

М130594

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

Коляда Ю. Б.

РАЗРАБОТКА И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ

(№ 05. 251. Метрология и взаимозаменяемость)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель к. т. н., доц. Мироненко А. В.

Официальные оппоненты:

докт. техн. наук., профессор Корндорф С. Ф.
канд. техн. наук Саркин В. И.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан « . . . » 1971 г.

Защита диссертации состоится « . . . » 1971 г.
на заседании Совета факультета Автоматизации и механи-
зации производства МВТУ им. Баумана по адресу: Мо-
сква, Б-5, 2-я Бауманская, 5

С диссертаци
им. Н. Э. Баум

МВТУ

Отзывы пр
2-я Бауманска

Б-5,

Ученый секрет
кандидат техни

А. А.

М13 0592



1130597

Копия Ю.Б. Разработка и

Развитие ряда областей новой техники и, прежде всего, производство различных микроминиатюрных устройств предъявляет весьма жесткие требования к точности технологического и контрольно-измерительного оборудования.

Одной из задач, возникающих при массовом производстве полупроводниковых приборов, прецизионных часовых механизмов, устройств СВЧ, является осуществление координатных перемещений стола станка или измерительной машины с погрешностью не более $0,2 \pm 0,5$ мкм в диапазоне 30 ± 100 мм. Наряду с высокой точностью выдвигается требование автоматизации измерения перемещений при относительно высоком быстродействии. Существующее технологическое оборудование не всегда обеспечивает указанную точность, а соответствующие средства измерения отсутствуют среди приборов, выпускаемых серийно.

Задача измерения по двум координатам является более сложной по сравнению с линейными измерениями. Измерительная цепь устройства для измерения координат, кроме линейной меры, содержит образцовую систему координатных осей, которая неизбежно вносит дополнительные ошибки. Более сложной является аттестация координато-измерительных устройств. Точность измерения координат определяется, таким образом, как погрешностью измерения перемещений, так и непрямолинейностью и погрешностью расположения координатных траекторий. Последнее требует назначения жестких допусков на параметры направляющих, что вызывает значительные, а иногда непреодолимые трудности. Дальнейшее повышение точности измерения возможно при уменьшении влияния погрешностей направляющих на результат измерения, что может быть достигнуто либо коррекцией погрешностей последних, либо путем рационального построения измерительной схемы. Настоящая работа посвящена решению ряда вопросов, связанных с разработкой новых средств измерения координат, и разработке средств и методов исследования их метрологических характеристик.

І. Обзор и сравнительный анализ устройств для измерения координат. Постановка задачи

Анализ существующих координатных устройств позволил разделить их измерительные схемы на три типа в зависимости от выполнения в них компараторного принципа (принципа Аббе). К первому типу отнесены устройства, не удовлетворяющие принципу Аббе по обеим координатам, ко второму типу — устройства в которых принцип Аббе выполнен по одной координате, к третьему типу — устройства, в которых принцип Аббе выполнен по двум координатам.

Первый тип находит ограниченное применение, что связано с отсутствием каких-либо преимуществ по сравнению с устройствами второго и третьего типов. Нарушение же принципа компарирования по обеим координатам снижает точностные возможности всего устройства.

Координатные устройства второго типа находят широкое применение в станках для обработки по координатам, в том числе во всех координатно-расточных станках, в измерительных микроскопах и координатно-измерительных машинах.

Измерительная схема третьего типа используется в прецизионных устройствах. Несмотря на большую сложность, координатные устройства третьего типа обладают рядом преимуществ и, в частности, позволяют снизить требования к точности направляющих.

Погрешность, вносимая направляющими в результат измерения, в ряде случаев является преобладающей. Для устройств второго типа характерным является наличие относительного перемещения визирного микроскопа и одной из шкал в направлении, нормальном к её оси, что приводит к нарушению принципа Аббе. Этот недостаток может быть устранен без принципиального изменения измерительной схемы. Нарушение последовательного расположения шкалы и линии измерения приводит к возникновению погрешности,

величина которой в общем случае определяется выражением

им. Н. З. Баумана
БИБЛИОТЕКА

$$\Delta = H \sin \alpha + 2L \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (I)$$

где H — расстояние между осью шкалы и линией измерения;

L — проекция отрезка, соединяющего визирный и отсчётный микроскопы, на линию параллельную оси шкалы и линии

измерения;

α — угол поворота стола, вызванного непрямолинейностью направляющих;

При измерении в направлении одной из координат в результате измерения войдет так же непрямолинейность траектории другой координаты. Величина погрешности, вносимой непрямолинейностью и поворотом определяется точностью изготовления направляющих, их деформациями при перемещении и нагружении, стабильностью масляного клина, температурными деформациями и т.д.

По литературным данным у современных прецизионных устройств (координатно-расточных станков, измерительных микроскопов, делительных машин, компараторов) угловое перемещение стола, вызванное непрямолинейностью направляющих имеет величину 1 ± 8 угловых секунд. Непрямолинейность траекторий кареток имеет величину $0,5 \pm 2$ мкм на всей длине хода. Минимальные значения погрешности относятся к лучшим КРС, максимальные — к микроскопу УИМ-21. В ряде случаев указанной точности направляющих недостаточно. Так как уменьшение погрешностей изготовления направляющих затруднительно, применяют различные корректирующие устройства. В работе рассмотрены схемы коррекции, использующие образцовую стеклянную линейку, электромеханическое корректирующее устройство, аксикон, афокальную оптическую систему. Величина поправки, вносимой корректирующим устройством может быть записана на каком-либо носителе при аттестации. Такой способ коррекции может быть назван "способом введения аттестата". Классическим примером его является коррекция микрометрических винтов от лемкала. Способ пригоден только при достаточной стабильности корректируемой траектории. Коррекция может осуществляться по результатам сравнения действительной траектории с образцовой. В этом случае для коррекции непрямолинейности образцовая траектория должна быть реализована в координатном устройстве, например, в виде поверхности, обработанной с высокой точностью, оптического устройства типа аксикона или афокальной системы.

При измерении по двум координатам необходимо вводить поправку как на поворот кареток, так и на непрямолинейность и расположение координатных траекторий. Применение известных корректирующих устройств связано при этом со значительным усложнением конструкции и увеличением объема оборудования.

Отличительной особенностью координатного устройства третьего типа является выполнение компараторного принципа для всех точек рабочего поля стола. В одном из конструктивных вариантов это достигается благодаря тому, что отсчётные устройства и визирное устройство неподвижно установлены на основании прибора, а подвижные части отсчётных устройств взаимодействуют через скользящий контакт с двумя точно обработанными поверхностями, принадлежащими столу. Последние образуют по существу встроенный эталон координатных осей и служат базами при измерении. В результате такого выполнения схемы, оказывается возможным установить отсчётные устройства таким образом, чтобы оси их шкал и ось визирного устройства всегда пересекались в одной общей точке, независимо от положения стола. Очевидно, что погрешности формы эталонных поверхностей и погрешность прямого угла между ними войдут полной величиной в результат измерения так же, как и погрешности направляющих входят в результат измерения в устройствах первого и второго типа. Однако конфигурация эталонных поверхностей значительно проще конфигурации направляющих, что позволяет полностью реализовать достижимую в настоящее время точность изготовления.

Координатное устройство третьего типа может быть построено также с использованием афокальной системы, крестообразного растра, интерференционных датчиков перемещений.

В результате проведённого сравнительного анализа в работе делается вывод о том, что измерительная схема третьего типа обладает рядом преимуществ. Отсутствие компараторной погрешности и использование встроенного эталона координатных траекторий в значительной мере ослабляют в указанной схеме влияние погрешностей направляющих и позволяют уменьшить погрешность измерения по сравнению с координатными устройствами первого и второго типов. Однако, известные конструктивные схемы требуют дальнейшего совершенствования.

Обзор литературных источников показал, что работы, посвящённые анализу зависимости погрешностей измерения координат от измерительной схемы, отсутствуют. Отсутствуют данные по точностным характеристикам координатных устройств третьего типа. Работы, в которых затрагиваются вопросы точности измерения координат, содержат либо анализ погрешностей конкретного устройства, либо анализ погрешностей обработки конкретного изделия,

что не позволит сделать какие-либо обобщения.

При выборе типа координатного устройства в зависимости от точностных требований, всегда возникает необходимость в анализе и сопоставлении различных схем. Последнее позволяет сделать вывод, что к анализу схем координатных устройств желателен единый подход, позволяющий учесть как общие, так и частные их особенности.

На основании изложенного в диссертации поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ погрешностей существующих схем измерения координат.

2. Разработать оптимальные по точности измерительные схемы.

3. Разработать методики и средства исследования метрологических характеристик прецизионных координато-измерительных устройств.

4. Выполнить экспериментальное исследование погрешностей устройства для измерения координат, построенного по предложенной схеме.

2. Анализ погрешностей координато-измерительных устройств

Координатные устройства (КУ), отнесенные к одному типу могут иметь различные компоновочные схемы. Анализ кинематических схем КУ показал, что координатное устройство можно рассматривать как простую разомкнутую (второй тип) или замкнутую (первый и третий тип) кинематическую цепь, обладающую свойством обратимости. В зависимости от того, какое звено этой цепи является неподвижным, может быть получена та или иная компоновка КУ. Используя свойства обратимости низших пар, можно показать, что все компоновочные схемы получаются циклической перестановкой звеньев. При этом взаимное расположение и траектории относительного движения звеньев не меняются. Таким образом, анализ ошибок КУ, относящихся к одному типу, независимо от компоновки может быть проведен на основе рассмотрения некоторой общей измерительной схемы, справедливой для всех компоновок.

Для теоретического исследования погрешностей КУ в работе использованы теоремы теоретической механики, рассматривающие плоскопараллельное движение твердого тела. Показано, что для

координатных устройств первого, второго и третьего типа возможно построение единой обобщенной схемы измерения. При этом погрешностный поворот кареток интерпретируется как вращение подвижной системы координат, а непрямолинейность траекторий точки визирования – как перенос начала этой системы. Такой подход позволяет получить простые выражения, описывающие погрешность вносимую КУ в результат измерения координат:

$$\Delta x = \alpha_y - h_x \varphi_x + \frac{1}{2} \ell_x \varphi_x^2, \quad \Delta y = \alpha_x + h_y \varphi_y + \frac{1}{2} \ell_y \varphi_y^2, \quad (2)$$

где α_y – непрямолинейность и ошибка расположения траектории точки визирования при перемещении в направлении y ;
 h_x – расстояние между осью шкалы x и линией измерения;
 φ_x – поворот каретки координаты x и т.д.

Первый член в формуле (2) учитывает взаимное влияние координатных перемещений, проявляющееся как непрямолинейность траекторий кареток и поворот кареток при перемещении. Погрешность образуется из ошибки собственно линейного измерения (погрешность компарирования) и погрешности формы и расположения координатных траекторий, то есть погрешности образцовой системы координат. Координатное устройство при этом рассматривается как состоящее из устройства для реализации образцовой системы координат и ряда устройств для линейных измерений по числу координатных осей.

Для случая измерения по трём координатам погрешность определяется выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \alpha_{y(x)} + \alpha_{z(x)} + h_{x(y)} \varphi_{x(y)} + h_{x(z)} \varphi_{x(z)} \\ \Delta y &= \alpha_{x(y)} + \alpha_{z(y)} + h_{y(x)} \varphi_{y(x)} + h_{y(z)} \varphi_{y(z)} \\ \Delta z &= \alpha_{x(z)} + \alpha_{y(z)} + h_{z(x)} \varphi_{z(x)} + h_{z(y)} \varphi_{z(y)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha_{y(x)}$ – непрямолинейность и ошибка расположения траектории точки визирования при перемещении в направлении y , приведённые к оси x ;
 $h_{x(y)}$ – проекция на ось y расстояния между осью шкалы x и линией измерения;
 $\varphi_{x(y)}$ – поворот каретки координаты x в плоскости oxy , и т.д.

В диссертации показано, что результаты проведенного рас-

смотрения могут быть распространены на многокоординатные измерительные машины и обрабатывающие системы. Необходимым условием последнего является назначение общего начала отсчёта для функций, описывающих траекторию точки визирования и угловое положение всех кареток КУ в процессе их перемещения. Указанный подход позволяет при анализе погрешностей КУ оперировать только с данными, полученными при аттестации, отвлекаясь от характера механических связей. При этом каждая каретка рассматривается как продольный компаратор, текущая погрешность которого определяется расстоянием между линией шкалы и линией измерения и углом погрешностного поворота. Измерение с помощью кареток-компараторов осуществляется от осей образцовой системы координат, реализованных в виде траекторий кареток, направления перемещения которых ортогональны к рассматриваемой линии измерения. Погрешность образцовой системы координат определяется ошибками формы и расположения указанных траекторий.

Полученные в работе выражения для расчёта погрешности использованы для сравнительного анализа КУ первого, второго и третьего типов. Результаты анализа показывают, что требования к стабильности углового положения кареток КУ третьего типа существенно ниже, чем для устройств других типов. Требования к форме и расположению координатных траекторий, то есть к точности реализации координатных осей, одинаковы для всех типов. Преимущества КУ третьего типа состоят в возможности конструктивно выделить образцовую систему координат в виде самостоятельного узла, точность изготовления и стабильность которого могут быть значительно выше, чем обычных направляющих. Это достигается благодаря тому, что более сложная кинематическая схема устройств третьего типа позволяет осуществить в них, кроме последовательного расположения шкалы и линии измерения, по крайней мере, частичное разделение транспортных и измерительных функций между различными кинематическими парами. Повышение технологической точности измерительных пар достигается при этом заменой низших пар высшими, что возможно при наличии в кинематической схеме низших пар, налагающих только пассивные связи. Полное разделение транспортных и измерительных функций может быть достигнуто при замене в высшей паре механической связи немеханической (например, оптической).

3. Макет устройства для измерения координат

Наиболее общие принципы конструирования координатных устройств третьего типа сформулированы следующим образом:

1. Оси шкал датчиков перемещений и ось рабочего органа должны пересекаться в одной точке, неподвижной относительно общего основания, из чего следует, что неподвижные части датчиков и стойка рабочего органа должны быть жестко связаны с общим для них основанием.

2. Узел, реализующий образцовую систему координат должен быть жестко связан со столом, и, следовательно, с объектом измерения, установленным на столе.

3. Общее основание, связывающее неподвижные части отсчётных устройств и стойку рабочего органа, должно быть неподвижным, а стол — подвижным, т.е. предпочтительна компоновочная схема "крестовый стол". При реализации образцовой системы координат используются те же принципы, которые применяются в средствах контроля прямолинейности, так как задача состоит в создании двух образцовых прямых, расположенных под углом 90^0 . Если последнее не налагает особых ограничений на выбор метода получения образцовой прямой, то необходимость реализации отсчёта перемещений от этой прямой выдвигает некоторые дополнительные требования. Рассмотрены различные принципы получения образцовой прямой, определены возможные области их применения в зависимости от диапазона и требуемой точности. Приводится описание предложенных автором "растровой" реализации образцовой системы координат и варианта системы с контактным съёмом. Рассматриваются их точностные возможности в сопоставлении с известными системами: интерференционной, контактной, оптической.

В предложенной контактной системе, благодаря конструктивным мерам удаётся уменьшить измерительное усилие до величины, при которой практически не возникает износа образцовой линейки. Кроме уменьшения измерительного усилия, обеспечивается его высокая стабильность, что позволяет применить измерительный наконечник из материала, обладающего малым коэффициентом трения. Последнее, кроме дополнительного уменьшения износа, уменьшает боковое усилие на измерительном наконечнике.

Растровая реализация образцовой системы координат предпо-

лагает использование в качестве рабочей меры растров с длиной штриха, равной диапазону измерения. Растры обеих координат жестко связаны со столом. При этом обеспечивается бесконтактный съем информации, что исключает износ. Конструктивная схема КУ отличается максимальной простотой, что позволяет применять её для устройств различного назначения, включая образцовые приборы и обрабатываемые устройства типа электроэррезионных станков и фотоповторителей.

При разработке макета координато-измерительного устройства выбор был остановлен на контактном варианте, так как в этом случае образцовые линейки могут быть использованы как в системе с контактным съёмом, так и с интерференционными датчиками, что расширяет экспериментальные возможности макета.

На основе краткого обзора и сопоставления известных типов измерительных систем в работе показано, что поставленным требованиям удовлетворяет растровая компенсационная измерительная система, разработанная на кафедре "Метрология и взаимозаменяемость" МВТУ им. Баумана.

Схема интерполирующей ступени (точная ступень) растровой компенсационной измерительной системы содержит обратный преобразователь, конструктивно объединенный с преобразователем недокомпенсации, усилитель, фазовый демодулятор, нуль-орган, реверсивный счётчик и преобразователь код-напряжение. Обратный преобразователь представляет собой устройство для компенсации перемещения. Преобразователем недокомпенсации служит растровое сопряжение, состоящее из измерительного растра и индикаторного растра. Индикаторный растр закреплен на упругом элементе. Шаг растров датчиков перемещений 50 мкм, дискретность отсчёта 0,1 мкм, результат измерения представляется в цифровой форме. Точная ступень работает в режиме следящего уравнивания, что обеспечивает постоянное соответствие выходного кода положению измерительного растра.

Для исследования погрешности точной ступени растрового компенсационного датчика перемещений в работе использован метод структурного анализа. Получено следующее выражение для относительной ошибки интерполирования:

$$\delta = \delta_1 + \delta_5 - \delta_4 + \Delta_{2'''} \frac{K_5}{K_2 K_{2''} K_4 y} + \Delta_{\infty} \frac{K_5}{K_2 K_{2''} K_{2'''} K_4 y}, \quad (4)$$

где δ_1 - относительная ошибка положения экстремума (отнесенная к периоду меры);
 δ_5 - относительная погрешность первого и второго рода преобразователя код-напряжение;
 δ_4 - относительная погрешность первого и второго рода магнитозлектрического преобразователя;
 $\Delta_{2''}$ - абсолютная погрешность первого рода демодулятора;
 Δ_{∞} - абсолютная погрешность первого рода интегрирующего звена;
 K_2, K_4, K_5 - коэффициенты передачи соответствующих звеньев;
 y - выходная величина.

При достаточной величине коэффициентов K_2 ошибки $\Delta_{2''}$ и Δ_{∞} в практической схеме легко удаётся уменьшить до пренебрежимо малой величины. Так, при шуме компаратора 10 мВ и крутизне тракта, включающего демодулятор, 2 В/мкм, ошибка в линейной мере составляет 0,01 мкм. Таким образом, погрешность компенсационного датчика перемещений практически полностью определяется погрешностью шкалы, погрешностью преобразователя напряжение-код и погрешностью обратного преобразователя, то есть звеньями, не охваченными обратной связью и звеньями, стоящими в обратной цепи.

В качестве грубой ступени отсчёта в макете использован кодовый контактный датчик. Младшие разряды датчика выполнены в виде круговой шкалы, установленной на микрометрическом винте, перемещающем стол. Старшие разряды выполнены в виде линейной шкалы, установленной на основании прибора. Применение кодового датчика в сочетании с микрометрическим винтом позволило получить размер наименьшего элемента кодовой шкалы равным 1 мм, что существенно упростило изготовление датчика.

В диссертации изложены принципы работы и приведены основные характеристики узлов электронной схемы датчиков перемещений. Приводится описание конструктивного исполнения координатного устройства, датчиков, механизма микроподачи, обратного преобразователя.

4. Исследование метрологических характеристик устройств для измерения координат

Погрешность устройства для измерения координат складывается

ся из погрешности датчика перемещений и погрешности образцовой системы координат.

Погрешность компенсационного растрового датчика перемещений возникает из-за ошибок растровой шкалы: местной, периодической и прогрессивной, ошибок интерполирования, к которым отнесены: нелинейность, гистерезис, последствие и дрейф нуля обратного преобразователя, нелинейность преобразователя код-напряжение, погрешность наведения в нулевое положение и случайной составляющей инструментальной погрешности, которая возникает из-за наличия трения и зазоров в механических узлах.

Погрешность образцовой системы координат включает непрямолинейность образцовых траекторий и погрешность их расположения.

Для определения перечисленных составляющих суммарной погрешности разработаны и экспериментально исследованы:

- методика и аппаратура для определения внутришаговых ошибок датчиков перемещений с относительной погрешностью $0,01\%$;
- методика и аппаратура для определения погрешностей растровой меры со средней квадратической ошибкой $0,03$ мкм;
- методика и аппаратура для определения погрешности формы и расположения координатных траекторий со средней квадратической погрешностью $0,02$ мкм.

Для исследования линейности обратного преобразователя в качестве образцовой меры использовался измерительный растр. Отклонение якоря осуществлялось на три шага растра, то есть на величину, в три раза превышающую рабочий диапазон устройства. Образцовые токи в катушке преобразователя задавались с помощью прецизионного делителя напряжения построенного по схеме с постоянным выходным сопротивлением. Величина ошибки, отнесенная к рабочему диапазону, находилась аналитически. Применение описанной методики объясняется тем, что в диапазоне 50 мкм (один шаг растра) нет мер и приборов с относительной погрешностью $0,02 \pm 0,01\%$.

Исследование накопленной ошибки шкалы выполнено с использованием в качестве образцовой меры концевых мер и контактного способа измерения. Для осуществления последнего разработан нуль-индикатор с измерительным усилием 5 гс, порогом чувствительности $0,01$ мкм и средней квадратической ошибкой наведения

на плоскость меры 0,012 мкм. В работе приводится описание его конструкции и принципа действия.

Измерение ошибок формы и расположения образцовых линеек проводилось с помощью нуль-индикатора с использованием в качестве образцовой плоскости рабочей поверхности концевой меры и в качестве образцового угла – угловой меры. В последнем случае для устранения систематической ошибки измерение проводилось при двух угловых положениях меры в плоскости стола, отличающихся на 90°.

Для выполнения всех экспериментальных исследований, решающая способность датчиков перемещений была доведена до 0,01 мкм путем подключения дополнительного разряда на стрелочном приборе.

В процессе экспериментального определения накопленной ошибки шкалы исследованы точностные возможности электромеханической коррекции прогрессивной ошибки шкалы. Установлено, что эта ошибка при введении коррекции не превышает 0,12 мкм без учёта погрешности аттестации образцовой меры.

В процессе экспериментального определения ошибки прямого угла между рабочими поверхностями образцовых линеек исследованы точностные возможности юстировки линеек. Установлено, что ошибку прямого угла удается свести до величины, не превышающей погрешности метода измерения ($\sigma = 0,02$ мкм).

Наиболее значимыми погрешностями макета координато-измерительного устройства являются: нескоррегированная прогрессивная ошибка шкалы $\Delta_1 = 0,12$ мкм на длине 30 мм, нелинейность обратного преобразователя $\Delta_4 = 0,035$ мкм, нелинейность преобразователя код-напряжение $\Delta_5 = 0,05$ мкм, непрямолинейность образцовых траекторий $\Delta_6 = 0,02 \pm 0,06$ мкм на длине 30 мм. Погрешность квантования $\Delta_\infty = \pm 0,05$ мкм и случайная составляющая инструментальной погрешности $\Delta_7 = \pm 0,032$ мкм.

Вероятная предельная ошибка устройства для измерения координат в поле 30x30 мм определена по формуле:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_1 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6 + \sqrt{(\Delta_\infty \cdot \sqrt{2})^2 + (\Delta_7 \cdot \sqrt{2})^2} = \\ = 0,12 + 0,035 + 0,05 + 0,02 + \sqrt{(0,05 \cdot \sqrt{2})^2 + (0,032 \cdot \sqrt{2})^2} = 0,3 \text{ мкм.} \quad (5)$$

Воспроизводимость результата измерения при использовании цифрового табло устройства $\pm 0,1$ мкм и при использовании допол-

нительного разряда на стрелочном приборе $\pm 0,035$ мм.

ВЫВОДЫ

1. Обзор и анализ литературных данных показал, что в устройствах для измерения координат при повышении точности всего устройства возрастает доля ошибки, вносимой направляющими. В прецизионных устройствах погрешность направляющих может быть преобладающей. Существуют следующие пути уменьшения влияния погрешностей направляющих: повышение точности их изготовления, коррекция и рациональное построение схемы измерения координат. Показано, что последний путь для прецизионных устройств является наиболее перспективным. Предложена классификация координатных устройств в зависимости от числа координат, измеряемых без нарушения принципа компарирования (принцип Аббе).

2. Проведено теоретическое исследование погрешностей координатных устройств различных типов. Получено выражение, справедливое для всех рассмотренных типов координатных устройств и их компоновок. На основе проведенного анализа сформулированы общие принципы построения прецизионных устройств. Показано, что отсчётные устройства должны быть неподвижны, узел, реализующий систему отсчёта должен быть жестко связан со столом, а компоновка по схеме с неподвижной стойкой является предпочтительной. Повышение точности достигается при этом вследствие выполнения принципа компарирования, разделения транспортных и измерительных функций и замены низших пар высшими. Дальнейшее повышение точности возможно при максимальной разгрузке высших пар, стоящих в измерительной цепи или при замене их немеханическими, например, оптическими связями.

3. Предложено устройство для измерения координат, в котором в узле, реализующем систему отсчёта используются растровые шкалы с увеличенной протяженностью штриха, то есть осуществлена замена механической связи немеханической.

4. Предложено, разработано и исследовано устройство для измерения координат, в котором в узле, реализующем систему отсчёта, осуществлено малое измерительное усилие, чем существенно уменьшен износ образцовых линеек.

5. Разработаны, построены и исследованы растровые цифровые

компенсационные датчики перемещений с дискретностью 0,1 мкм и предельной погрешностью 0,28 мкм в диапазоне 30 мм. Выбранный тип датчиков позволяет реализовать координатное и контурное управление, цифропечать и запоминание результата.

6. Экспериментально исследованы составляющие суммарной погрешности устройства: ошибки шкалы, ошибки интерполирования и ошибки системы отсчёта. Установлено, что значимую величину имеют нескоррегированная накопленная погрешность шкалы (0,12 мкм), нелинейность обратного преобразователя (0,035 мкм или 0,07%), нелинейность преобразователя код-напряжение (0,05 мкм или 0,1%), непрямолинейность образцовых траекторий (0,02±0,06 мкм на длине 30 мм). Для выполнения метрологических исследований разработаны методики и средства, отвечающие повышенным точностным требованиям и экспериментально исследованы их погрешности. Показано, что в устройстве, выполненном по предложенной схеме, погрешность, вносимая направляющими не превышает 10±20% от суммарной погрешности.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Коляда Ю.Б. Устройство для измерения координат. Авторское свидетельство № 262.401 от 7 июля 1966 г., "Бюллетень изобретений и открытий", № 6, 26.I.1970 г.
2. Мироненко А.В., Балашов А.В., Коляда Ю.Б., Устройство для измерения перемещений двух подвижных частей механизмов. Авторское свидетельство № 261.484 от 15.4.1968 г. "Бюллетень изобретений и открытий", 1970, № 5.
3. Коляда Ю.Б. Растровый цифратор перемещений. Тезисы докладов научно-технической конференции "Автоматизация оптических методов измерения и отсчёта координат", Москва, 1969 г.
4. Балашов А.В., Коляда Ю.Б., Мироненко А.В., Электронные компенсирующие сканаторы на трубке мгновенного действия. Тезисы докладов научно-технической конференции "Автоматизация оптических методов измерения координат", Москва, 1969 г.

По результатам работы сделаны доклады на:

1. Межвузовском семинаре НИИ метрологии высших учебных заведений. Москва, 1967 г.
2. Научно-технической конференции "Автоматизация оптических методов измерения и отсчёта координат", Москва, 1969.