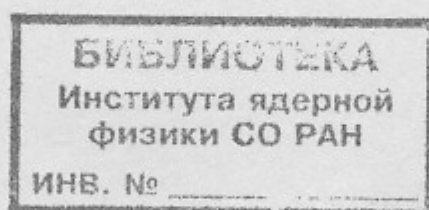


Л.М. Барков, В.П. Смахтин, Е.П. Солодов,
Б.И. Хазин, А.И. Шехтман

СКАНИРУЮЩИЙ АВТОМАТ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФОТОСНИМКОВ
С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИСКРОВОЙ КАМЕРЫ



ПРЕПРИНТ 87-161



НОВОСИБИРСК

Сканирующий автомат
для обработки фотоснимков
с цилиндрической искровой камеры

*Л.М. Барков, В.П. Смахтин, Е.П. Солодов,
Б.И. Хазин, А.И. Шехтман*

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Разработан сканирующий автомат, предназначенный для обработки фотоснимков с цилиндрической искровой камеры криогенного магнитного детектора (КМД), имеющий точность измерения координат на пленке 1 мкм и время обработки одного кадра 1.5 сек. При конструировании автомата использовались особенности фотоснимков с КМД, что позволило создать систему, не уступающую по точности лучшим существующим образцам, но значительно более дешевую и простую в изготовлении. Использование автомата сделало возможным проведение ряда интересных экспериментов на накопителе ВЭПП-2М, в ходе которых было обработано около 2 млн. фотоснимков.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

ВВЕДЕНИЕ

При использовании для регистрации частиц трекового детектора с фотографическим съемом информации возникает проблема измерения координат треков на фотоснимках и ввода их в ЭВМ. Этот процесс должен быть автоматизирован, в противном случае он будет ограничивать экспериментальные возможности детектора. Для решения этой задачи за рубежом разработано и широко используется большое число автоматических сканирующих систем для обработки фотоснимков с пузырьковых и искровых камер [1]. Наиболее известными из этих систем являются HPD [2, 3], Spiral Reader [4, 5], и SWEEPNIK [6], использующие механические сканирующие устройства, а также PEPR [7, 8], POLLY [9] и ERASME [10], сделанные на базе прецизионной электронно-лучевой трубки. К сожалению, в СССР автоматические устройства для обработки фотоснимков серийно не выпускаются. Для этих целей во многих случаях используются зарубежные системы типа HPD и Spiral Reader. Существуют и отечественные разработки, такие как ПСП [11], созданный в ИТЭФ (Москва) и аналогичный HPD, а также сканирующие автоматы АЭЛТ-2/160 [12] (ОИЯИ, Дубна) и МЭЛАС [13] (ИФВЭ, п. Протвино) на основе электронно-лучевой трубки.

Все упомянутые выше установки являются универсальными измерительными устройствами, предназначенными для обработки фотоснимков с произвольным числом треков и произвольной их конфигурацией. Поэтому они являются очень дорогостоящими и труд-

нодоступными. Учитывая все это, для обработки фотоснимков с криогенного магнитного детектора был разработан специализированный автомат, который по точности не уступает лучшим зарубежным образцам, но намного дешевле и проще в изготовлении. При создании автомата были использованы особенности конструкции КМД, имеющего аксиальную симметрию, что позволило применить в качестве сканирующего элемента равномерно вращающийся диск с отверстиями. Измерение происходит в полярной системе координат, причем радиус сканирования для каждого отверстия определяется его положением на диске и измеряется один раз при калибровке. Равномерное вращение диска позволяет заменить измерение угловой координаты на измерение времени и обойтись без дифракционных решеток или других аналогичных элементов, которые обычно используются для точного измерения перемещений.

1. ОБЩЕЕ УСТРОЙСТВО И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АВТОМАТА

Криогенный магнитный детектор (КМД) [14] предназначен для наблюдения продуктов e^+e^- столкновений в экспериментах на накопителе ВЭПП-2М [15]. Траектории заряженных частиц регистрируются детектором с помощью цилиндрической искровой камеры (ИК), помещенной в магнитное поле сверхпроводящего соленоида. Треки частиц в искровой камере фотографируются на 35-миллиметровую обращаемую киноплёнку. На рис. 1 показано расположение элементов изображения на фотоснимке с КМД. На нем видна проекция треков на плоскость, перпендикулярную оси цилиндрических электродов искровой камеры и направлению магнитного поля. Длинные штрихи 1 — это непосредственное изображение искр в зазорах искровой камеры, короткие штрихи 2 — это изображение искр, видимое через систему призм, занимающих внутреннюю часть каждого зазора. Относительный сдвиг изображений 1 и 2 пропорционален расстоянию от искры до передней стенки искровой камеры, где установлены призмы. Это позволяет восстановить координату искры вдоль оси искровой камеры [16]. На снимке видны также реперные штрихи 3, служащие для привязки фотоснимка к пространству искровой камеры, а также штрихи 4, с помощью которых производится индикация номера кадра и захода.

Для получения физической информации о событии необходимо

прежде всего измерить и ввести в ЭВМ координаты основных и сдвинутых изображений искр, а также реперных штрихов. Для каждой искры измерялись координаты двух точек на основном изображении и одной точки на сдвинутом. Дальнейшее увеличение числа измеряемых точек не приводит к существенному улучшению точности определения параметров траектории. Благодаря цилиндрической геометрии искровой камеры, при автоматическом измерении координат искр очень удобно применять сканирование кадра по окружностям фиксированного радиуса. Для сканирования кадра требуется всего 20 окружностей 5, показанных на рис. 1, — 18 для искр, одна для реперных штрихов и одна для номера кадра и захода. При этом ни одна искра не будет пропущена и все они пересекаются окружностями сканирования под углом не менее 45° , что важно для получения высокой точности измерения. Использование сканирования по фиксированным окружностям позволяет оцифровывать двумерную картинку, измеряя для каждой точки лишь одну координату — полярный угол, поскольку радиус известен для каждой окружности заранее.

Координатное разрешение искровой камеры составляет около 50 мкм. При фотографировании изображение уменьшается в 18 раз, что соответствует разрешению камеры по плёнке 3 мкм. Для того, чтобы не ухудшать разрешение, необходимая точность измерения должна составлять около 1 мкм. Разумное требование к скорости работы сканирующего автомата задается скоростью набора экспериментальной информации на КМД, равной 1 событию в секунду. Поэтому при реально достигнутом на сканирующем автомате времени обработки кадра 1.5 секунды, оцифровка событий не замедляет существенно получения физических результатов.

На рис. 2 приведена конструкция сканирующего автомата. Пунктирные линии показывают прохождение световых лучей через оптическую систему. На плите 12 размещены элементы 1—9 проектора, изготовленного на базе кинокамеры 7 типа «КОНВАС-АВТОМАТ». Для фотографирования событий с КМД применялась кинокамера того же типа. Для использования кинокамеры в качестве проектора, вместо обычной кассеты с плёнкой была изготовлена специальная кассета 3. В ней установлены линзы 6, 8, обеспечивающие равномерное освещение кадра, и светофильтры 4, 5, поглощающие длинноволновую часть спектра, к которой нечувствителен фотоумножитель, чтобы уменьшить нагрев плёнки. Источником света служит лампа накаливания 1, размещенная вместе с конденсорными линзами 2 на отдельной подставке для

уменьшения влияния тепла на всю систему. Изображение события с пленки 10 с помощью объектива 9 и полупрозрачного зеркала 15 проецируется на сканирующую систему из двух вращающихся дисков 17, 18. Свет, прошедший через отверстия в сканирующих дисках, с помощью линзы 19 собирается на фотоумножитель 20.

Диски 17, 18 реализуют сканирование спроецированного на них изображения по 20 окружностям фиксированного радиуса. Для этого в нижнем диске сделаны 20 отверстий 1 (см. рис. 3) диаметром 100 мкм. Каждое из них удалено от центра диска на расстояние, равное радиусу соответствующей окружности сканирования. В верхнем диске на тех же расстояниях от центра сделаны дугообразные щели 2 шириной 1 мм. Щели ориентированы вдоль окружностей сканирования и имеют угловой размер 18° . Они разнесены по углу таким образом, что при любом взаимном развороте дисков только одно из 20 отверстий в нижнем диске находится под соответствующей щелью и открыто для прохождения света. При работе сканирующей системы верхний и нижний диски вращаются с угловыми скоростями, которые близки к 20 об/с, но отличаются друг от друга на величину, равную $1/30$ от скорости вращения нижнего диска. Это обеспечивает последовательное открывание отверстий в нижнем диске в порядке уменьшения расстояния до центра. За время, в течение которого каждое отверстие открыто, оно делает 1.5 оборота вокруг центра диска. Благодаря этому каждая окружность сканируется полностью, несмотря на возможную неопределенность в моменте переключения сканирующих отверстий. Эта неопределенность может возникать из-за неточности изготовления щелей или неточной синхронизации вращения дисков.

С помощью ФЭУ измеряется интенсивность света, проходящего через открытое в данный момент сканирующее отверстие. В результате получается сигнал, отражающий распределение яркости изображения вдоль сканируемой окружности. Импульсы в этом сигнале соответствуют пересечению треков со сканируемой окружностью. Время прихода центра импульса определяет угловую координату точки трека.

Использование в описываемом автомате равномерности вращения дисков и сведение измерения угла к измерению времени требует, чтобы отклонения от равномерного вращения не превышали 10^{-4} радиан в течение оборота. В описываемой конструкции диски вращаются с помощью электромагнитного привода, представляющего собой вариант асинхронного электродвигателя, ротором которого является сам сканирующий диск. Это позволило обойтись без

каких-либо передаточных механизмов и свести к минимуму влияние сил трения на вращение дисков.

В электронике автомата, блок-схема которой приведена на рис. 4, можно выделить две основные системы, работающие независимо. Первая обеспечивает равномерное вращение сканирующих дисков с требуемым отношением скоростей. Она включает в себя генератор и усилители для питания обмоток электромагнитного привода дисков, а также фотодатчик ФД1 и схему обратной связи, регулирующую скорость вращения верхнего диска.

Вторая система служит для определения угловых координат точек на фотоснимке. Она работает под управлением ЭВМ Электроника-60 и измеряет времена прихода импульсов с ФЭУ и фотодатчика ФД2, который фиксирует прохождение двух синхронизирующих отверстий («угловых меток») на нижнем диске. Для запуска системы служат импульсы с фотодатчика ФД3, который индицирует начальное положение дисков, когда открыто сканирующее отверстие на самом внешнем радиусе. В следующих разделах работа всех узлов сканирующего автомата будет описана более подробно.

2. СКАНИРУЮЩАЯ СИСТЕМА

На рис. 5 показана конструкция электромагнитного привода сканирующих дисков. Каждый из двух дисков 1 и 2 приводится во вращение парой обмоток 3 и 4, соответственно. Каждая обмотка создает переменное синусоидальное магнитное поле частотой 1 кГц в магнитопроводе 5, через зазор которого проходит край диска. Поля в обмотках сдвинуты по фазе друг относительно друга на 90 градусов. При таком сдвиге фаз временную зависимость магнитного поля в обмотках можно представить в виде $H_1 = H \cdot \cos(\omega t)$, $H_2 = H \cdot \sin(\omega t)$. Вихревые токи, создаваемые в диске первой и второй обмоткой, пропорциональны производным по времени от соответствующих магнитных полей $I_1 \sim \dot{H}_1 = -\omega H \cdot \sin(\omega t)$, $I_2 \sim \dot{H}_2 = \omega H \cdot \cos(\omega t)$, соответственно. Сила, действующая на диск, пропорциональна

$$F \sim H_1 I_2 - H_2 I_1 = \omega H^2 \cdot (\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t)) = \omega H^2$$

и не зависит от времени. При вращении эта сила компенсируется «трением» о магнитное поле, которое также не зависит от времени

и пропорционально $v \cdot H^2$, где v — линейная скорость движения диска. В результате, равновесная скорость вращения диска без учета трения в оси не зависит от времени и величины магнитного поля. Из условия равновесия сил, действующих на диск можно получить оценку для соотношения частоты питающего напряжения с частотой обращения диска

$$\omega/\Omega \simeq 2\pi R \cdot L/S,$$

где R — расстояние от магнитопровода до центра диска, S — сечение магнитопровода, L — расстояние между центрами магнитопроводов. Поскольку частота обращения диска 20 об/с задается необходимой скоростью обработки, при выбранных значениях $S=3$ см², $L=3$ см и $R=10$ см это соотношение определяет частоту питающего напряжения, равную 1 кГц.

Наличие механического трения об ось вращения приводит к уменьшению скорости, к ее зависимости от величины магнитного поля и является основным фактором, обуславливающим неравномерность вращения дисков. Чтобы ослабить воздействие этого фактора, нужно увеличивать силы, действующие на диск со стороны магнитного поля. Для этого при заданном поле H выгодно уменьшать удельное сопротивление материала диска и увеличивать его толщину. Однако, при этом возросший наведенный в диске ток создает свое магнитное поле, что приводит к уменьшению результирующего магнитного поля. Оценка для случая цилиндрического магнитопровода радиуса r показывает, что сила, действующая на покоящийся диск, достигает максимума при условии

$$\frac{h}{D} \simeq \left(\frac{l}{r}\right)^2,$$

где D — величина зазора магнитопровода, в котором находится диск; h — толщина диска; l — толщина скин-слоя для материала диска при выбранной частоте напряжения, питающего обмотки. Чтобы выполнить это условие для магнитопровода с поперечным размером $r \simeq 1$ см и зазором $D=3$ мм, внешняя часть каждого диска изготовлена в виде кольца из дюралюминия толщиной 0.5 мм. Для уменьшения момента сил трения диски вращаются на шарикоподшипниках диаметром 8 мм, минимально возможным из соображений механической прочности, момент инерции диска выбирался достаточно большим, чтобы сгладить влияние быстрых изменений силы трения.

Вторым важным фактором, ограничивающим точность автомата, являются вибрации измерительного диска при вращении. Так как при проецировании с пленки на диск изображение увеличивается в 5 раз, то для обеспечения на пленке точности 1 мкм вибрации диска должны быть меньше 5 мкм. Выполнение этого требования обеспечивается конструкцией осевого узла, которая показана на рис. 6. Каждый диск 1, 2 вращается на паре шарикоподшипников 3, радиальное биение которых составляет 1—2 мкм. Все подшипники насажены на общую ось 4 диаметром 3 мм. Конический хвостовик оси плотно вставляется в коническое отверстие, сделанное в стеклянной пластине 5 толщиной 20 мм. Такая конструкция обеспечивает надежное и однозначное крепление вращающихся дисков и прохождение света через сканирующие отверстия на ФЭУ при радиусах сканирования от 5 до 40 мм в масштабе диска.

Временная диаграмма работы сканирующей системы приведена на рис. 7,а. На рис. 7,б, в, г показано взаимное расположение отверстий в различные моменты времени. Сканирование изображения на каждом из 20 радиусов производится за один рабочий оборот измерительного диска. Между двумя рабочими оборотами делается промежуток в 1/2 оборота, в течение которого происходит переключение сканирующих отверстий. Сканирующие отверстия с четными номерами повернуты на 180° относительно отверстий с нечетными номерами. Это увеличивает промежутки между отверстиями и делает более симметричным их расположение, что облегчает изготовление и центровку дисков. Кроме того, благодаря этому сканирование на всех радиусах начинается с одного и того же угла, хотя положение дисков в начале рабочего оборота отличается на 180° для четных и нечетных оборотов. Чтобы отверстия в измерительном диске открывались в правильной последовательности, вращение дисков должно быть синхронизировано, причем за время оборота измерительного диска диск со щелями должен сделать 29/30 оборота. Поскольку механическая связь дисков неприемлема из-за высоких требований к равномерности вращения, в данной конструкции используется электронная система синхронизации дисков.

Для ее работы в верхнем диске (рис. 8) проделаны 30 отверстий на фиксированном радиусе на равных расстояниях друг от друга, а в нижнем диске — одно отверстие на том же радиусе. При вращении дисков на фотодатчике 1 появляются прямоугольные импульсы, длительность которых пропорциональна величине перекрытия отверстий в верхнем и нижнем дисках. При правильной

синхронизации дисков длительность импульса постоянна и соответствует половине диаметра отверстия. При выходе дисков из синхронизма длительность импульса начинает меняться и схема обратной связи производит регулировку скорости вращения верхнего диска, изменяя величину постоянного «тормозящего» магнитного поля, создаваемого одной из обмоток электромагнитного привода.

Необходимая точность синхронизации дисков определяется требованием, чтобы момент переключения отверстий не попал на рабочий оборот. Это означает, как видно из рис. 7, что рассогласование по углу не должно превышать 3° . В данной конструкции, поскольку угловой размер синхронизирующих отверстий равен 6° , положение равновесия схемы синхронизации всегда удовлетворяет указанному требованию.

Схема формирования сигнала обратной связи и временная диаграмма ее работы показаны на рис. 9. Сигнал обратной связи, управляющий скоростью верхнего диска, формируется в виде

$$U = Ax + B \cdot \frac{dx}{dt},$$

где x — величина рассинхронизации дисков, линейно связанная с длительностью импульса с ФД1. Введение 1-й производной по времени необходимо, чтобы избежать возбуждения электромеханических колебаний в системе синхронизации. Для формирования составляющей, пропорциональной x , длительность каждого импульса преобразуется в напряжение на интегрирующей емкости C_1 , которое сохраняется до прихода следующего импульса. Составляющая, пропорциональная 1-й производной, формируется как разность напряжений на интегрирующей емкости для двух последовательных импульсов. С этой целью перед интегрированием очередного импульса напряжение с емкости C_1 , соответствующее длительности предыдущего импульса, запоминается на емкости C_2 .

Логическая часть схемы, включающая элементы 2И-НЕ и два одновибратора, формирует три сигнала: запоминания, сброса и интегрирования. Импульс запоминания формируется одновибратором 1, который запускается по переднему фронту сигнала на входе схемы. Импульс запоминания открывает диодный ключ и на емкости C_2 запоминается величина сигнала с выхода усилителя 1, соответствующая напряжению на емкости C_1 . По заднему фронту импульса запоминания формируется короткий импульс сброса, ко-

торый разряжает емкость C_1 . Затем емкость C_1 заряжается импульсом интегрирования, задержанным на время запоминания относительно входного импульса, но имеющим такую же длительность. После этого напряжения на емкостях C_1 и C_2 пропорциональны длительностям последнего и предпоследнего импульса на входе схемы. Сигнал обратной связи формируется на выходе усилителя 3 как линейная комбинация этих напряжений.

Описанная система синхронизации имеет много положений равновесия, при этом разность скоростей вращения дисков равна $0, \pm 1/30, \pm 2/30, \pm 3/30$ и т. д. Выбор нужной разности ($1/30$) осуществляется вручную путем регулировки амплитуды переменного напряжения, подаваемого на обмотки электромагнитного привода одного из дисков. Обмотки питаются от генератора фиксированной частоты 1 кГц, стабилизированного кварцем. Генератор имеет два независимых выхода со ступенчатой и плавной регулировкой напряжения. Регулировка скоростей вращения производится обычно при включении автомата и в дальнейшем схема синхронизации поддерживает заданную разность скоростей дисков.

Для синхронизации работы электроники с вращением дисков служат фотодатчики 2 и 3 (рис. 8). Фотодатчик 2 фиксирует прохождение двух отверстий диаметром 0.1 мм, расположенных через $1/2$ оборота в измерительном диске («угловых меток»). Импульсы с этого датчика служат началом и концом рабочего оборота. Одно отверстие используется для четных оборотов, второе — для нечетных. Фотодатчик 3 фиксирует совмещение отверстия на верхнем диске с отверстием на нижнем диске. Это происходит один раз в 30 оборотов, когда открыто сканирующее отверстие на самом внешнем радиусе. Импульс с этого датчика («начало кадра») сигнализирует о готовности сканирующей системы начать обработку очередного кадра и используется для запуска электроники. Временная диаграмма импульсов с фотодатчиков показана на рис. 7.

3. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ КООРДИНАТЫ

Метод нахождения угловой координаты точки трека иллюстрируется на рис. 10. При этом определяется время прихода t центра каждого импульса с ФЭУ относительно начала оборота и длительность оборота T . Тогда угловая координата искры в радианах равна $\varphi = 2\pi t/T$. Для получения точности измерения координат

пленке ~ 1 мкм нужно с точностью 1 мкс определить время прихода импульса с ФЭУ, имеющего колоколообразную форму с шириной на полувывоте ~ 50 мкс. Приведенные значения времен относятся к сканированию на самом внешнем радиусе. С помощью пороговой схемы формировались крутые фронты импульса, времена прихода переднего и заднего фронта измерялись независимо, а положение центра импульса определялось как среднее арифметическое этих времен при обработке в ЭВМ.

Благодаря симметричной форме импульса с ФЭУ определенное таким образом положение его центра с требуемой точностью не зависит от соотношения порога и амплитуды импульса при ее изменении в 3—5 раз. Однако режим работы искровой камеры, близкий к стримерному, приводит к колебаниям яркости искры и амплитуды соответствующих импульсов в десятки раз. Для достижения нужной точности измерения координат искр различной яркости используются 4 независимых канала измерения с порогами, относящимися как 1:3:9:27. Это позволяет при обработке в ЭВМ для любого импульса выбрать измерение, которое выполнено с порогом, составляющим 0.2—0.7 амплитуды импульса. При таком соотношении порога и амплитуды ошибки измерения минимальны.

На фотоснимках реальных событий встречаются различные дефекты, такие как блики, ореолы, ложные пробои в искровой камере, расположенные рядом с изображениями искр. Эти дефекты, а также шумы ФЭУ и различные помехи могут приводить к появлению дополнительных импульсов небольшой амплитуды, приходящих до или после основного импульса и вызывающих срабатывание измерительного канала с низким порогом. Такие импульсы могут отстоять от основного на время порядка его ширины, меняющейся от 40 до 200 мкс при разных радиусах сканирования. Чтобы избежать потерь информации, нужно обеспечить регистрацию группы из нескольких импульсов с малыми промежутками времени между ними. Обычно в течение рабочего оборота измеряются координаты не более чем 4 искр, а при сканировании самого внешнего радиуса—до 12 реперных штрихов. Однако, так как есть опасность появления ложных импульсов, должна быть предусмотрена возможность большего числа измерений.

Блок-схема одного измерительного канала приведена на рис. 11,а. Сигнал с ФЭУ подается на усилитель, который имеет коэффициент усиления 1, 3, 9 или 27 в зависимости от номера канала, определяя тем самым различное соотношение порога и амплитуды импульса в разных каналах. С выхода усилителя сигнал по-

дается на один из входов компаратора, на второй его вход подается постоянный сигнал, одинаковый для всех 4 каналов. Регулировка этого сигнала от ЭВМ позволяет одновременно изменять пороги во всех 4 каналах, не нарушая их соотношения.

С выхода компаратора сформированный логический сигнал подается на входы двух одинаковых схем, измеряющих времена прихода передних и задних фронтов. В каждую из них входит 4-рядный сдвиговый регистр, с помощью которого сигнал фиксированной частоты 1 МГц подается поочередно на один из четырех счетчиков емкостью 2^{16} . Переключение сигнала с одного счетчика на другой происходит при циклическом сдвиге содержимого регистра по соответствующему фронту входного импульса. На остановившемся счетчике фиксируется время в микросекундах между фронтами двух последовательных импульсов. Такая схема позволяет без потерь информации регистрировать до трех импульсов, разделенных малыми интервалами времени. В схеме использованы блоки счетчиков в стандарте КАМАК типа С0301, связанные с ЭВМ «Электроника-60» с помощью программируемого крейт-контроллера К0604 [17] (см. рис. 4). После каждой группы импульсов с ФЭУ состояние счетчиков во всех 4 каналах переписывается за время 200 мкс в запоминающее устройство типа П0602 емкостью 16К, расположенное в этом же крейте КАМАК. Общее число импульсов, которое описанная система может зарегистрировать за время рабочего оборота, ограничивается только объемом запоминающего устройства. По концу каждого рабочего оборота вся накопленная информация переписывается в память ЭВМ «Электроника-60» для дальнейшей обработки.

Поскольку вероятность ложных срабатываний быстро падает при увеличении порога, в двух каналах с большими порогами оказалось достаточным использовать только по 3 счетчика. Еще один аналогичный канал с двумя счетчиками в каждой схеме измерения времени используется для регистрации импульсов с датчика «угловых меток», которые приходят в начале и в конце рабочего оборота.

Конструктивно усилители и компараторы всех измерительных каналов объединены в блоке, выполненном в стандарте ВИШНЯ. Здесь же размещен усилитель-формирователь сигнала «начало кадра» с фотодатчика ФДЗ. Сдвиговые регистры, кварцевый генератор сигнала 1 МГц и цепи его коммутации расположены в блоке управления, который выполнен в стандарте КАМАК. На его входы подаются после блока усилителей-формирователей сигналы с ФЭУ, с датчика угловых меток и с датчика начала кадра. В схе-

му блока входит регистр управления, разряды которого используются для коммутации входов, для включения генератора и для формирования сигнала LAM по приходу импульса начала кадра, угловых меток и по концу импульса с ФЭУ на самом низком пороге. С помощью сигнала LAM работа программ крейт-контроллера и ЭВМ синхронизируется работой сканирующей системы. С 32 выходов блока управления на входы счетчиков (4 блока С0301 по 8 счетчиков) подаются сигналы с частотой 1 МГц, заполняющие измеряемые интервалы времени.

Статистическая погрешность, возникающая при измерении угловой координаты описанной выше схемой, связана, главным образом, с шумом на выходе фотоумножителя. Для того чтобы улучшить отношение сигнала к шуму на выходе усилителя, выгодно снижать верхнюю границу его полосы пропускания или, что то же самое, увеличивать постоянную времени эквивалентной интегрирующей цепи. Однако при этом форма импульса с ФЭУ искажается и перестает быть симметричной, что приводит к появлению систематических ошибок при определении координаты центра импульса. Для устранения этих ошибок форма импульса с ФЭУ была специально изучена.

Поскольку каждый импульс измеряется при 4 значениях порога, имеется достаточно подробная информация о его форме в виде 8 точек на графике зависимости сигнала с ФЭУ от времени. По полученным точкам проводилась кривая гауссовой формы $U(t) = U_0 \cdot \exp(-(t-t_0)^2/2s^2)$. Если затем время относительно центра импульса отложить в единицах s , а амплитуду — в единицах U_0 , то большое число импульсов можно представить на одном графике, который показан на рис. 12. Из него видно, что гауссова кривая хорошо описывает форму импульса. На рис. 13 показано распределение по параметру s для импульсов, полученных при сканировании изображений искр по окружности максимального радиуса. Видно, что все импульсы с точностью 10% имеют одинаковую s . Для других окружностей сканирования величина s изменяется обратно пропорционально радиусу. При прохождении через интегрирующую цепь с постоянной времени τ форма импульса искажается и положение середины импульса начинает зависеть от порога.

Форма сигнала на выходе усилителя при подаче на его вход импульса гауссовой формы была найдена численным интегрированием при различных соотношениях τ и s . Исходя из полученной формы, определялся сдвиг центра импульса Δt при различных зна-

чениях порога U . Оказалось, что зависимость величины $\Delta t/\tau$ от логарифма отношения амплитуды импульса к порогу $\ln(U_0/U)$ с достаточной точностью аппроксимируется квадратичной параболой, коэффициенты которой определяются отношением τ/s . При малых τ/s величина $\Delta t/\tau$ близка к единице и слабо зависит от $\ln(U_0/U)$, что соответствует просто задержке импульса на время τ без существенных искажений. Такая задержка всех импульсов на одно и то же время не существенна, так как приводит только к общему повороту оцифрованного изображения. Отличие величины $\Delta t/\tau$ от единицы не превышает 20% вплоть до $\tau/s=0.5$, если измерения проводятся с отношением порога к амплитуде импульса в пределах $0.2 < U/U_0 < 0.7$. Последнее условие обеспечивается автоматически, благодаря выбранному соотношению коэффициентов усиления в 4 измерительных каналах. При выбранной величине постоянной времени усилителя $\tau=10$ мкс относительный сдвиг центра импульса даже для максимального радиуса сканирования не превышал 1—2 мкс, что соответствует смещению 1—2 мкм на пленке. Эти смещения вычислялись для каждого импульса с помощью полученной зависимости $\Delta t/\tau$ от $\ln(U_0/U)$, и в угловую координату вносилась соответствующая поправка. Величина $\ln(U_0/U)$ определялась, исходя из ширины импульса Γ , измеренной при данном пороге U . Для импульса гауссовой формы имеет место соотношение $\ln(U_0/U) = \Gamma^2/8s^2$. Для реального импульса на выходе усилителя зависимость $\ln(U_0/U)$ от $(\Gamma/s)^2$ аппроксимировалась квадратичной функцией $A(\Gamma/s)^2 + B(\Gamma/s)^4$, коэффициенты которой сами зависели от τ/s . Введение указанных поправок позволило полностью исключить систематические ошибки, связанные с искажениями формы импульсов в усилителе.

На рис. 14 приведено распределение значений угловой координаты при многократном измерении одной и той же точки. Ширина распределения характеризует статистическую точность автомата 1 мкм, в которую кроме шумов ФЭУ вносят свой вклад механические факторы, обсуждавшиеся в предыдущем разделе: неравномерность вращения и вибрации сканирующего диска.

4. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АВТОМАТА

Оптическая система автомата, показанная на рис. 2, обеспечивает равномерную подсветку кадра, проецирование изображения с минимальными искажениями на сканирующую систему и на мато-

вый экран и сбор света, прошедшего через сканирующие отверстия, на фотокатод ФЭУ. Чтобы улучшить отношение сигнала к шуму на выходе ФЭУ, выгодно увеличивать интенсивность света, попадающего на фотокатод. Эта интенсивность при отсутствии потерь света в оптической системе определяется размером сканирующего отверстия и освещенностью киноплёнки. Максимальный размер сканирующего отверстия задается шириной искр на фотоснимке, а освещенность ограничивается нагревом пленки, который может приводить к ее деформации и возникновению систематических ошибок при измерении.

В качестве источника света используется галогенная лампа накаливания 1 мощностью 150 Вт. После фокусировки конденсорными линзами 2 свет лампы пропускается через тепловой светофильтр 4, поглощающий инфракрасную область спектра, а затем через светофильтр из стекла СЗС-21. Полоса пропускания этого светофильтра соответствует области спектральной чувствительности фотоумножителя ФЭУ-85, использованного в автомате. Это позволяет избежать излишнего нагрева пленки светом, к которому нечувствителен фотоумножитель. Расположение и параметры линз 2, 6, 8 выбраны таким образом, чтобы свет, прошедший через пленку, был полностью пропущен через объектив. Конденсорные линзы 2 создают изображение нити накаливания лампы в месте расположения линзы 6, а линза 8 вторично фокусирует это изображение в плоскости диафрагмы объектива, причем размер изображения нити накаливания меньше диаметра диафрагмы. Линза 6 создает в плоскости пленки 10 изображение равномерно освещенной поверхности конденсорных линз, обеспечивая тем самым однородную подсветку кадра. Линза 19 фокусирует изображение лампы из диафрагмы объектива на фотокатод ФЭУ. Благодаря этому независимо от положения отверстий в сканирующих дисках свет попадает на одни и те же места фотокатода, что позволяет исключить влияние его неоднородности на величину сигнала с ФЭУ. Для проверки однородности подсветки кадра наблюдался сигнал с ФЭУ, при отсутствии пленки в кассете. В случае идеальной однородности сигнал не должен зависеть от времени. Реально наблюдались изменения 10%, которые носили плавный характер.

Оптическая система должна проецировать изображение с пленки на сканирующую систему таким образом, чтобы центр искровой камеры совмещался с центром окружностей сканирования. Точность этого совмещения определяется требованием, чтобы точки, измеряемые на сдвинутых в призмах изображениях искр, отклоня-

лись по радиусу от середины призмы не дальше 1 мм. В пересчете на пленку это соответствует точности установки кадра 50 мкм по обеим координатам. Киноаппарат «КОНВАС-АВТОМАТ», используемый как для съемки событий на КМД, так и для проецирования на автомате, устанавливает кадр с помощью грейферного механизма с точностью 10—20 мкм. Поэтому при нормальной работе и съемочного, и проекционного киноаппаратов, достаточно отрегулировать правильность проецирования один раз после установки в кассету очередной бобины с пленкой, и в дальнейшем требуемое положение изображения относительно сканирующей системы будет сохраняться без вмешательства оператора. Однако, при реальной работе изображение может сдвигаться за счет изменения положения элементов оптической системы КМД при съемке, повреждения перфорации на киноплёнке и т. п. Это вынуждает контролировать при обработке каждого кадра положение спроецированного изображения относительно сканирующей системы.

Для этой цели используются реперные линии, присутствующие на каждом кадре (см. рис. 1). Всего имеется 12 реперных линий, пересекаемых одной окружностью сканирования. По углам точек пересечения, измеряемым при обработке кадра, программа в ЭВМ находит радиус окружности сканирования R_0 и координаты ее центра X_0, Y_0 относительно центра изображения искровой камеры на пленке, и полученные величины сразу выводятся на экран терминала. По ним осуществляется оперативный контроль за правильностью проецирования каждого кадра. Если значения X_0, Y_0, R_0 выходят за установленные границы, оператор регулирует положение проецирующего киноаппарата путем параллельных перемещений плиты 12 (см. рис. 2) в трех направлениях с помощью 6 микровинтов 11 (на рисунке показаны только два из них).

При проецировании изображения с пленки на сканирующий диск могут возникать искажения, связанные с неидеальностью зеркала и объектива и с непараллельностью поверхности пленки и сканирующего диска (с учетом отражения в зеркале). Качество поверхности зеркала проверялось с помощью интерферометра. Обнаруженные отклонения от плоскостности плавно увеличивались от центра зеркала к краям и не превышали 0.25 мкм при размерах зеркала 10×10 см. Поскольку расстояние от зеркала до диска невелико и составляет ~10 см, искажения из-за неплоскостности зеркала не превышают 1 мкм в масштабе диска, что соответствует 0.2 мкм на пленке.

Перед началом работы с автоматом проводилась его калибровка с помощью специально изготовленного шаблонного кадра, который показан на рис. 15. На кадре нанесено по четыре прямых линии в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Линии шириной 30 мкм наносились с помощью точно изготовленной щели на фотопластинку, которая перемещалась на микрометрическом столике. Затем с полученного на фотопластинке негативного изображения был контактным способом изготовлен позитив на пленке. Положение линий на шаблоне было измерено на двухкоординатном микроскопе с точностью 1 мкм. Затем шаблонный кадр обрабатывался на автомате. При этом для каждой окружности сканирования определялся радиус $R_0^{(n)}$ и начальный угол $\varphi_0^{(n)}$, где n — номер окружности. Полученные во время калибровки массивы значений $R_0^{(n)}$ и $\varphi_0^{(n)}$ запоминались, и в дальнейшем при обработке кадров на автомате всем точкам, измеренным при сканировании n -ой окружности приписывался радиус $R_0^{(n)}$, а к полученным значениям углов добавлялась поправка $\varphi_0^{(n)}$. Такая процедура полностью исключает радиальные искажения, не зависящие от φ , поскольку их влияние учитывается в величинах $R_0^{(n)}$.

Для выявления оставшихся оптических искажений после обработки шаблонного кадра на экран графического дисплея выводилась картинка, показывающая расположение измеренных точек относительно линий шаблона (см. рис. 15). При этом отклонение точек от линий, которым они принадлежат, показано в масштабе, увеличенном в 100 раз по сравнению с общим масштабом изображения. Это позволяло наблюдать искажения вплоть до величин ~ 1 мкм. Эти искажения были связаны с непараллельностью плоскости пленки и плоскости сканирующего диска (с учетом отражения в зеркале) и приводили к зависимости масштаба от координаты вдоль какого-либо направления. В результате, после измерения на автомате нарушалась параллельность линий шаблона, идущих в этом направлении. Искажения устранялись регулировкой угла наклона зеркала в соответствующем направлении с помощью 3 юстировочных винтов 14 (см. рис. 2). На экране дисплея наблюдались также искажения типа дисторсии, связанные с неточной наводкой на резкость. Эти искажения устранялись регулировкой положения объектива. На рис. 15 показаны измерения шаблонного кадра на пленке после устранения всех искажений. На гистограмме приведено распределение отклонений измеренных точек от линий шаблона. Полученная из этого распределения точность авто-

мата $\sigma = 1.3$ мкм включает как статистическую, так и систематическую погрешность.

5. ЭВМ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Ввод информации со сканирующего автомата осуществлялся под управлением микро-ЭВМ «Электроника-60», которая была укомплектована терминалом и печатающим устройством DZM-180. Для вывода графической информации использовался цветной дисплей в стандарте КАМАК типа ЦДР-1. Как уже отмечалось, для связи с крейтом КАМАК использовался программируемый крейт-контроллер К0604, который обладает собственной памятью емкостью 1К для хранения программы и может работать с крейтом автономно от ЭВМ, обеспечивая скорость 4 мкс на одну команду. «Электроника-60» не обладала собственными устройствами внешней памяти и была подключена с помощью последовательной линии связи к центральной мини-ЭВМ «Электроника-100/25». В ее комплект входили два накопителя на магнитных дисках ИЗОТ 1370 общей емкостью 10 Мбайт, что обеспечивало ее работу под управлением операционной системы RSX-11M. Межмашинная связь обслуживалась системой программного обеспечения «АЛИСА» [18], которая, в частности, позволяла через линию связи загружать в периферийную ЭВМ «Электроника-60» операционную систему RSX-11S. Обеспечивалась также загрузка задач с дисков центральной машины в память периферийной, обмен информацией между задачами, работающими в разных машинах, и использование терминала периферийной ЭВМ в качестве «виртуального» терминала центральной ЭВМ.

Программное обеспечение состояло из двух частей, одна из которых находилась в памяти периферийной ЭВМ, вторая — в памяти центральной ЭВМ. Программа в «Электронике-60» осуществляла из крейта КАМАК ввод информации о временах прихода передних и задних фронтов импульсов, полученных при сканировании изображения с 4 различными порогами дискриминации. Затем на основе этой информации определялось время прихода центра каждого зарегистрированного импульса, вносились поправки, учитывающие асимметричную форму импульса, и определялась угловая координата соответствующей точки трека. После этого массив измеренных координат передавался по линии связи в «Электрони-

ку-100/25», где осуществлялись фильтрация треков от посторонних точек и запись информации на диск.

Ввод информации в «Электронику-60» организован следующим образом. Цикл обработки одного кадра состоит из 20 рабочих оборотов сканирующей системы длительностью по 50 мс, разделенных промежутками по 25 мс. Во время рабочего оборота крейт-контроллер работает в автономном режиме и после каждого импульса с ФЭУ переписывает массив значений всех 28 счетчиков, фиксирующих времена прихода фронтов в 4 измерительных каналах, в блок памяти, установленный в крейте. Во время промежутка между рабочими оборотами контроллер переключается в режим управления от ЭВМ, и информация, накопленная за время рабочего оборота, переписывается в память «Электроники-60». Поскольку в течение рабочего оборота процессор «Электроники-60» не занят вводом информации из крейта, в этот период выполняется обработка информации, записанной в память ЭВМ за время предыдущих оборотов.

Обработкой фотоснимков на сканирующем автомате управлял оператор, подавая команды с клавиатуры терминала нажатием соответствующих функциональных клавиш. На пленке помимо кадров с треками заряженных частиц присутствуют также «пустые» кадры, не содержащие треков и связанные с ложными запусками детектора. Доля таких кадров составляет 40—60% от общего числа кадров на пленке. Чтобы не тратить время на их сканирование, оператор исключал такие кадры из обработки на основе их визуального просмотра на матовом экране. В экспериментах, для которых использовался сканирующий автомат, подавляющее большинство составляли двухтрековые события. В связи с этим программа фильтрации, входящая в матобеспечение автомата, была рассчитана на выделение не более двух треков. Если оператор встречал на пленке кадр с числом треков больше двух, то он специальной командой записывал без фильтрации информацию с этого кадра в отдельный файл для последующего анализа.

Фильтрация треков от посторонних точек осуществляется в три этапа. Чтобы разделить точки, относящиеся к 1-му и 2-му треку, на первом этапе строилось распределение по углу для точек, измеренных на основных изображениях искр. Точки, принадлежащие одному треку, имеют близкие углы и дают пик в этом распределении. На втором этапе по точкам каждого трека восстанавливается траектория и проводится фильтрация точек с помощью алгоритма, анализирующего их отклонения от поведенной траектории. При

этом полностью отфильтровываются посторонние точки для 90—95% треков. Если таким способом не удалось отфильтровать все посторонние точки, то на третьем этапе фильтрация выполняется вручную оператором, который использует для этой цели цветной дисплей ЦДР-1, снабженный световым пером. Для этого информация о точках каждого трека выводится на экран цветного дисплея в виде точек на двух графиках, по вертикальной оси которых отложен радиус окружности сканирования, а по горизонтальной—отклонение точки от траектории в направлении φ или z , соответственно, для 1-го и 2-го графика. Масштаб графиков по горизонтали может меняться в широких пределах по нажатию соответствующих клавиш на клавиатуре терминала. Это позволяет оператору наблюдать расположение точек трека относительно проведенной траектории в присутствии посторонних точек, удаленных от трека на различные расстояния. Предусмотрена также возможность выдавать на экран обычную картинку, отображающую расположение измеренных точек в плоскости кадра. На экран дисплея точки 1-го трека выводятся красным цветом, точки второго трека—зеленым цветом, а посторонние точки—синим цветом. Дисплей снабжен световым пером, с помощью которого координата точки, указанной оператором на экране дисплея, вводится в ЭВМ. Указывая пером на точку, выведенную на экран, оператор может, в зависимости от установленной функции пера, относить эту точку к 1-му или 2-му треку, либо объявлять ее посторонней. При этом соответственно меняется цвет указанной точки на экране. Предусмотрена также возможность повторно проводить траекторию и выдавать на экран отклонения от нее. Это позволяет оператору проконтролировать правильность удаления посторонних точек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородюк В.П., Шкуденков В.Н. Препринт ОИЯИ Р10-85-744, Дубна, 1985.
2. Hough P.V.C., Powell B.W. Nuovo Cimento, 1960, v.18, p.1184.
3. Blair W.M., Powell B.W. Proceedings of International Conference on Data Handling Systems in High-Energy Physics. — Cambridge, 1970, p.813.
4. Розов Б.С. В кн.: Автоматическая обработка данных с пузырьковых и искровых камер. М.: Атомиздат, 1971, с.194.
5. Proceedings of European Spiral Reader Symposium. Stockholm, 1972. — Geneva, 1972, CERN 72-16.
6. Frisch O.R. et al. Proceedings of International Conference on Data Handling Systems in High-Energy Physics. Cambridge, 1970, p.285.
7. Плесс Л. и др. Труды 12-й Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964, с.409.
8. Berge J.P. et al. Proceedings of International Conference on Data Handling Systems in High-Energy Physics. Cambridge, 1970, p.61.
9. Allison W.W. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1970, v.84, p.129.
10. Gouach J.C. Proceedings of Oxford Conference on Computer Scanning. — Oxford, 1974, p.11.
11. Журкин В.В. и др. Труды международного симпозиума по вопросам автоматизации обработки данных с пузырьковых и искровых камер. — Дубна, 1971, с.158.
12. Баранчук М.К. и др. Труды семинара по обработке физической информации. — Арверан, 1975, с.322.
13. Жигунов В.П. и др. Труды семинара по обработке физической информации. — Арверан, 1975, с.293.
14. Barkov L.M. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1983, v.204, p.379—383.
15. Тумайкин Г.М. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. — Серпухов, 1977, с.443.
16. Коренченко С.М., Некрасов К.Г. ПТЭ, 1971, 1, с.54.
17. Нифонтов В.И., Орешков А.Д., Уваров Н.П. В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции. — Новосибирск, 1979, с.5.
18. Елинер Э.И., Клименко А.Д., Костылев Д.А. Микропроцессорные средства и системы, 1986, 6, с.41.

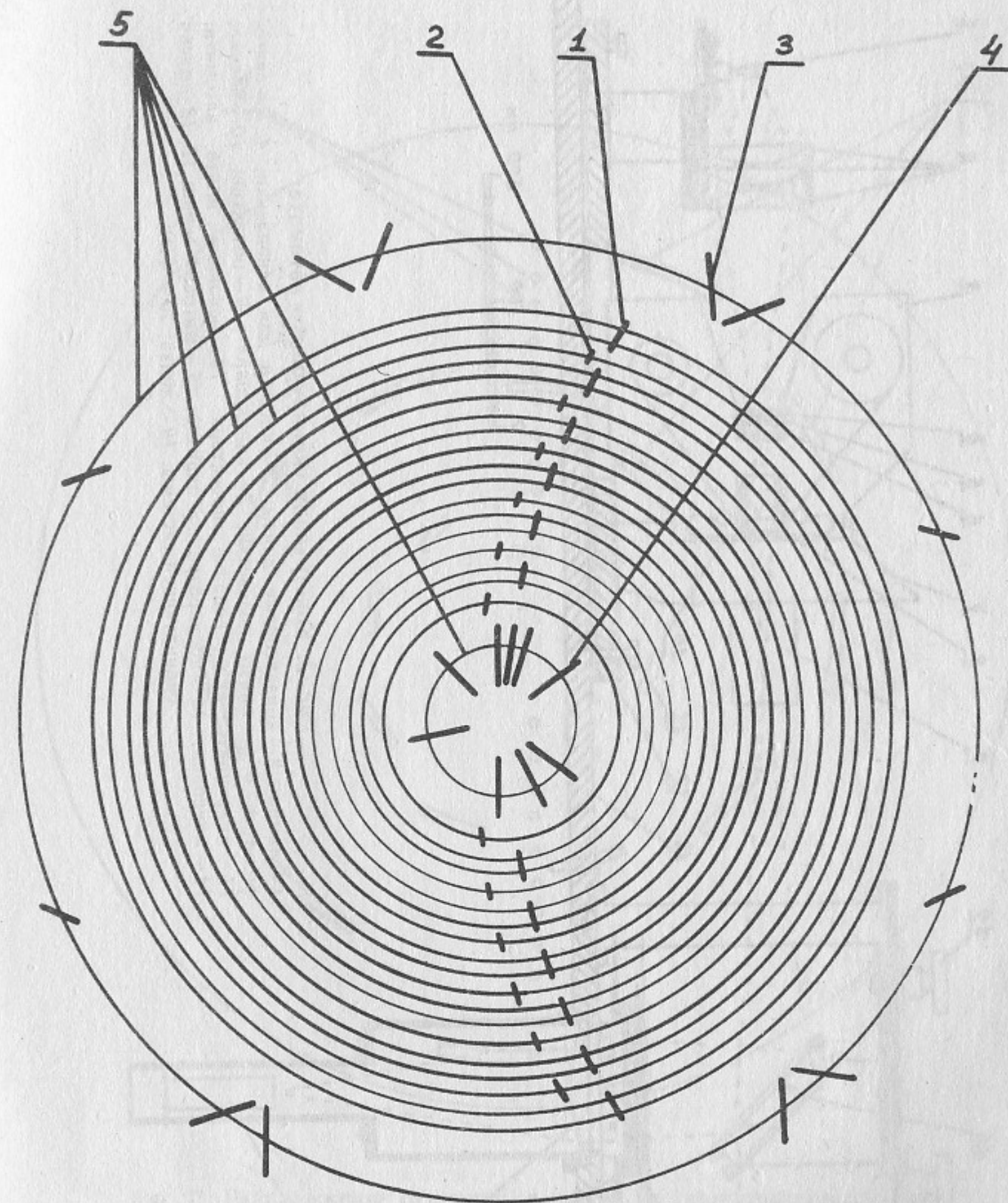


Рис. 1. Расположение окружностей сканирования на фотоснимке события с КМД:
 1—искры; 2—изображения искр в призмах; 3—реперные линии; 4—линии номера кадра;
 5—окружности сканирования.

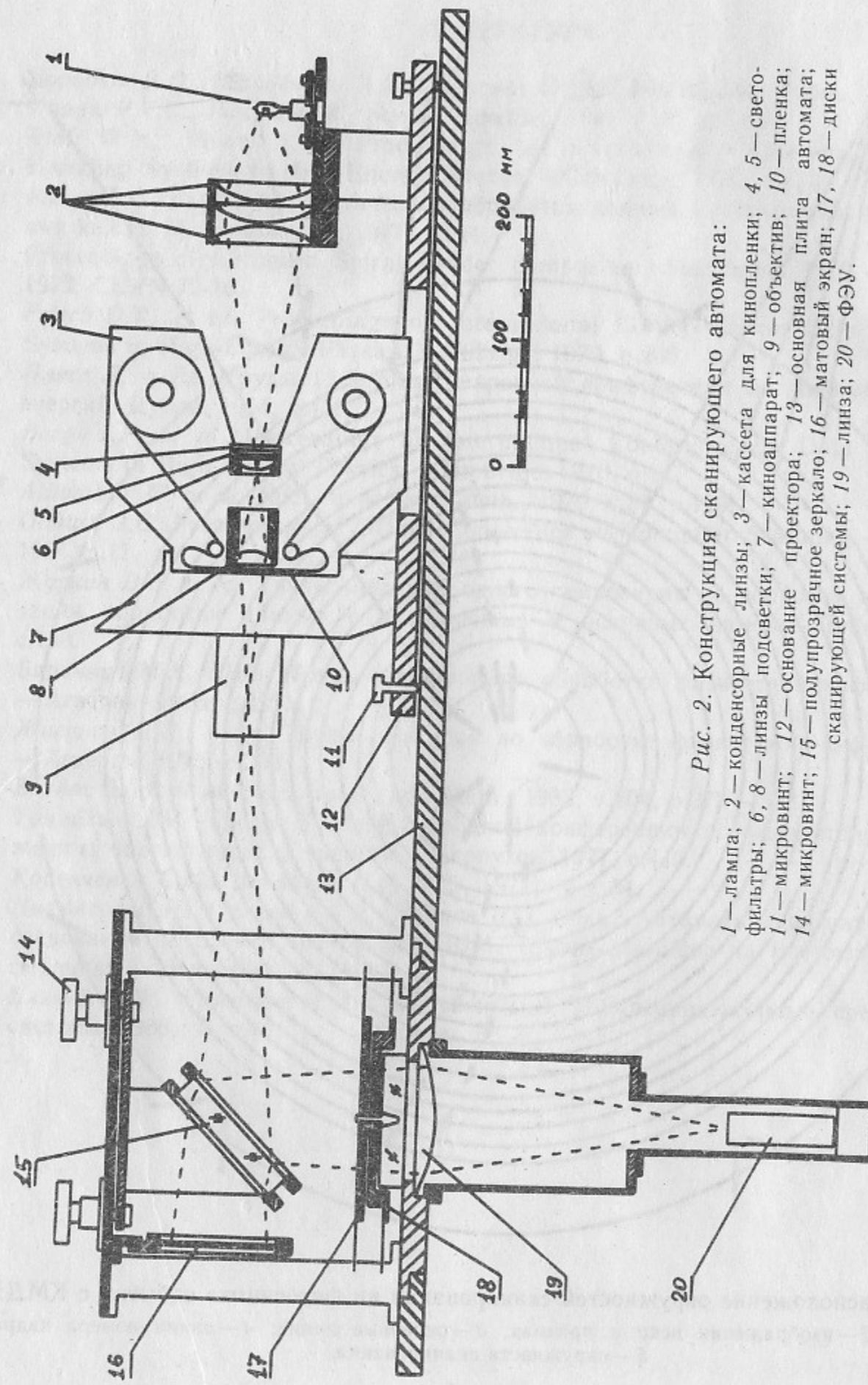


Рис. 2. Конструкция сканирующего автомата:

1—лампа; 2—конденсорные линзы; 3—кассета для киноплёнки; 4, 5—свето-
 фильтры; 6, 8—линзы подсветки; 7—киноаппарат; 9—объектив; 10—плёнка;
 11—микроинт; 12—основание проектора; 13—основная плита автомата;
 14—микроинт; 15—полупрозрачное зеркало; 16—матовый экран; 17, 18—диски
 сканирующей системы; 19—линза; 20—ФЭУ.

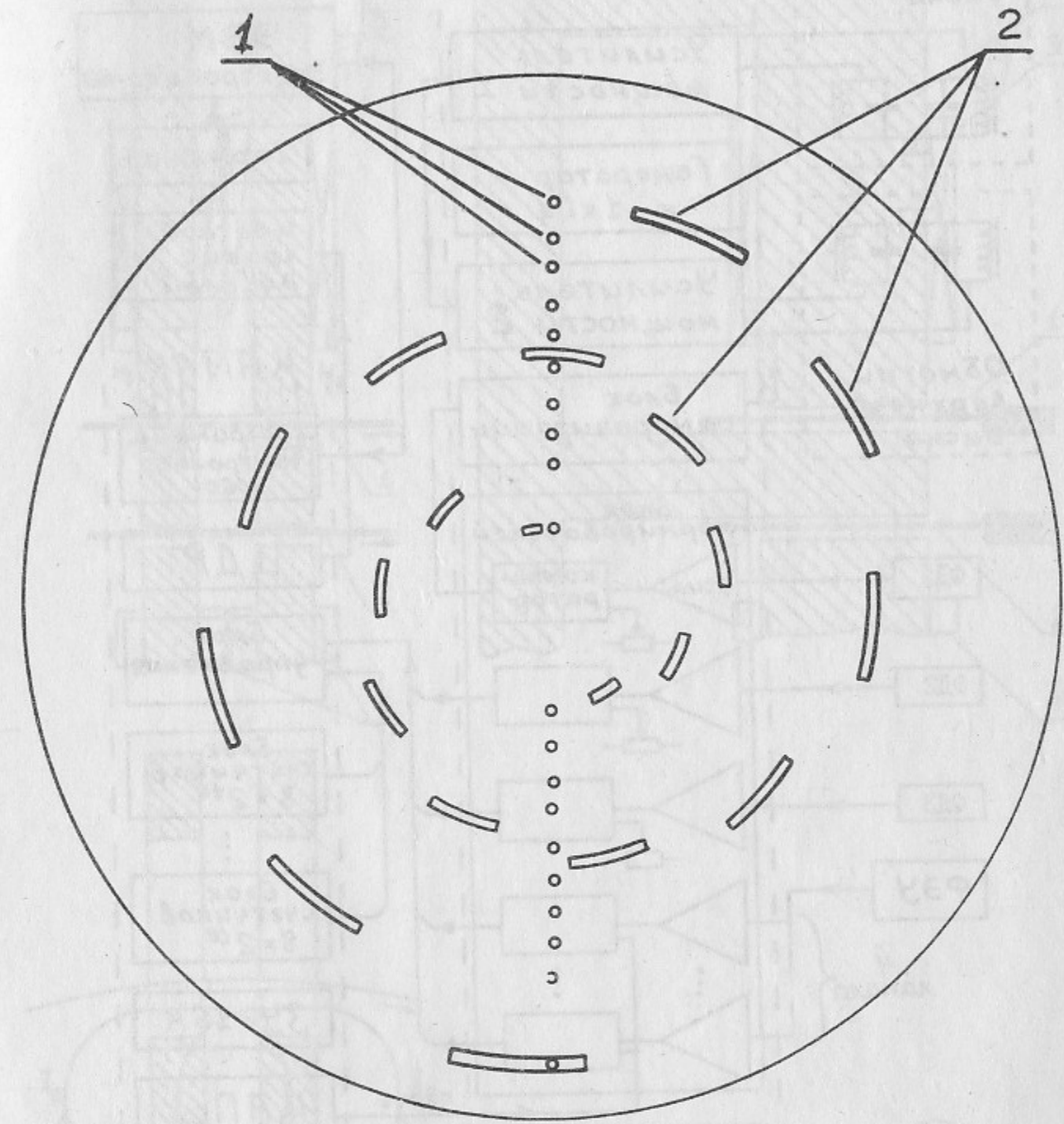


Рис. 3. Расположение отверстий и щелей на сканирующих дисках:

1—отверстия в нижнем диске; 2—щели в верхнем диске.

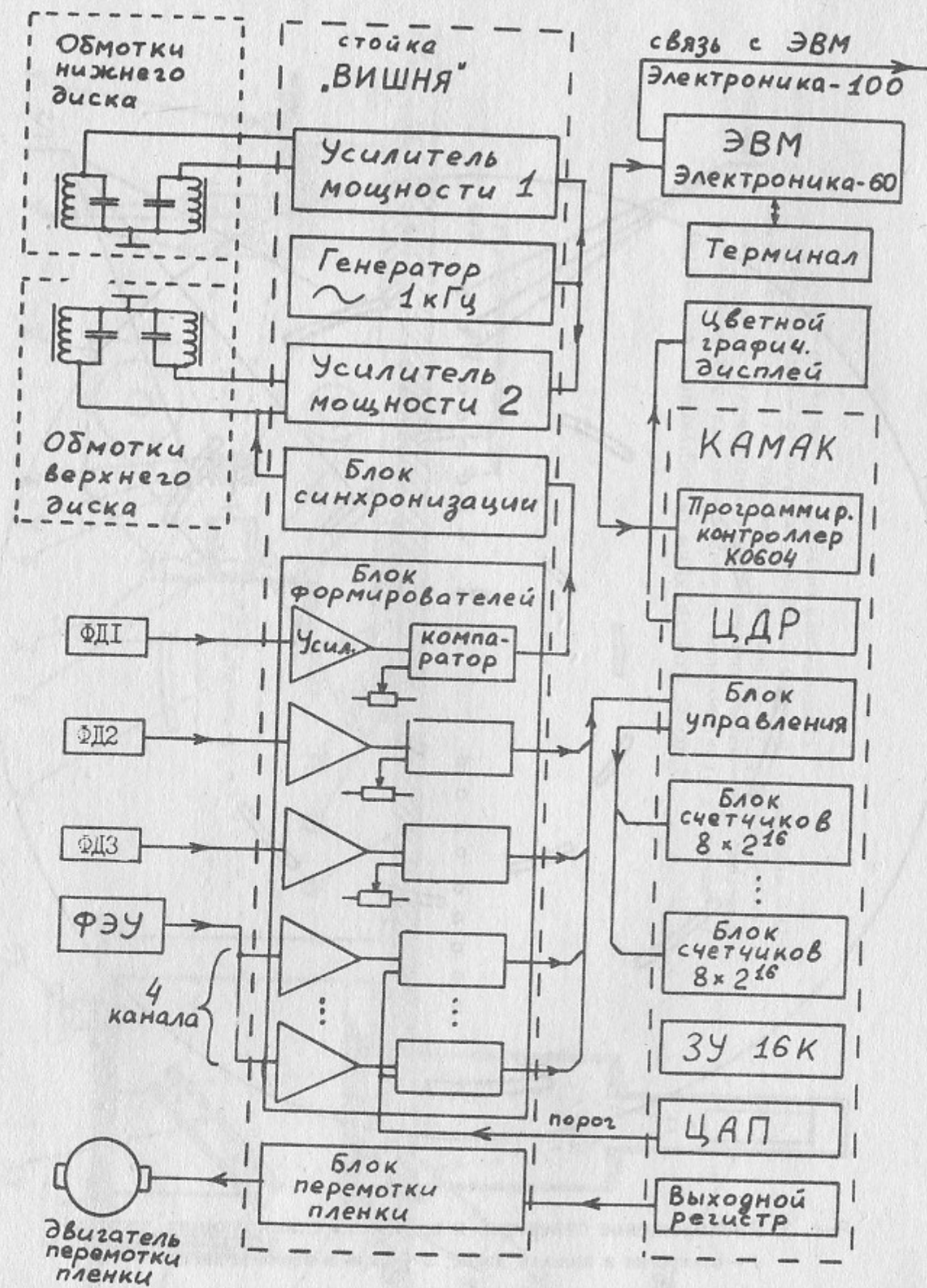


Рис. 4. Блок-схема электроники сканирующего автомата.

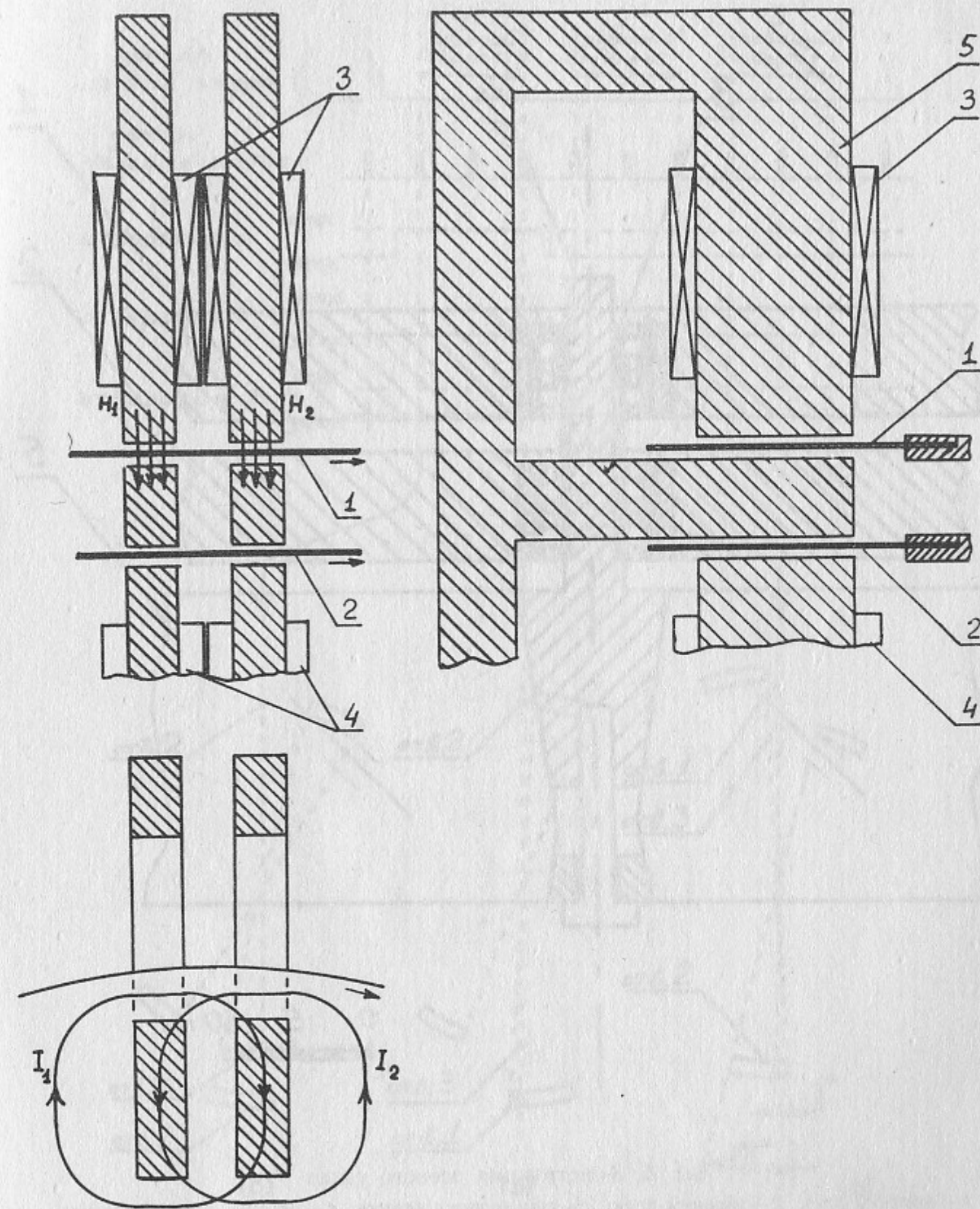


Рис. 5. Конструкция электромагнитного привода:

1 — верхний диск; 2 — нижний диск; 3 — обмотки привода верхнего диска; 4 — обмотки привода нижнего диска; 5 — магнитопровод.

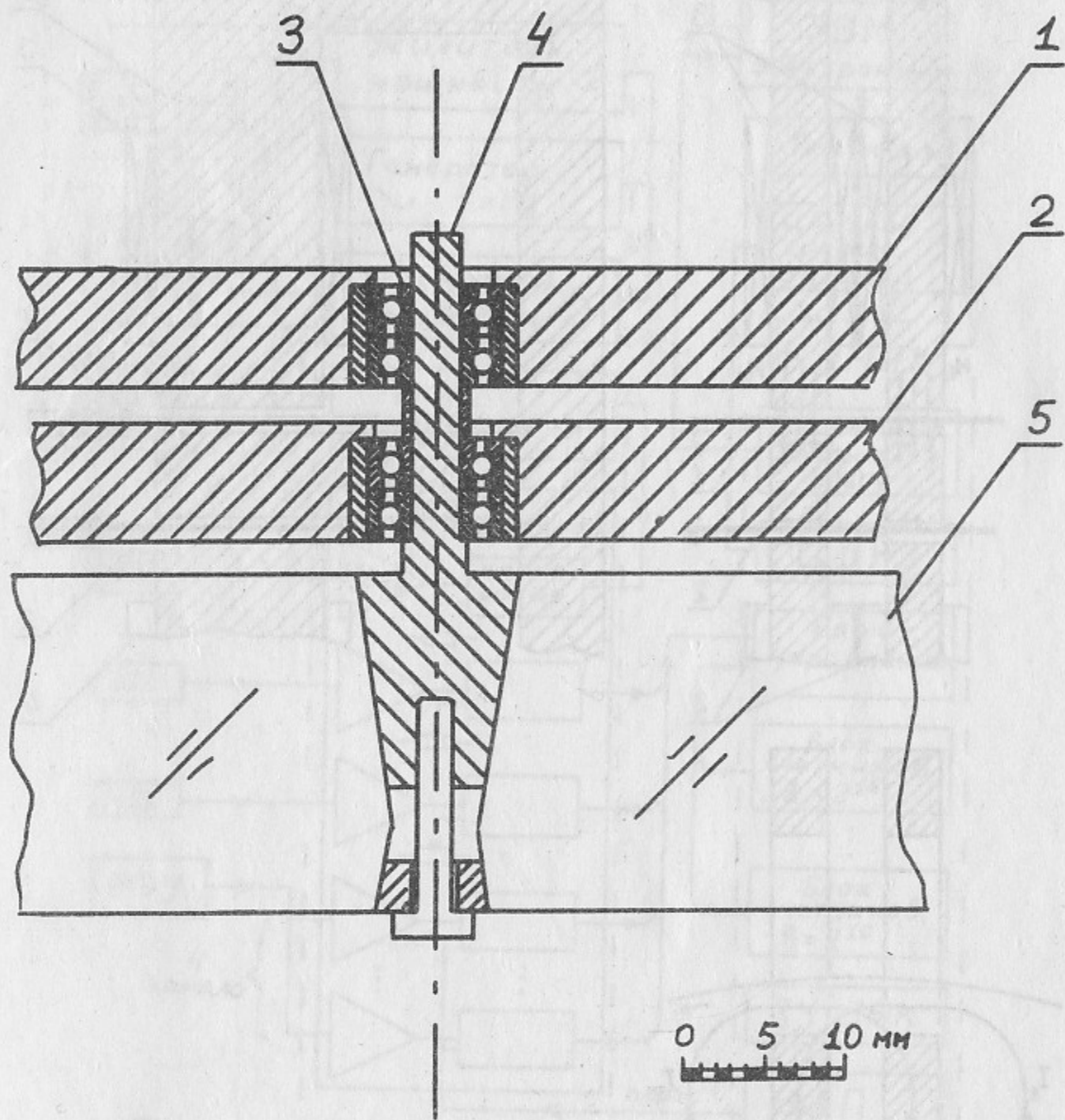


Рис. 6. Конструкция осевого узла:
 1 — верхний диск; 2 — нижний диск; 3 — шарикоподшипники; 4 — ось; 5 — опорное стекло.

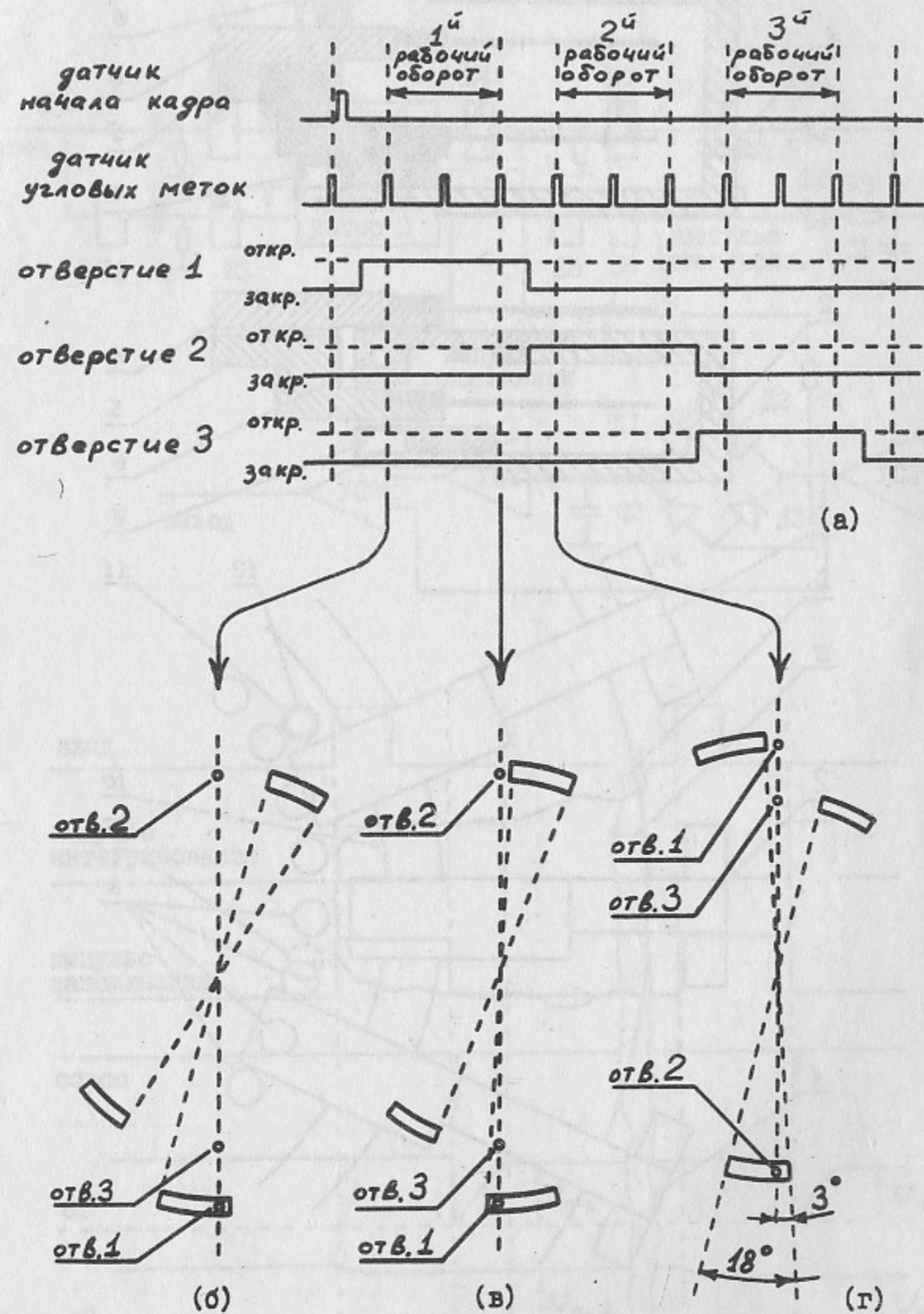


Рис. 7. Работа сканирующих дисков:
 а — временная диаграмма; б — начало 1-го рабочего оборота; в — конец первого рабочего оборота; г — начало второго рабочего оборота.

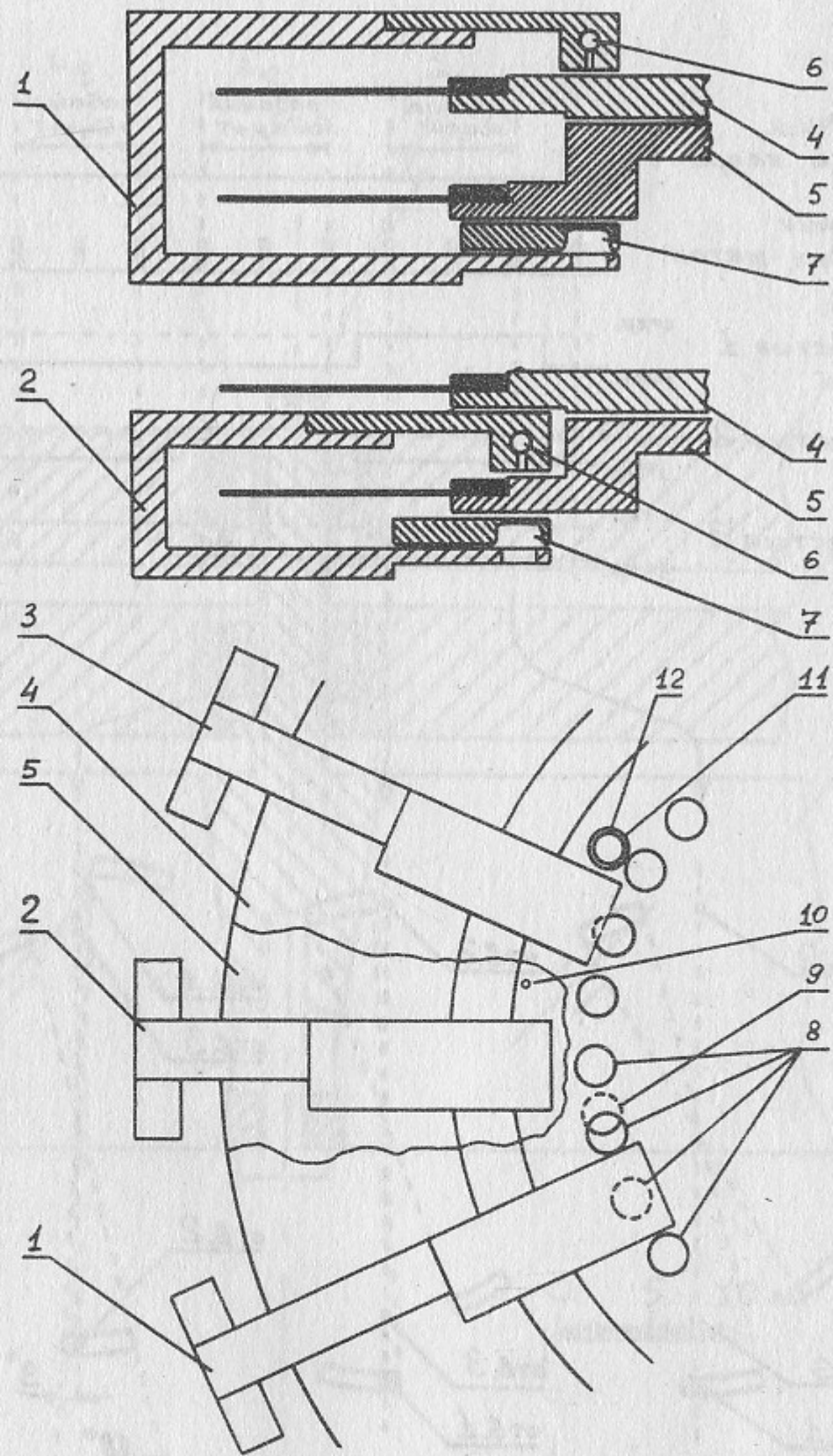


Рис. 8. Расположение фотодатчиков и синхронизирующих отверстий:

1—датчик синхроимпульсов; 2—датчик угловых меток; 3—датчик начала кадра; 4—верхний диск; 5—нижний диск; 6—лампочка; 7—фототранзистор; 8—30 синхроотверстий в верхнем диске; 9—синхроотверстие в нижнем диске; 10—2 отверстия 0,1 мм; 11—отверстие начала кадра в верхнем диске; 12—отверстие начала кадра в нижнем диске.

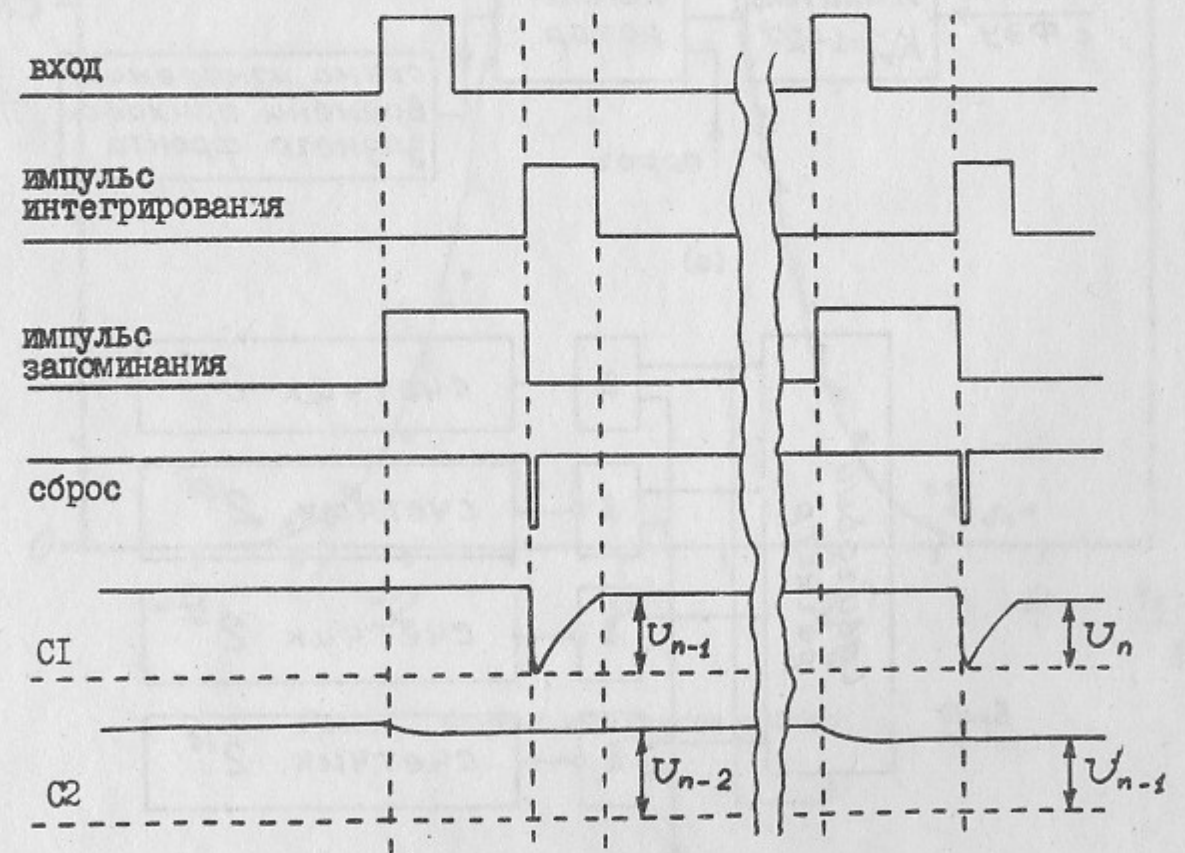
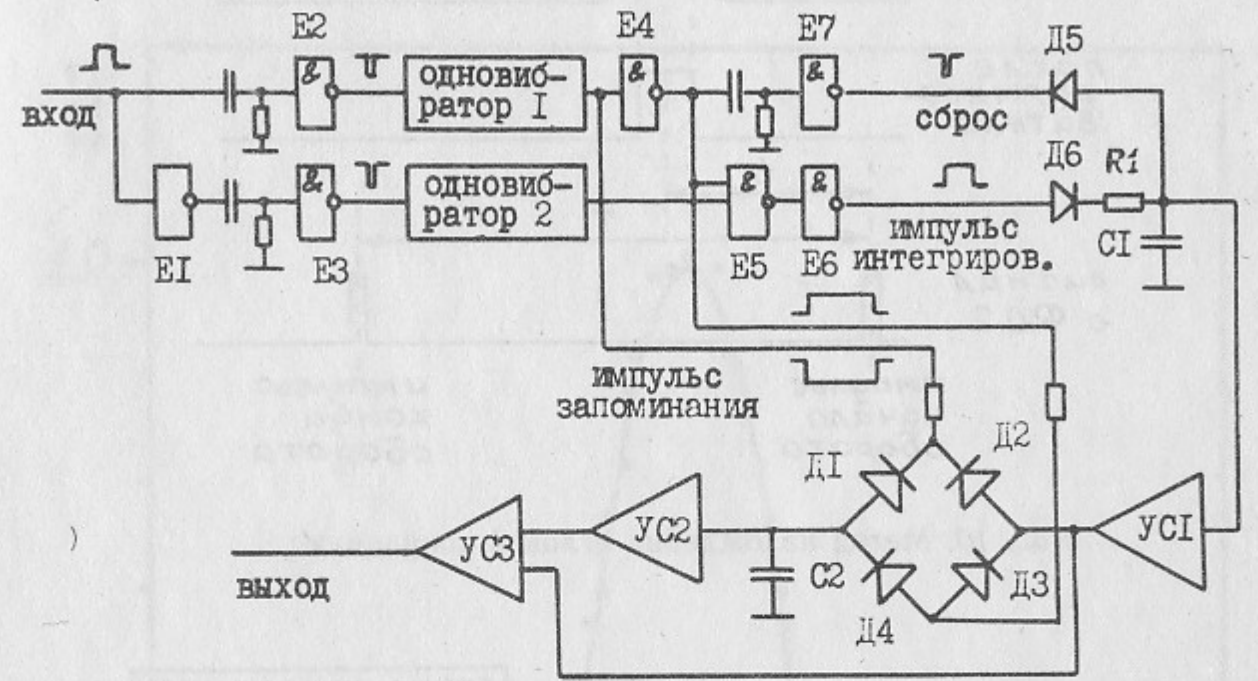


Рис. 9. Схема формирования сигнала обратной связи и временная диаграмма ее работы.

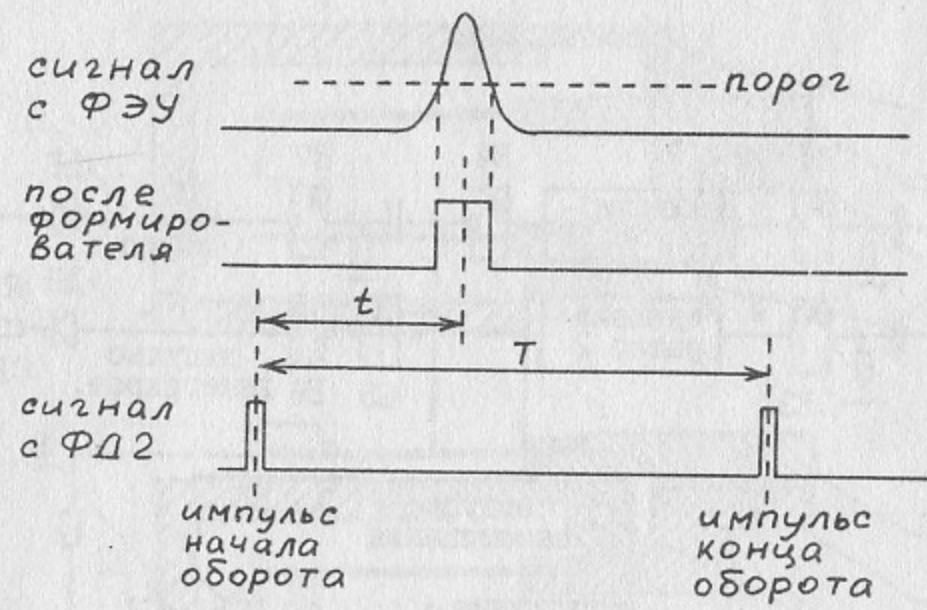
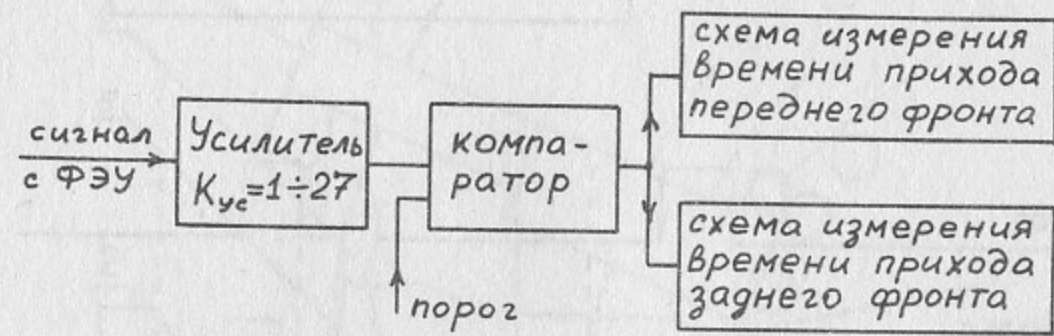
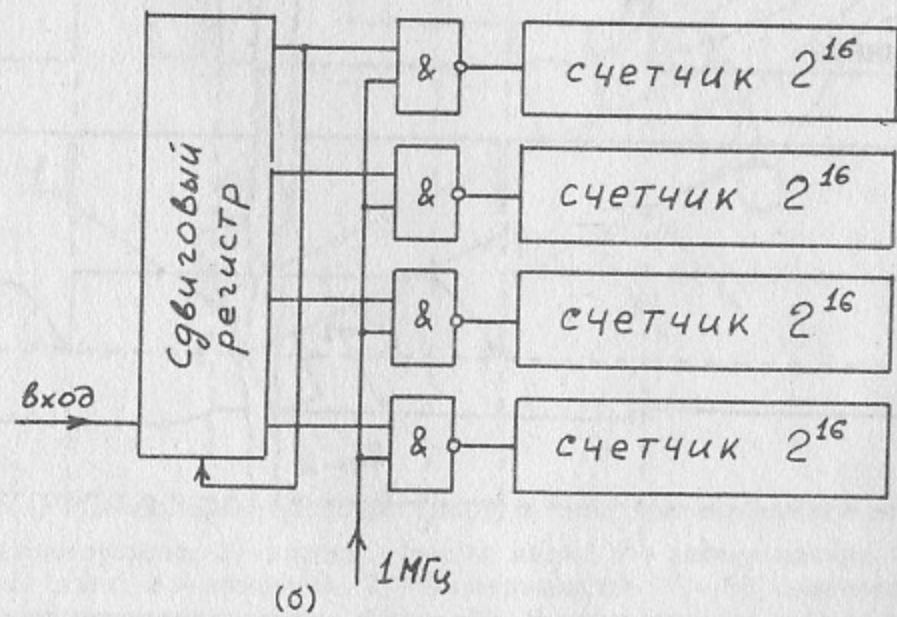


Рис. 10. Метод нахождения угловой координаты.



(а)



(б)

Рис. 11. а—Блок схема измерительного канала; б—схема измерения времени прихода фронта импульса.

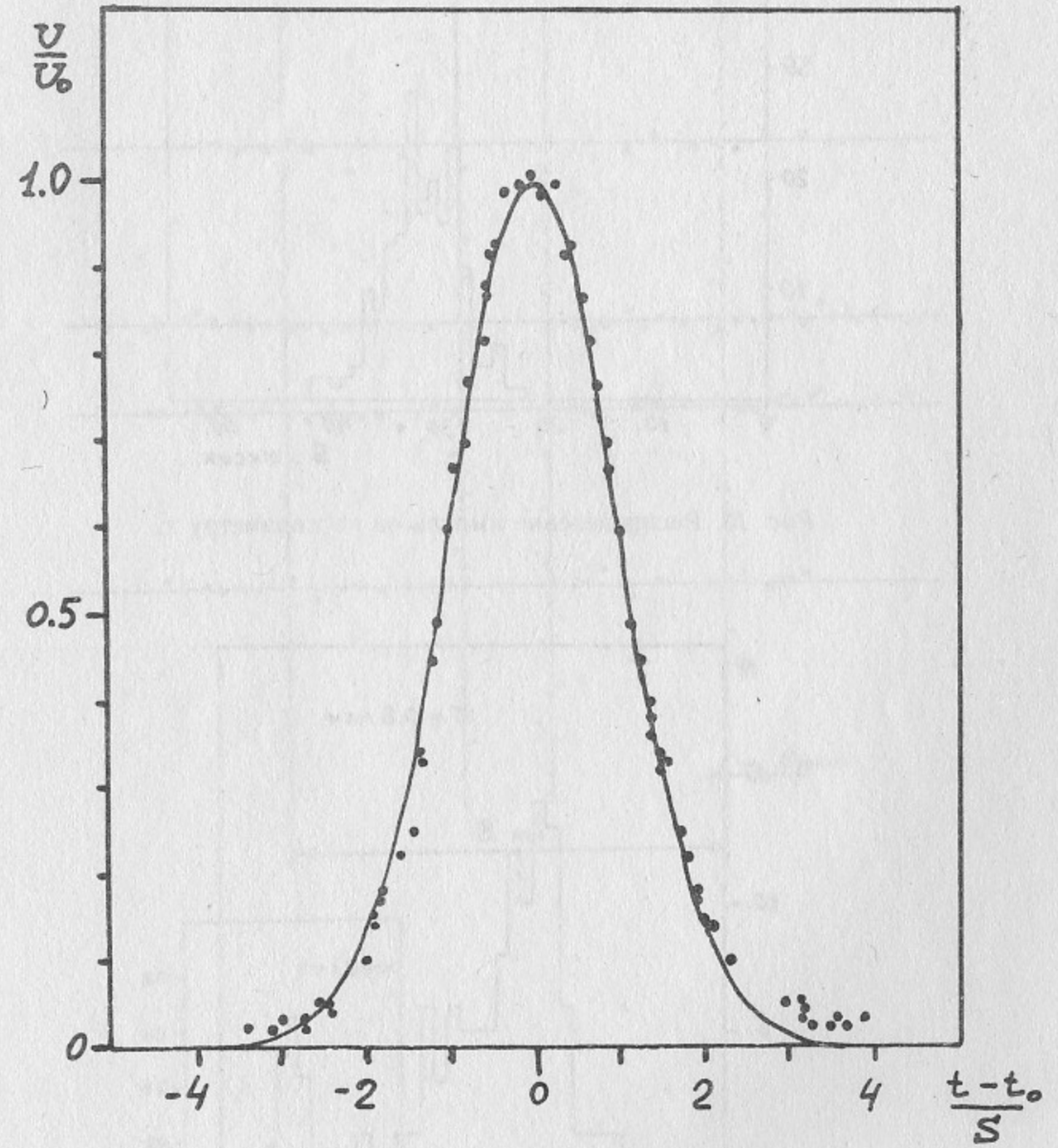


Рис. 12. Форма импульсов с ФЭУ.

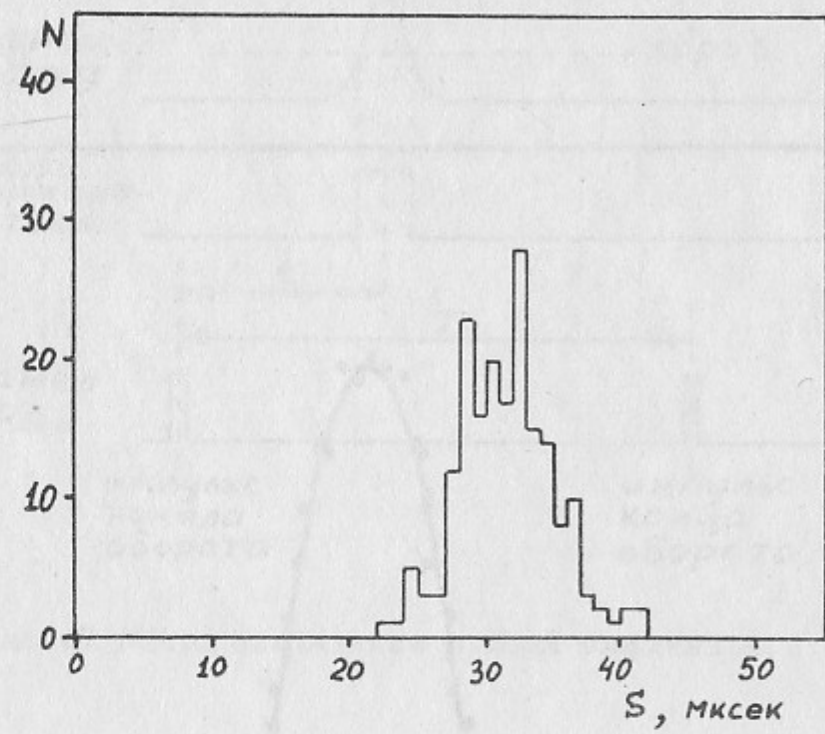


Рис. 13. Распределение импульсов по параметру s .

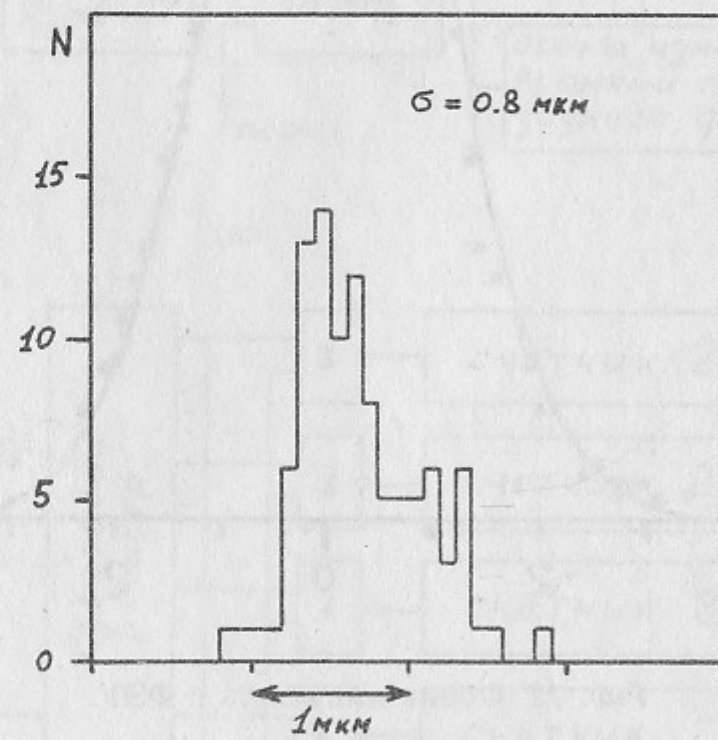


Рис. 14. Распределение значений угловой координаты при многократном измерении одной точки.

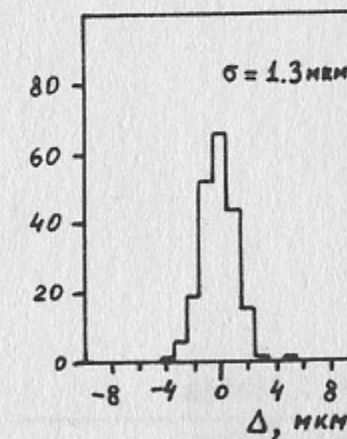
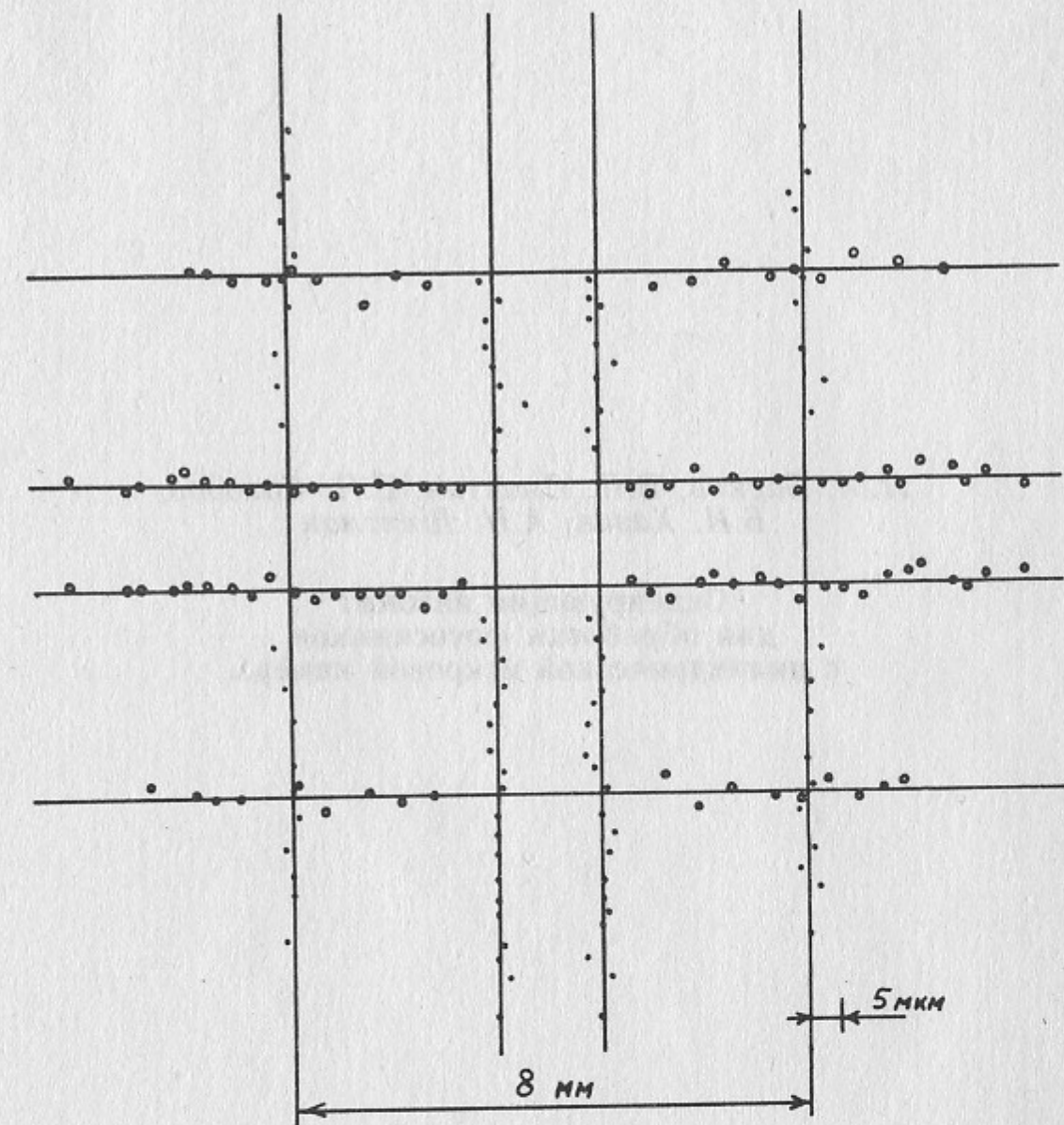


Рис. 15. Шаблонный кадр и его измерение на автомате:
 • — точки, измеренные на вертикальных линиях; ○ — точки, измеренные на горизонтальных линиях; гистограмма — распределение точек по отклонению от измеряемой линии.

*Л.М. Барков, В.П. Смахтин, Е.П. Солодов,
Б.И. Хазин, А.И. Шехтман*

**Сканирующий автомат
для обработки фотоснимков
с цилиндрической искровой камеры**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 20 ноября 1987 г.
Подписано в печать 21.XII 1987 г. МН 08687
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 3,5 печ.л., 3,0 уч.-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 161

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*