

№ 266595

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

М о с к о в с к о е
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

И Н У Ш К И Н Виктор Николаевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СКАНИРУЮЩИХ
КОМПЕНСАЦИОННЫХ ИНТЕРПОЛЯТОРОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ
ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Специальность 05.11.15 -
Метрология и взаимозаменяемость

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент Мироненко А.В.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Кисалёв В.М.
кандидат технических наук, доцент Горнев В.Ф.
Ведущее предприятие - ВНИМС, Г. Москва.

Автореферат разослан " " 1975 г.
Защита диссертации состоится " " 1975 г.
на заседании Совета факультета "Автоматизация и механизация
производства" МВТУ имени Н.Э. Баумана по адресу:
Москва, 107005, 2-я Бауманская улица, дом 5.

Ваши отамы - 2 - тать, просим
Учбный манская, 5,

С д т
имени

дов

анов В.А.

Вак.
тип.

11-75 г.

M 26 65 35-



1266535

ВВЕДЕНИЕ

янушкин В. Н. Разработка и

В директивах XXIV съезда КПСС указывается на необходимость всемерного улучшения качества продукции во всех отраслях народного хозяйства. Качество промышленной продукции в значительной степени определяется геометрической точностью деталей, узлов и машин. Поэтому важное значение для обеспечения высокого качества такой продукции имеет совершенствование средств для линейных и угловых измерений.

Анализ перспектив развития точных линейных и угловых измерений, проведенный во ВНИИме им.Д.И.Менделеева, показывает, что автоматизация и существенное повышение точности таких измерений в прецизионном станкостроении и приборостроении является задачей актуальной.

Перспективными с этих точек зрения являются фотоэлектрические измерительные системы с многозначными мерами, к которым относятся штриховые и растровые меры, дифракционные решетки, а также интерференционные и ультразвуковые устройства. Такие измерительные системы применяются в фотоштампах при изготовлении фотошаблонов, полупроводниковых приборов и интегральных схем, компараторах, измерительных машинах, а также в металлообрабатывающих станках. Их исследованию посвящены работы Каяка Л.К., Бржезинского М.Л., Корндорфа С.Ф., Преснукина Л.Н., Шаньгина В.Ф., Телешевского В.И., Тришино Н.В. и ряда других ученых. Для повышения разрешающей способности этих систем в последнее время широко используется метод интерполяции, позволяющий получать значения измеряемой величины внутри интервалов многозначных мер.

Перспективным направлением в разработке измерительных систем с интерполяцией является создание цифровых систем, в которых используется нулевой метод измерения с компенсационным уравниванием измеряемой величины. Такие измерительные системы разрабатываются на кафедре "Метрология и взаимозаменяемость" МВТУ им. Н.Э.Баумана под руководством к.т.н. А.В.Мироненко и применяются на ряде предприятий страны. Автор принимает участие в этих работах с 1960 г. Использование цифровых и левых компенсационных измерительных систем особенно целесообразно, по нашему мнению, в оборудовании для изготовления интегральных схем, в координатно-расточных станках, делительных и измерительных машинах. Перспективной областью применения таких систем являются станки с программным управлением, в которых они могут

11266535-

использоваться в качестве преобразователей обратной связи.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью автоматизации и повышения точности линейных и угловых измерений.

Целью исследования является определение путей уменьшения погрешности интерполяции, разработка способов коррекции основных погрешностей интерполяции и рекомендаций по конструированию точных интерполяторов.

В работе используются теоретические и экспериментальные методы исследования с обработкой экспериментальных данных на ЭЦВМ. Для оценки погрешностей применяются методы математической статистики.

Научная новизна работы заключается в теоретическом исследовании статической погрешности компенсационной системы с интерполяцией при безмасштабном преобразовании, разработке методики расчёта интерполяторов, позволившей связать их параметры с характеристиками измерительной системы.

Практическая ценность работы заключается в разработке методов и средств для экспериментального исследования характеристик интерполяторов, в разработке способов коррекции основных погрешностей интерполяции и рекомендаций по конструированию точных интерполяторов, в разработке серии интерполяторов для ряда измерительных устройств повышенной точности.

Результаты работы использованы при разработке ряда устройств и приборов для станкостроительной и приборостроительной промышленности.

Работа содержит 145 страниц машинописного текста, 29 рисунков, 12 таблиц и 114 наименований библиографии.

В первой главе диссертации рассмотрены способы интерполяции интервалов многозначных мер. По способу использования сигнала измерительные системы с интерполяцией разделены на две группы: 1) системы, в которых один из параметров сигнала является аналогом перемещения (амплитуда, фаза), 2) системы, при работе которых используются характерные точки сигнала (экстремумы). К системам первой группы относятся фазовые системы. Их исследованию посвящены работы: д.т.н. Л.Н.Преснухина, В.Ф.Шаньгина и других. Системы второй группы используют нулевой метод измерения с компенсационным уравниванием измеряемой величины. Их разработке посвящены работы к.т.н. А.В.Мироненко, Ю.Б.Коляды, А.В.Балашова. Достоинствами таких систем являются: 1) высокая разрешающая способность, 2) однозначное соответствие цифрового отсчёта положению подвижных частей измерительного устройства, 3) малая чувствительность к промышленным помехам, 4) самоконтроль работоспособности. Достижение высокой разрешающей способности нулевых компенсационных измерительных систем обусловлено: 1) хорошей энергетикой, 2) использованием усредняющих свойств измерительного сопряжения, 3) работой усилителей на переменном токе, что обеспечивает хорошую стабильность нуля, 4) использованием внутренней калибровки, которая состоит в поддержании соответствия диапазона компенсации интервалу меры, 5) возможностью охвата отрицательной обратной связью максимального количества звеньев системы.

Рабочему принципу нулевых компенсационных систем присущи два основных признака — признак наведения измерительной системы в нулевое положение и признак компенсации с целью измерения перемещений в долях интервала меры.

Анализ погрешностей нулевой компенсационной системы показал два пути уменьшения погрешности таких измерительных систем: 1) уменьшение погрешности наведения в нулевое положение за счёт автоматизации процесса наведения, 2) уменьшение погрешности измерения долей интервалов меры путём создания измерительных систем, полностью охватывающих обратную связь.

Анализ способов автоматического наведения измерительных систем в нулевое положение показал, что в настоящее время недостаточно исследований характерных сканирующих и развертывающих устройств. Об этом свидетельствуют противоречивые выводы их разработчиков о достоинствах и недостатках тех или иных конструкций. Наиболее широкое применение эти устройства нашли в фотоэлектрических микроскопах. На основе анализа литературных данных сделан вывод о предпочтитель-

ности применения в нулевых компенсационных системах сканирования колеблющимся индикаторным элементом измерительного сопряжения (индикаторным растром или зеркалом). При этом амплитуда сканирования определяется только интервалом мер; и появляется возможность совмещения сканирования с компенсационным измерением.

В работе проведен также обзор и анализ способов компенсационного измерения перемещений и сделан вывод о целесообразности осуществления компенсационного перемещения индикаторным элементом измерительного сопряжения.

Для одновременного осуществления в измерительных системах с интерполяцией функций сканирования и компенсации индикаторным элементом измерительного сопряжения необходимо разработать устройство, выполняющее совмещенные функции сканирования, компенсации и интерполяции — сканирующие компенсационные интерполяторы (СКИ). В известных устройствах такое совмещение функций отсутствует.

Наши исследования показали, что совместить функции сканирования и компенсации удастся в электромеханических преобразователях. Такие преобразователи просты в изготовлении, надежны в работе, имеют малые габариты. В диссертации рассмотрены конструктивные особенности, преимущества и недостатки некоторых типов электромеханических интерполяторов. Наиболее точными из них являются магнитоэлектрические. Исследованию таких интерполяторов уделено основное внимание в работе.

В диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка методики расчёта интерполяторов.
2. Разработка методов и средств для экспериментального исследования характеристик СКИ.
3. Разработка и исследование способов коррекции основных погрешностей интерполяции.
4. Разработка рекомендаций по конструированию точных СКИ.
5. Разработка опытного образца прибора.

Вторая глава диссертации посвящена разработке методики расчёта сканирующих компенсационных интерполяторов, методов и средств для их экспериментального исследования.

Для отработки методики исследования разработан магнитоэлектрический СКИ симметричной конструкции, обладающий меньшими инструментальными погрешностями по сравнению с несимметричным. Это позволило исследовать влияние конструктивных параметров несимметричных

СКИ на их точностные характеристики. Методика расчёта интерполяторов, разработанная в диссертации, позволяет связать их параметры с характеристиками измерительной системы. Она заключается в приведении данных для расчёта интерполяторов отдельно по функциям сканирования и компенсации к суммарной статической силе, обеспечивающей работу интерполятора в совмещённом режиме. Затем по величине суммарной силы рассчитываются минимальные габариты интерполятора. При этом составляющая силы, обеспечивающая работу интерполятора в режиме сканирования, определяется из уравнения движения колебательной системы. Формула для определения силы сканирования имеет вид:

$$F_{ск} = m x_{ск} \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4 \omega^2 \nu^2},$$

где m — масса инерционного элемента;
 $x_{ск}$ — амплитуда сканирования;
 ω_0 — собственная частота подвижной части интерполятора;
 ω — рабочая частота измерительной системы;
 ν — коэффициент затухания.

Для компенсации определяется через силу сканирования, исходя из принципа суперпозиции. Она связана с силой сканирования следующим выражением

$$F_{комп} = \frac{12 A^* + 7}{7} F_{ск},$$

где A^* — коэффициент увеличения, показывающий во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний превышает статическое смещение, вызванное статическим действием этой силы.

Габариты магнита, определяющие габариты интерполятора, рассчитываются по формулам

$$V_N^2 = \frac{F_{ск}^2}{P_{зд} \theta} \cdot \frac{M_N \rho}{(B_N H_N) \max M_z} \cdot \frac{\delta_0}{K_\delta^2} \cdot \frac{1}{K_n^2 K_N^2 K_{зап}},$$

$$e_N = \frac{M_N}{M_0} \cdot \frac{\delta_{кум}}{K_N}, \quad S_N = \frac{V_N}{e_N}$$

В диссертации проведено теоретическое исследование статической погрешности нулевой компенсационной системы с безмасштабным преобразованием. Исследование проведено методом структурного анализа. Получено следующее выражение для определения относительной погрешности интерполяции схемы

$$\delta_e = \delta_2 \frac{1}{K_2 K_3 K_4} - \delta_3 K_4 - \delta_4,$$

где δ_2 - погрешность усилителя;
 δ_3 - погрешность преобразователя код-напряжение (ПКН);
 δ_4 - погрешность СКИ;
 K_2, K_3, K_4 - коэффициенты передачи этих звеньев.

По результатам структурного анализа в работе сделаны следующие выводы: 1) интегрирующее звено не вносит погрешности, т.е. использование цифрового отсчёта позволяет исключить погрешность выходного звена компенсационной системы, 2) погрешность звеньев прямой ветви может быть уменьшена до необходимой величины путём увеличения коэффициента передачи K_2 усилителя, 3) погрешность компенсационной системы полностью определяется погрешностью преобразователей обратной ветви, в которую входят интерполятор (СКИ) и преобразователь код-напряжение (ПКН), и уменьшается с уменьшением коэффициента передачи интерполятора K_4 до величины его погрешности δ_4 . Таким образом, при экспериментальном исследовании характеристик СКИ с использованием компенсационной схемы погрешность метода будет определяться, в основном, классом точности ПКН, относительная погрешность которого в настоящее время может составлять 0,002 %.

Учитывая опыт конструирования нулевых компенсационных систем и результаты структурного анализа, сформулированы требования и разработан стенд для экспериментального исследования характеристик СКИ. Стенд состоит из четырех блоков: 1) станина стенда с исследуемыми СКИ, 2) основной электропульт, в котором размещена схема преобразования измерительного сигнала, 3) вспомогательный электропульт, в котором размещены вспомогательные блоки (усилители каналов измерения изменений температуры, перестраиваемый генератор синусоидального напряжения, схема контроля изменений напряжения сети), 4) быстродействующий самописец И320-5. Блоки смонтированы по функциональному признаку и питаются от высокостабильных источников. Соблюдение принципа инверсии и использование при исследовании метода замещения обеспечивается путём применения индивидуальных оснований, на которых в инвертных комбинациях устанавливаются исследуемые СКИ. При совместных исследованиях двух интерполяторов один из них считался образцовым, а другой исследуемым. Затем функции их менялись.

В диссертации показано, что при экспериментальном исследовании характеристик СКИ в условиях лаборатории можно ограничиться

пассивным способом термостабилизации и виброзащиты, так как погрешности, вызываемые этими факторами, либо несущественны, либо могут быть учтены при обработке результатов исследования, а помехи отфильтрованы. Так, например, показано, что при температурной постоянной времени механической части стенда, которая рассматривалась как термостат с тонким слоем теплоизоляции, около 1 часа тепловой дрейф нуля системы при монотонном изменении температуры в лаборатории со скоростью $0,5^{\circ}\text{C}$ за 1 час составит примерно $0,0005$ мкм, что не внесёт в результат исследования существенной погрешности. Постоянная времени термостата рассчитывалась по формуле

$$\tau \approx \frac{C}{S} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{\lambda} \right),$$

где C - теплоемкость камеры;
 S - площадь поверхности камеры;
 α - условия теплообмена с окружающей средой;
 d - толщина слоя теплоизоляции;
 λ - теплопроводность материала теплоизоляции.

Обеспечение требований к стабильности электронной схемы в работе решается путём использования звеньев, имеющих малую температурную зависимость: эмиттерный повторитель; усилитель с непосредственными гальваническими связями и отрицательной обратной связью, охватывающей все каскады; диодный демодулятор, дискретные элементы. В схеме стенда использовались транзисторные усилители с регулируемым коэффициентом усиления по напряжению от 150 до 8.000. В диссертации приведено описание автоматического режима работы стенда. Особенности работы схемы при различных исследованиях рассмотрены в соответствующих разделах. При работе стенда в автоматическом режиме использовался бесконтактный преобразователь код-напряжение (ПКН) на транзисторах разной проводимости класса точности 0,03. Секции ПКН подбирались методом замещения и перестановок. При этом использовалось то обстоятельство, что они связаны между собой простым соотношением 1:2:4:2 и требуется обеспечить пропорциональность изменения напряжения на выходе ПКН, а не его точность. При неавтоматическом режиме работы стенда использовался контактный ПКН, погрешность которого определяется, в основном, двумя составляющими: 1) методической погрешностью из-за изменения входного сопротивления делителя, 2) инструментальной погрешностью из-за неточности сопротивлений плеч делителя. Первая составляющая определяется выражением

$$\Delta U_{\max} = E \frac{Z_e}{R_{g. \text{ вх. дел.}}},$$

где ΔU - изменение напряжения источника;

Z_e - внутреннее сопротивление источника;

$R_{g. \text{ вх. дел.}}$ - минимальное входное сопротивление делителя.

Вторая составляющая погрешности ПКН определяется изменением его коэффициента передачи

$$|\Delta K(\Delta Z)| \leq \frac{1}{4} \beta,$$

где β - предельная погрешность сопротивлений делителя.

Показано, что метод построения пропорционального делителя с соотношением плеч 1:1:1 позволяет получить ПКН класса точности выше 0,01.

Третья глава диссертации посвящена разработке методики и экспериментальному исследованию характеристик СКМ. В работе проведен теоретический анализ состава погрешности интерполяции, выделены доминирующие составляющие и проведено их экспериментальное исследование. Показано, что основная погрешность интерполяции нулевой компенсационной системы для измерения перемещений состоит из двух составляющих: погрешности измерительного сопряжения и погрешности интерполяции. Исследование погрешностей многозначных мер является самостоятельной задачей и в данной работе не рассматривается.

Основными составляющими погрешности интерполяции являются:

1) погрешность наведения измерительного сопряжения в нулевое положение, 2) погрешности преобразования, 3) температурные и инструментальные погрешности. При исследовании погрешности рассматриваются приведёнными ко входу, т.е. к плоскости измерительного сопряжения.

На погрешность наведения измерительного сопряжения в нулевое положение существенно влияет погрешность от нестабильности оси сканирования интерполятора. Предложенная методика экспериментального исследования погрешности от нестабильности оси сканирования СКМ достаточно универсальна. Она пригодна для исследования нестабильности оси сканирования как электромеханических, так и оптико-электронных сканаторов. Метод основан на автоматической фиксации величины рассогласования между взаимным расположением элементов измерительного сопряжения. При интерполяции интервалов растров 10...100 мкм до 0,001 и использовании дополнительного разряда, выполненного на головке самописца, удается получить разрешающую способность метода до 0,001 мкм. В работе проанализированы причины нестабильности

оси сканирования интерполяторов, приведены характерные диаграммы долговременного дрейфа нуля системы. Из рассмотрения диаграмм сделан вывод, что неустойчивость оси сканирования интерполяторов не превышает 0,002 % от интервала меры. Корреляционный анализ результатов исследования долговременного дрейфа нуля системы, проведенный на ЭЦВМ, показал, что он определяется, в основном, тепловым дрейфом нуля интерполятора. Определены простые, частные и множественные коэффициенты корреляции между дрейфом нуля и изменением температуры окружающей среды и температуры интерполятора, надежность которых проверена методами математической статистики. По результатам корреляционного анализа четырех приемов исследования долговременного дрейфа нуля установлено, что среднее значение теплового дрейфа нуля интерполятора составляет при изменении температуры воздуха 0,1 мкм/град, а при изменении температуры интерполятора 0,14 мкм/град.

Для исследования погрешности наведения на экстремум освещенности за растровым сопряжением разработана двухканальная растрово-интерференционная измерительная система. Ее отличительной особенностью является использование одного СКИ для растрового и интерференционного каналов. В растровом канале он выполняет функции сканатора, а в интерференционном канале работает в совмещенном режиме. При этом осуществляется интерполяция интерференционной полосы до 0,001 доли. Таким образом, дискретность отсчета интерференционного канала при длине волны основного излучения 0,565 мкм составляет около 0,0008 мкм. Растровый канал устройства служит для неавтоматического наведения системы на экстремум освещенности за растровым сопряжением, а интерференционный — для автоматического определения этого положения в долях интерференционной полосы. Существенным достоинством такой системы является совмещение в одном устройстве без промежуточного преобразования исследуемого и образцового средства, что позволяет упростить процесс исследования и исключить дополнительные погрешности.

Для исключения погрешностей от изменения режима интерполятора время однократного наведения нормировалось. В работе проведено описание измерительной системы, рассмотрен принцип ее действия. Обработка результатов экспериментов проведена графоаналитическим методом наименьших квадратов. Показано, что предельная погрешность наведения на экстремум освещенности за растровым сопряжением не пре-

вышает 0,008 %. от интервала растров. Эксперимент показал принципиальную возможность создания цифровых интерферометров с интерполяцией интерференционной полосы до 0,001 доли.

В составе суммарной погрешности интерполяции существенный вес имеют погрешности преобразования. Доминирующей составляющей является погрешность от нелинейности статической характеристики, основными причинами которой для магнитоэлектрических СКИ являются:

1) неравномерность индукции в магнитном зазоре, 2) размагничивающее действие магнитного поля катушки, 3) нелинейность силовой характеристики упругого элемента. Погрешности, определяемые магнитными цепями интерполятора, трудно поддаются расчёту и моделированию, поэтому экспериментальное исследование нелинейности статической характеристики интерполяторов предпочтительно. Входной величиной таких интерполяторов является ток, а выходной — перемещение. Поэтому экспериментальное исследование нелинейности их характеристики сопряжено с необходимостью измерения токов и перемещений с относительной погрешностью не более 0,08 %. Такую относительную погрешность обеспечивает метод "трех шагов", предложенный А.В.Мироненко. Он позволяет использовать в качестве меры растры, встроенные в измерительное устройство, а вместо измерения тока катушки СКИ задавать его с помощью параллельного делителя напряжения с постоянным выходным сопротивлением. При этом используется усредняющее свойство растрового сопряжения, а точками экстраполяции статической характеристики являются экстремумы освещенности за растровым сопряжением, определяемые с погрешностью 0,008 % от интервала растра. Сущность метода "трех шагов" заключается в последовательном перемещении индикаторного растра на 1,2,3 интервала путём подачи в катушку интерполятора калиброванных токов и фиксации величины его отклонения от предписанного положения в промежуточных точках диапазона исследования. Предварительно осуществляется точная установка растров в нулевое положение в начальной и конечной точках диапазона исследования, т.е. осуществляется операция калибровки, которая предопределяет линейную аппроксимацию статической характеристики хордой, что существенно упрощает процесс измерения абсолютной величины нелинейности в промежуточных точках диапазона исследования. По результатам исследования сделан вывод, что нелинейность статической характеристики магнитоэлектрических СКИ носит систематический характер и определяется, в основном, неравномер-

ностью индукции в магнитном зазоре. В диссертации приведено описание схемы экспериментальной установки и рассмотрен принцип её действия. Показано, что относительная погрешность метода "трех шагов" не превышает 0,01 % от диапазона исследования.

Были также исследованы погрешность от теплового последствия и погрешность от гистерезиса. Погрешность от гистерезиса при сканировании вдвое меньше, чем без сканирования, что указывает на улучшение точности характеристик преобразователей с совмещенными функциями.

В работе были проведены совместные исследования интерполяторов, которые позволили изучить механизм теплового дрейфа нуля, разработать способы коррекции основных погрешностей интерполяции и рекомендации по конструированию точных интерполяторов. Исследование интерполятора, разработанного с учётом этих рекомендаций, показало, что погрешности от силовых и тепловых деформаций упругого элемента из-за прогрева катушки рабочим током удалось исключить практически полностью, а тепловой дрейф нуля уменьшился более чем в 2 раза и составил при изменении температуры окружающей среды 0,04 мкм/град, а при изменении температуры интерполятора 0,06 мкм/град (см. стр.

II).

Для коррекции погрешности от теплового последствия предложено параллельно цепи калибровки интерполятора включать компенсирующую цепь, состоящую из термистора ТП2/0,5 и дополнительного резистора, что позволило уменьшать эту погрешность с 0,004 мкм до 0,001 мкм для диапазона исследования 100 мкм.

Для уменьшения погрешности от нелинейности статической характеристики интерполяторов предложено два способа её линеаризации. Первый заключается в использовании нелинейного полупроводникового диода, имеющего обратную нелинейность по знаку и включаемого параллельно катушке интерполятора. Второй способ состоит во взаимокompенсации нелинейностей интерполятора (СКИ) и преобразователя код-напряжение (ПКи). Для этого нелинейность характеристики ПКН доводится до максимальной нелинейности статической характеристики СКИ путём увеличения внутреннего сопротивления источника питания за счёт включения дополнительного сопротивления между выходом источника и входом ПКН. Предложенные способы коррекции статических характеристик СКИ позволяют уменьшить эту погрешность в 3 + 5 раз.

Из анализа литературных данных и результатов теоретических и

экспериментальных исследований, проведенных в диссертации, сделав вывод, что при использовании разработанных способов коррекции основных погрешностей относительная погрешность интерполяции интервалов многозначных мер нулевым компенсационным способом не превышает 0,02 % и может быть уменьшена путём исключения погрешности от нелинейности и повышения разрешающей способности систем до 0,01 % от интервала меры. Это позволяет при использовании мелкопериодических мер существенно уменьшить дискретность отсчёта, а при использовании крупнопериодических мер увеличить диапазон интерполяции, что расширяет область применения нулевых компенсационных измерительных систем. Так, например, в интерференционных нулевых компенсационных системах в настоящее время реально получить дискретность отсчёта 0,0001 мкм, а в штриховых – увеличить диапазон интерполяции до десятков миллиметров.

В четвертой главе диссертации рассмотрены измерительные системы с многозначными мерами, разработанные с участием автора, в которых нашли применение сканирующие компенсационные интерполяторы и результаты их исследования. Дано обоснование необходимости разработки точных цифровых интерполяционных систем, показана область их применения.

Рассмотрены: цифровой растровый длиномер с диапазоном абсолютных измерений до 10 мм и дискретностью отсчёта 0,1 мкм; растровый преобразователь длина-цифра ПДЦ-200 с диапазоном абсолютных измерений до 200 мм и дискретностью отсчёта 0,1 мкм; координато-измерительное устройство в поле 30 x 30 мм с дискретностью отсчёта 0,1 мкм; измерительная система для измерения погрешностей шага ходовых винтов, предназначенная для работы с корректирующим устройством; компаратор для межоперационного компарирования штриховых мер до 1 метра с дискретностью отсчёта 0,05 мкм; цифровой интерферометр с диапазоном измерения до 100 мкм и дискретностью отсчёта 0,0027 мкм. Принцип действия перечисленных систем рассмотрен на примере экспериментального цифрового растрового длиномера ФЭРД-5, который разработан для проверки возможностей нулевых компенсационных измерительных устройств. В работе приведены функциональная и принципиальная схемы длиномера.

Перечисленные измерительные средства предназначены для измерения длин и углов в установившемся или медленно меняющемся режиме.

Для измерений в динамике подобные системы строятся с использованием оптико-электронных интерполяторов. Однако такие системы имеют существенно большую погрешность интерполяции.

В настоящее время различные модификации цифровых длиномеров применяются в технологическом процессе на ряде предприятий Москвы, Ленинграда, Ульяновска, Казани, а остальные измерительные средства переданы заказчику и проходят оптическую проверку в лабораториях.

В а к л ю ч е н и я

1. Обзор и анализ литературных данных показал целесообразность совмещения в нулевых компенсационных измерительных системах с интерполяцией интервалов многозначных мер функций сканирования, компенсации и интерполяции в одном СКИ, что позволяет одновременно автоматизировать процесс наведения и уменьшить погрешность интерполяции путём создания измерительных систем с максимальным количеством звеньев, охваченных обратной связью. При этом такие системы имеют образцовую длину для осуществления внутренней калибровки.

2. По результатам теоретического анализа статической погрешности нулевых компенсационных систем с интерполяцией сформулированы требования, при выполнении которых погрешность интерполяции минимальна и сводится к погрешности интерполятора. Разработана методика расчёта СКИ, позволяющая связать их параметры с характеристиками измерительной системы. С учётом теоретических и экспериментальных исследований разработаны методы и средства для экспериментального последования характеристик СКИ с высокой точностью.

3. Экспериментально установлено, что предельная погрешность наведения растрового сопряжения в нулевое положение составляет 0,008 %, а погрешность от гистерезиса 0,001 % от интервала меры. В результате экспериментальных исследований разработаны способ коррекции основных погрешностей интерполяции и сформулированы рекомендации по конструированию точных интерполяторов. Это позволило уменьшить тепловой дрейф нуля с 0,24 мкм/град до 0,1 мкм/град, исключить погрешности от силовых и тепловых деформаций упругого элемента, уменьшить погрешность от теплового последования с 0,004 % до 0,001 %, погрешность от нелинейности с 0,03 % до 0,008 %.

4. Анализ литературных данных, результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведение з работе, позволяют

сделать вывод, что при использовании разработанных способов коррекции основных погрешностей относительная погрешность интерполяции интервалов многозначных мер нулевым компенсационным способом не превышает 0,02 %. Это позволяет при использовании мелкопериодических мер существенно уменьшить дискретность отсчета, а при использовании крупнопериодических мер увеличить диапазон интерполяции, что расширяет область применения таких систем.

5. Результаты диссертации использованы при разработке ряда измерительных устройств и приборов, нашедших применение в станкостроительной и приборостроительной промышленности. Для исследования возможностей нулевых компенсационных систем с интерполяцией разработан экспериментальный длиномер ФЭРД-5 с повышенной разрешающей способностью.

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Янушкин В.Н. Экспериментальное исследование погрешности наведения на экстремум освещенности сопряжения метрологических растров. Сборник докладов семинара "Применение оптико-электронных приборов в измерительной технике". МДНТП им.Ф.Э.Дзержинского, М., 1978.

2. Янушкин В.Н., Коляда Ю.Б. Исследование статических характеристик сканирующих компенсационных интерполяторов устройств точного измерения перемещений. Тезисы докладов IV Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции. "Научные основы автоматизации производственных процессов в машиностроении и приборостроении". М., 1975.

3. Мироненко А.В., Янушкин В.Н. Фотоэлектрический растровый длиномер ФЭРД-МВТУ. "Машины, приборы, стандарты". Изд-во МВТУ им.Баумана, М., 1968.

4. Мироненко А.В., Янушкин В.Н. Фотоэлектрический интерферометр ФЭИ-МВТУ. "Машины, приборы, стандарты". Изд-во МВТУ им.Н.Э.Баумана, К., 1970.

5. Мироненко А.В., Янушкин В.Н., Коляда Ю.Б., Федотов В.Н., Самойленко С.В. Фотоэлектрический растровый длиномер ФЭРД-10 МВТУ (цифровой вариант). "Машины, приборы, стандарты". Изд-во МВТУ им.Баумана, М., 1972.