и арифметический регистры, позволяет ставить вопрос о возможности и целесообразности выполнения простейших математических операций в самом приборе. Принцип фиксированной ("защитой") программы, заложенной в анализаторах с целью упрощения и ускорения логики его работы, является для задач обработки определенным ограничением. Программы обработки также должны быть "защиты" при создании прибора. В связи с этим программы рассчитываются на наиболее общие задачи обработки экспериментальных результатов. В большинстве случаев это программы сложения и вычитания спектров, сложения чисел в группе каналов, умножения информации на постоянный коэффициент, преобразования в обратный или из двоичного в десятичный код и т.д.

Расширение математических операций над спектрами требует прежде всего расширения "памяти" анализатора и усложнения программ его работы. Увеличение с этой целью собственной оперативной "памяти" прибора или использование блока магнитной ленты от вычислительной машины приводит фактически к существенному усложнению оборудования и повышению его стоимости, приближая анализатор по этим параметрам к малой универсальной вычислительной машине.

Интересным является решение, заложенное в приборе АИ-2048 /8/. Блок программ в нем выполнен в виде сменного долговременного запоминающего устройства с прошитыми ферритовыми сердечниками, аналогичного долговременному ЗУ вычислительной машины. Такое устройство позволяет предварительно заготовить программу обработки. К сожалению, пока нет опыта использования этих приборов для обработки спектров, и нельзя оценить трудности, которые неизбежны при создании и отладке достаточно сложных программ.

Одним из простых методов расширения возможностей анализатора по хранению отдельных спектров может явиться применение простых лентопротяжных механизмов с узкой (1/4 дюйма) магнитной лентой /47/. Запись канальной информации производится в таких системах последовательно, по 2 или 4 дорожкам с относительно малой плотностью, что позволяет использовать сравнительно несложное оборудование. Имеется возможность обратного ввода спектров в анализатор или через аналогичный магнит-

тофон в машину. Обычно, чтобы не усложнять систему записи и считывания, не применяются какие-либо способы контроля записи на ленту, что, естественно, снижает надежность таких устройств.

В другом варианте применения узкой магнитной ленты /48/ упрощенный однокассетный лентопротяжный механизм встроен в анализатор. Запись производится на ленту, склеенную в петлю. Имеется возможность вводить как отдельные спектры, так и несколько спектров на одну ленту, что дает возможность использовать эти легко меняемые кассеты с лентой для записи промежуточных или конечных результатов обработки, проводимой на анализаторе.

x x x

Рассмотренные основные направления развития многоканальных анализаторов характеризуют скорей эволюционную сторону совершенствования этого оборудования. Пожалуй, только магнитная лента для задач многомерного анализа явилась качественно новым в конструировании таких приборов.

Можно отметить, что многоканальные анализаторы как приборы физического эксперимента развивались прежде всего в направлении увеличения числа каналов, повышения точности и скорости регистрации, а также совершенствования методов обработки экспериментальных данных и представления этих данных экспериментатору. Все эти факторы вызваны стремлением проводить физические эксперименты и обрабатывать результаты более комплексно, с меньшей затратой времени, что, в свою очередь, приводит к усложнению аппаратуры и повышению ее стоимости. Многоканальные анализаторы на несколько тысяч каналов, а также комплексные устройства с магнитной лентой по своей сложности и стоимости приближаются к универсальным вычислительным машинам.

Л и т е р а т у р а

1. Л.А. Маталин, Е.И. Чубаров, А.А. Иванов. Многоканальные анализаторы ядерной физики. Атомиздат, 1964.
2. R.L. Chase. Nuclear Puls Spectrometry, New York, 1961.
3. А.Н. Синаев. Электронные системы многоканальных спектров ядерных частиц. Госатомиздат, 1962.
4. А.А. Санин. Электронные приборы ядерной физики. Физматгиздат, 1961.
5. Сб. "Электронно-физическая аппаратура для ядерной физики", выпуск 4. Госатомиздат, 1962.
6. Сб. "Многоканальные измерительные системы в ядерной физике", выпуск 5. Госатомиздат, 1963.

7. Сб. "Регулировка и испытание многоканальной измерительной аппаратуры для ядерной физики", выпуск 6. Госатомиздат, 1963.
8. А.Ф.Белов и др. Цифровая система накопления и обработки информации (АИ-2048). Госатомиздат, 1963.
9. R.L.Chase, Elec. Nucleaire, 1963, p.275. Wilkinson. Proc. Cambridge Phil.Soc., 46, 508 (1950). J.Scient. Instr., 27, 36 (1950).
10. P.Byington, C.Johnston. Los Alamos Scientific Laboratory Report, 1955.
11. Ю.А.Каржавий. Автоматизация измерений по снимкам с пузырьковых камер. Препринт ОИЯИ, 1552, Дубна, 1964.
12. А.Н.Розенфельд, W.E.Humphrey. Ann. Rev. Nucl. Sci., 13, 103 (1963).
13. Y.Goldsmidt-Clermont. Доклад на ХП Международной конференции по физике высоких энергий. Препринт ОИЯИ, Е-1806, Дубна, 1964.
14. А.А.Саянн, Н.Н.Суханова. Вестник Московского университета, № 8, 105 (1953).
15. G.Hutchinson, G.Scarrott. Philos. Mag., 42, 792 (1951).
16. А.Н.Утюжников, Л.А.Маталин. Препринт ОИЯИ, 1677, Дубна, 1964.
17. А.И.Волков, Г.И.Забякин, В.Г.Тишин, И.В.Штрайх. Труды 6-ой научно-технической конференции по ядерной электронике, Москва, 1964.
18. R.L.Chase. IRI Trans. NS-9, 1(1962) 119.
19. R.A.Dublay, R.Scarpetett. Nucl. Instr. Methods, 25 (1964), 297.
20. J.A.Ladd, J.M.Kennedy. CREL-1063 (Dec. 1961).
21. G.Valckx. Nucl. Instr. Methods, 10 (1961), 234.
22. S.A.Scherbatsky. RSI, 32 (1961), 599.
23. G.Cottini, E.Gatti, V.Svelto. Nucl. Instr. Methods, v.24, p.241 (1963).
24. И.В.Штрайх, В.Н.Бочкарев, А.Н.Волков, А.М.Клабуков. Труды 5-ой научно-технической конференции по радиоэлектронике, том 2, Госатомиздат, 1963.
25. Б.Е.Журавлев, И.П.Узунов. Препринт ОИЯИ, 1677, Дубна, 1964.
26. J.Thenard, G.Victor. Electr. Nucleaire, p.333. Paris, 1963.
27. H.Meyer, A.Nanosecond. Electronique Nucleaire, p.633, Paris, 1963.
28. P.Durand, P.Girand. Electronique Nucleaire, p.643, Paris, 1963.
29. P.Durand, P.Girand. Electronique Nucleaire, p.651, Paris, 1963.
30. J.K.Whittake, P.Cavanagh. Electronique Nucleaire, p.679, Paris.
31. Л.А.Маталин и др. Труды 5-ой научно-технической конференции по радиоэлектронике, т.4, стр. 45. Госатомиздат, 1963.
32. Г.И.Забякин. Препринты ОИЯИ, 1834 и 1914, Дубна, 1964.
33. C.C.Rockwood, M.G.Strauss. RSI, 32, 1211 (1961).
34. L.M.Bollinger. Proc. Conf. Utilization Multiparameter Analyzers, New York, 1962, p.59.
35. F.H.Wells, J.G.Page, A.Lewis. Proc. Conf. Utilization Multiparameter Analyzers. New York, 1962, p.69.
36. T.K.Alexander, J.Leng. CREL-1036, AECL-1323.
37. Ch.Hugot, P.Malaval. Electronique Nucleaire. 1963, p.401.

38. Г.П.Жуков, Г.И.Забякин, В.Д.Шибяев, И.В.Штрайх. Nuclear Electronics, 11, Vienna, 1961, p.61.
39. F.H.Wells. Proc. Conference Utilization Multiparameter Analyzers, New York, p. 136.
40. Г.П.Жуков, Г.И.Забякин, В.Д.Шибяев. ПТЭ, № 6 (1963).
41. Г.П.Жуков, Г.И.Забякин, В.Д.Шибяев. Препринт ОИЯИ, 1419, Дубна, 1963.
42. C.F.Beckett, J.D.Gallagher, R.B.Glascock. Proc. Conference Utilization Multiparameter Analyzers, New York, 1962, p.90.
43. А.Б.Екатов. ПТЭ, № 3, 72 (1963).
44. А.Б.Екатов и др. Препринт ОИЯИ, 1677, Дубна, 1964.
45. D.A.Bromley, C.D.Goodman, G.D.O'Kelley. Proc. Conference Utilization on Multiparameter Analyzer, New York, 1962, p.35.
46. G.D.O'Kelley, D.A.Bromley, C.D.Goodman. Proc. Conference Utilization on Multiparameter Analyzer, New York, 1962, p.49.
47. М.П.Соколов. Труды 5-ой научно-технической конференции по радиоэлектронике, том 4, стр. 125. Госатомиздат, 1963.
48. Nucl. Instr. Method., v.24 (1963), n.3, XLII.
49. С.С.Курочкин, А.Ф.Белов и др. Измерительный комплекс А.И.-18000. Труды 6-ой научно-технической конференции по ядерной радиоэлектронике. Москва, 1964.
50. Р.М.Петя. Последние достижения в области числовой и моделирующей графической записи числовых случайных переменных величин. Материалы выставки французских приборов. Москва, 1964.
51. А.А.Саянн. Труды 5-ой научно-технической конференции по радиоэлектронике, том 4, стр. 84, Госатомиздат, 1963.
52. R.S.I, v.34, n.9, (1963), IV.
53. В.А.Дорофеев, Г.И.Забякин, В.Н.Замрий, В.И.Маркоменко и др. Труды 5-ой научно-технической конференции по ядерной электронике, том 4, стр. 7, Госатомиздат, 1963.
54. К.Г.Кёниг, С.Кюнерт. Препринт ОИЯИ, 1677, Дубна, 1964.
55. R.D.Ketchpel. IEEE Trans. ED-10, n.5, 1963, p.324.
56. R.C.Bassett. Proc. Conference Utilization Multiparameter Analyzers, New York, 1962, p.102.
57. C.Rockwood. Proc. Confer. Utilization Multiparameter Analyzers, New York, p.104.
58. G.V.Michael. Proc. Confer. Utilization Multiparameter Analyzers, New York, p.112.
59. Установка многопараметрического анализа со счетным устройством "на линии" Societe D'Applications Industrielles De La Physique. Материалы выставки французских приборов. Москва, 1964.
60. Г.И.Забякин, Г.А.Осоков. ПТЭ, № 6, 73 (1963).
61. J.V.Kane, R.J.Spinrad. Nucl. Instr. Mat., v.25 (1963), n.1, p.149.
62. W.F.Müller, H.W.Fulbright. Proc. Utilization of Multiparameter Analyzers, New York, 1962, p.11.
63. Chaîne D'Analyse Multiparametrique Intertechnique. Department D'Electronique. DE/DN/ 60/ Fs/ ja 1964.

64. J.R.Kannolt, K.H.Miller, Nat. Elec. Conf., 1963, v.XIX, p.295.

65. Catalogue Nuclear Equipment Intertechnique. Paris, 1964.

66. I.V.Shtanikh, V.N.Bochkarev, A.N.Volkov, V.M.Geraseev. Laboratory Measuring Registering Centre. Elect. Nucl., p.587, Paris, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 декабря 1964 г.

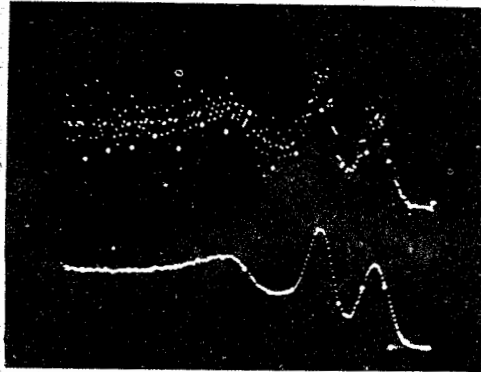


Рис. 1. Уменьшение дифференциальной нелинейности амплитудного преобразования методом "скользящей" шкалы.

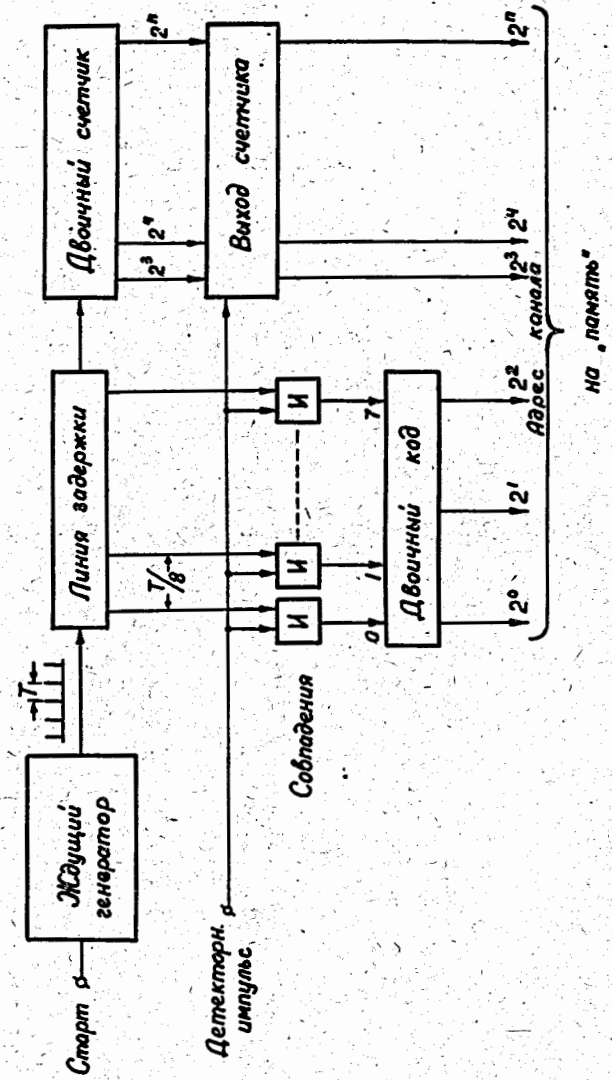


Рис. 2. Применение хронотронного и счетного метода во временном анализаторе.

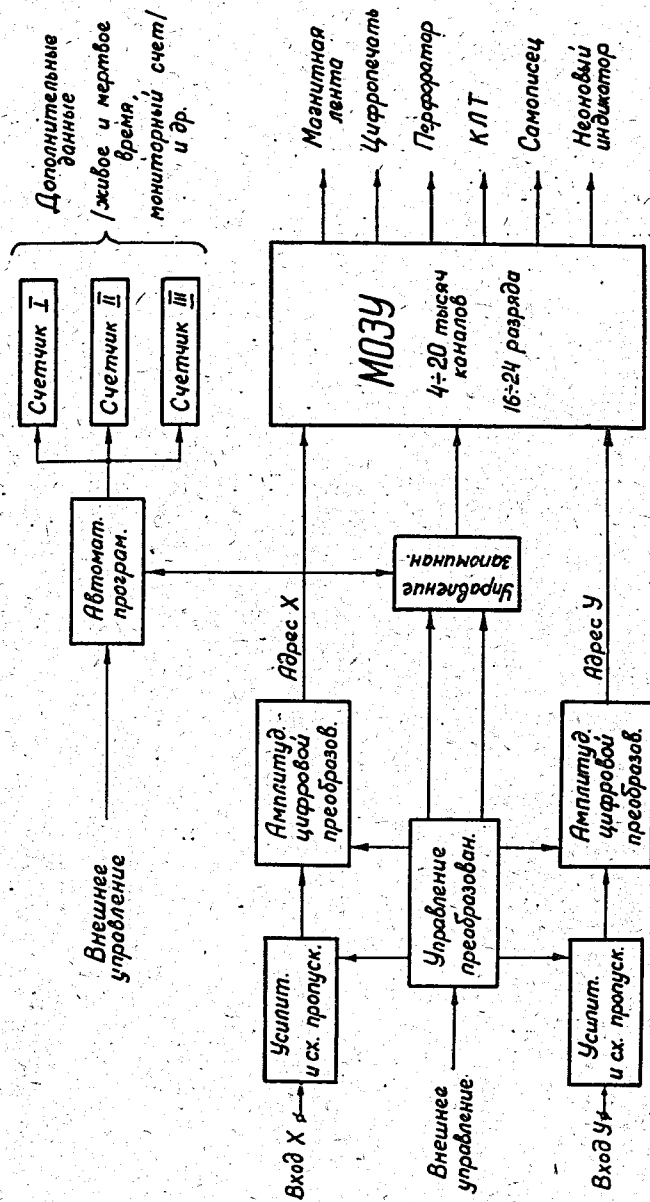


Рис. 3. Блок-схема многомерного анализатора.

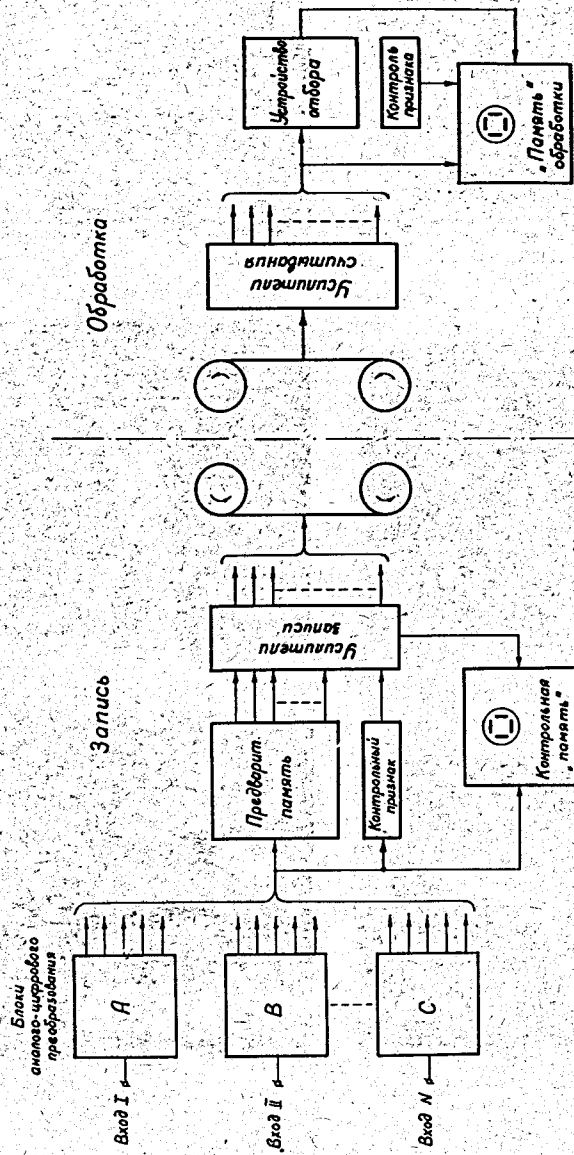


Рис. 4. Блок-схема многомерного анализатора с магнитной лентой.

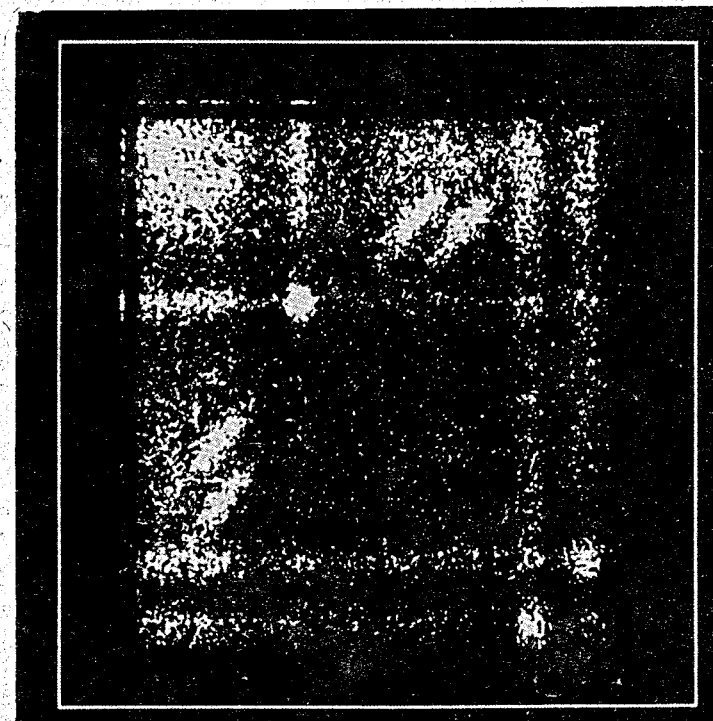
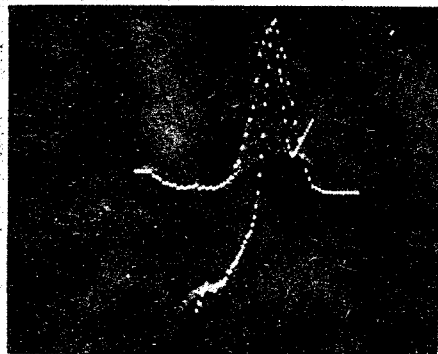
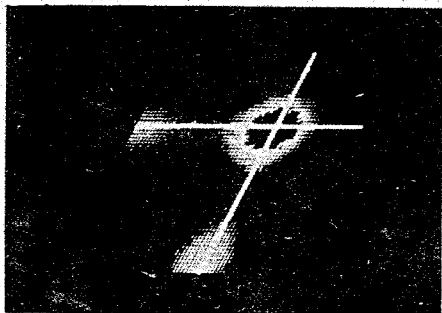
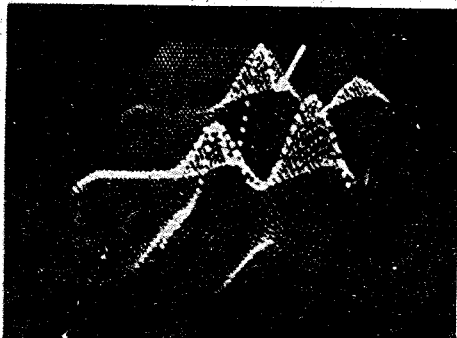
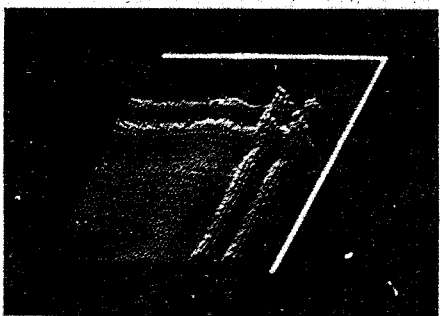
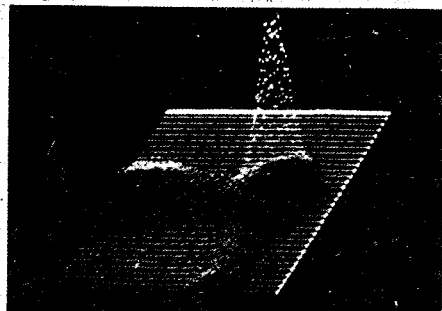
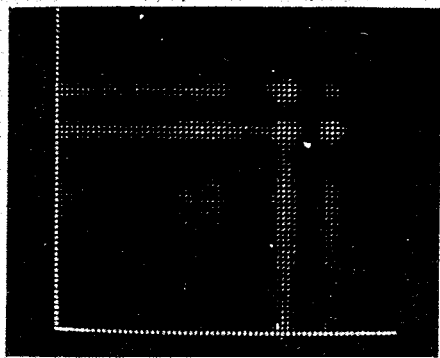


Рис. 6. Многомерный спектр 1024 x 1024 каналов.

Рис. 5. Примеры изображения многомерных спектров, выполненных с помощью анализатора с ферритовой "памятью".